

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE
DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE DELL'INGEGNERIA
ENERGETICA E AMBIENTALE



TESI DI DOTTORATO

STRUMENTI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI PER LA GESTIONE DELLE EMERGENZE IN CASO DI INCENDIO

Dott. Andrea DUSSO

COMMISSIONE

Ing. Gabriele LANDUCCI	REVISORE
Prof. Paola RUSSO	REVISORE
Prof. Maurizio DE LUCIA	COMMISSARIO
Prof. Pietro GIANNATASIO	COMMISSARIO
Prof. Ernesto SALZANO	COMMISSARIO
Prof. Daniele GOI	SUPERVISORE
Prof. Stefano GRIMAZ	Co-SUPERVISORE

Prof. Alfredo SOLDATI	COORDINATORE DEL DOTTORATO
-----------------------	----------------------------

Posta elettronica dell'autore: andrea.dusso@uniud.it

Indirizzo dell'autore:

Safety and Protection Intersectoral Laboratory
University of Udine
Via del Cottonificio 114
33100 Udine – Italy
tel. +39 0432 558722
fax. +39 0432 558734
web: <http://sprint.uniud.it>

*Se ti é nato il gusto di scoprire,
non potrai che sentire il bisogno di andare piú in là.*
Walter Bonatti (1930-2011)

Sommario

Una efficace gestione delle emergenze in caso di incendio nelle attività lavorative richiede la preventiva conoscenza delle potenziali situazioni di pericolo da affrontare. Nella tesi è proposto un nuovo metodo (INSPECT) che consente la rapida caratterizzazione dei potenziali eventi avversi e la successiva valutazione della performance di sicurezza dell'attività considerata in caso di incendio o esplosione attraverso una analisi delle vulnerabilità del sistema. In questo quadro sono stati introdotti e definiti gli scenari di avversità potenziale che consentono di descrivere in modo pragmatico le situazioni avverse che possono caratterizzare una generica attività. Attraverso una analisi della letteratura internazionale, sono stati definiti alcuni modelli che consentono di descrivere in modo semplificato le caratteristiche dell'incendio o dell'esplosione e gli effetti generati, senza ricorrere all'impiego di modelli di simulazione, più onerosi da un punto di vista di tempi di calcolo. Questi ultimi sono stati utilizzati per la validazione dei modelli semplificati proposti. Nel metodo INSPECT, una volta individuate le potenziali situazioni avverse, vengono valutate le vulnerabilità dell'attività al fine di definirne la prestazione o performance rispetto ai cinque obiettivi introdotti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989) per il requisito essenziale di sicurezza numero 2 - "Sicurezza in caso di incendio". La seconda parte della tesi è incentrata sull'obiettivo di sicurezza che mira ad assicurare la possibilità di una sicura evacuazione degli occupanti. Il lavoro di ricerca si è quindi focalizzato sui sistemi d'esodo e le dinamiche di evacuazione. Attraverso uno studio sperimentale nel laboratorio LabCUBE_{egress}, ideato dai ricercatori dello SPRINT-Lab dell'Università degli Studi di Udine, si è affrontato lo studio delle dinamiche di movimento delle persone in spazi che consentono il movimento in fila indiana confrontando i risultati con dati di riferimento in letteratura. L'analisi ha consentito di verificare un fattore contenuto nel metodo PASS per l'analisi delle vulnerabilità di un sistema d'esodo. Il metodo PASS è stato applicato a un caso studio (Teatro Verdi, Pordenone) ed i risultati ottenuti sono stati confrontati con i risultati di una prova di evacuazione non preannunciata che da un lato ha consentito di raccogliere e porre in evidenza elementi utili per la gestione delle emergenze e dell'evacuazione, dall'altro ha evidenziato come il metodo PASS consenta di porre in evidenza i punti di forza e di debolezza del sistema rispetto agli scenari di avversità individuati.

Abstract

The management of fire-induced emergencies can be very complex without the prior knowledge of the resulting conditions of a fire. Starting from this consideration the thesis presents a new approach named INSPECT (Investigation and Study of Potential Emergency-scenarios for Countermeasure Tailoring). It can be applied for both fire safety management and emergency planning. The method can be divided in two main phases: the characterization of the hazards and the safety performance assessment of the building through vulnerability analysis. In this framework, the thesis proposes a methodology to quickly identify the potential adverse situations to deal with, starting from the inspection of the activity and the recognition of a limited number of indicators. In the methodology, the adversities that can characterize the activity are described through adversity scenarios. Both fire-induced and explosion-induced adversities are considered. Analytical equations that allow describing in a simplified but rapid way both the fire and the explosion adversities have been selected from international literature. The results obtained from the analytical equations adopted have been compared with data obtained from the literature and by using simulation model (FDS for fire-induced adversities). The last part of the thesis focuses on egress system safety and evacuation dynamics. PASS (Preliminary Assessment of the egress-System Safety), a method previously proposed in the literature, has been adopted as a reference to check the egress system vulnerabilities. To this aim, PASS has been further studied and applied to a new case study. Some factors adopted in PASS to consider people-egress system interrelationships have been verified through results obtained from experiments carried out in the LabCUBE_{egress} laboratory, developed from the SPRINT-Lab researchers of the University of Udine. A set of experiments were performed and the effects of narrow paths on people's movement were investigated. Experimental results have been compared with PASS forecast and the comparison shows a good agreement. Finally, an unannounced evacuation drill has been organized and carried out in the Verdi Theater, Pordenone (IT), involving more than 300 people. Both human behavior and people's movement have been analyzed, allowing collecting some interesting observations, which can be useful to manage evacuations. Furthermore, PASS has been applied to analyze the egress system of the Verdi Theater. The comparison between PASS analysis and experimental data shows a good agreement. Thanks to the results achieved, PASS can be proposed as a simple and rapid tool for the pre-design and management of the egress system safety.

Ringraziamenti

Il lavoro di questi tre anni non avrebbe potuto essere realizzato senza i preziosi consigli e le discussioni con il prof. Stefano Grimaz, che mi ha dato la possibilità di scoprire l'ingegneria della sicurezza ma soprattutto mi ha insegnato a guardare ed analizzare la realtà in modo "nuovo".

Un sentito ringraziamento al prof. Ernesto Salzano per i suoi insegnamenti e la sua guida nel mondo della ricerca. Ringrazio i revisori del mio lavoro prof. Paola Russo e Gabriele Landucci, per i loro commenti e suggerimenti.

Un ringraziamento speciale va ai ricercatori e al personale dello Laboratorio SPRINT con cui ho condiviso questi tre anni di lavoro nel mondo della ricerca: Fausto Barazza, Enrico Del Pin, Petra Malisan, Lilia Pecile, Elia Tosolini e Fabio Zorzini. Un grazie particolare al collega e amico Fabio Zorzini per i frequenti ed utilissimi confronti ed il supporto che mi ha dato in questi anni.

Un sentito ringraziamento va all'INAIL - Direzione Regionale Friuli Venezia-Giulia, per aver supportato finanziariamente il mio percorso di dottorato.

Infine la mia più sincera gratitudine va alla mia famiglia, che non ha mai fatto mancare il suo supporto e che mi ha insegnato l'importanza dello studio, dell'impegno per raggiungere un risultato e dell'onestà.

Indice

Introduzione	1
I Le emergenze in caso di incendio e il metodo INSPECT	5
1 Emergenza e sicurezza in caso di incendio	7
1.1 Interazioni tra l'incendio e le persone	7
1.1.1 Criticità connesse ai comportamenti e alle caratteristiche delle persone	9
1.2 Interazioni tra l'incendio e l'attività coinvolta	10
1.3 Interazioni tra l'incendio ed il contesto esterno	11
1.4 Strumenti di supporto alle decisioni per la gestione delle emergenze in caso di incendio	11
1.4.1 L'impostazione normativa attuale per la gestione della sicurezza in caso di incendio	12
1.4.2 La gestione delle emergenze in caso di incendio	12
2 Modelli concettuali di riferimento per la gestione delle emergenze	15
2.1 Il concetto di rischio	15
2.2 Il modello classico o probabilistico	17
2.3 Il modello UNESCO	18
2.4 Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno	19
2.4.1 Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno e la gestione delle emergenze e della sicurezza in caso di incendio	20
3 INSPECT	25
3.1 I concetti alla base	26
3.1.1 Gli scenari emergenziali	26
3.2 La struttura del metodo	29
3.2.1 Ispezione dell'attività e caratterizzazione degli scenari incidentali	29
3.2.2 Valutazione della performance dell'attività rispetto agli obiettivi di sicurezza	30
3.2.3 Definizione dello scenario emergenziale	32
3.2.4 Strategie per la rimozione degli scenari di avversità	33

INDICE

4	Obbiettivi della ricerca	37
II	Gli scenari di avversità potenziale	39
5	Incendi in ambienti confinati	41
5.1	Descrizione qualitativa della dinamica di incendio in ambienti confinati	41
5.2	Elementi che influenzano la dinamica di un incendio all'interno di una cella	45
5.2.1	Il combustibile	45
5.2.2	La cella in cui si sviluppa l'incendio	46
6	Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale	49
6.1	Scenari di incendio potenziale	50
6.2	Dinamica dell'incendio	51
6.2.1	Heat release rate	51
6.3	Impatto dell'incendio sui bersagli esposti	55
6.3.1	Impatto dell'incendio sulle persone	55
6.3.2	Equazioni per il calcolo dell'altezza dell'hot gas layer . . .	57
6.3.3	Equazioni per il calcolo della temperatura dell'hot gas layer	58
6.4	Definizione degli scenari di avversità potenziale	59
6.5	Pericolosità speciali: esplosioni	61
7	Gli scenari di incendio potenziale	63
7.1	Il <i>fuel package</i>	63
7.1.1	Criteri per la caratterizzazione dei fuel packages	66
7.1.2	Stima dell'HRR del fuel package	69
7.1.3	Growth rate del fuel package	70
7.1.4	HRR massimo del fuel package	70
7.2	Applicazione a un caso studio e verifica dei risultati	75
7.2.1	Definizione del fuel package	77
7.2.2	Stima dell'HRR	77
7.2.3	Confronto tra gli HRR stimati e gli HRR misurati sperimentalmente	78
8	Temperatura dell'hot gas layer	81
8.1	Stima di T_{HGL}	82
8.1.1	Il coefficiente di trasmissione del calore efficace h_k	84
8.1.2	Limiti di applicabilità	85
8.2	Applicazione della metodologia MQH per la rapida valutazione delle avversità	87
8.3	Confronto con i risultati di FDS	89
8.3.1	Il modello di simulazione FDS	91
8.3.2	Risultati e discussione	92

9	Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti	99
9.1	Flusso termico radiativo emesso dalle fiamme	99
9.1.1	Irraggiamento	100
9.2	Modelli per la valutazione dell'irraggiamento	101
9.2.1	Point-source model	101
9.2.2	Limiti di applicabilità	103
9.3	Confronto con i risultati di FDS	105
9.3.1	Scenari considerati	105
9.3.2	Risultati e discussione	106
9.4	Flusso termico radiativo emesso dai fumi	108
9.5	Flusso termico radiativo dai fumi e dalle fiamme	111
10	Gli scenari di esplosione potenziale	113
10.1	Effetti delle esplosioni	113
10.2	Definizione degli scenari di esplosione potenziale	116
10.3	Il modello per il calcolo delle sovrappressioni	117
10.3.1	Limiti di applicabilità	119
III	Analisi e gestione dell'evacuazione	121
11	L'evacuazione in caso di incendio	123
11.1	Gli strumenti utilizzabili per l'analisi di un sistema d'esodo	125
11.2	Il metodo PASS: principi e principali caratteristiche	127
12	Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza	131
12.1	Il laboratorio LabCUBE _{egress}	132
12.1.1	Il layout del LabCUBE _{egress}	133
12.2	Studi sulle dinamiche di movimento	134
12.3	Esperimenti LabCUBE _{egress} e metodologia di analisi	137
12.3.1	Analisi dei risultati	139
12.4	Confronto dei risultati sperimentali con la curva standard e verifica del fattore di rallentamento incluso in PASS	143
13	Applicazione dei test di vulnerabilità a un caso studio	147
13.1	Caratteristiche dello scenario studiato	147
13.1.1	Definizione del livello di pericolosità	149
13.1.2	Caratteristiche dell'esposizione	150
13.2	Analisi del sistema d'esodo	150
13.2.1	Analisi di primo livello: Test di abbandonabilità generale del sistema d'esodo	150
13.2.2	Analisi di secondo livello: la temporary-cold zone	151
13.2.3	Analisi di terzo livello: la hot zone	152
14	La prova di evacuazione	155
14.1	Obbiettivi dello studio	155
14.2	Metodologia di rilievo	156
14.3	Risultati della prova di evacuazione	157

INDICE

14.3.1	Figure di riferimento e tempo di pre-movimento	157
14.3.2	Effetti dell'appartenenza a un gruppo sulla scelta dei percorsi d'esodo	158
14.3.3	Dinamiche di movimento	159
14.4	Confronto con i risultati dei test di vulnerabilità	161
14.4.1	Flusso attraverso i varchi	161
Conclusioni		165
Bibliografia		169
A Test di vulnerabilità per l'obiettivo di sicurezza 4		179

Elenco delle figure

1	Schema degli obbiettivi che hanno caratterizzato l'attività di ricerca.	3
2.1	Integrazione tra lo schema logico causa-effetto ed il modello UNESCO.	19
2.2	Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno.	20
2.3	Contromisure elementari e il loro ruolo funzionale nel Processo Fondamentale di Generazione del Danno.	22
3.1	Schema logico alla base del metodo INSPECT.	27
3.2	Elementi di una situazione di emergenza descritti attraverso gli scenario emergenziali.	28
3.3	Elementi caratteristici di uno scenario emergenziale.	28
3.4	Schema del metodo INSPECT.	29
3.5	Requisito essenziale di sicurezza numero 2. I cinque obiettivi posti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989) integrati nel metodo INSPECT per la verifica della performance di sicurezza di una attività.	31
3.6	Contromisure e loro ruolo funzionale.	35
4.1	Schema del metodo INSPECT e aree su cui si è focalizzata l'attività di ricerca.	38
5.1	Evoluzione di un incendio in uno spazio confinato: (a) ignizione e crescita dell'incendio: formazione del plume e dell'hot gas layer; (b) fase di crescita dell'incendio: irraggiamento verso altri oggetti; (c) flashover; (d) incendio pienamente sviluppato. Immagini tratte da NFPA 921 (2011), modificate.	42
5.2	Descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio in una cella ossia in un ambiente confinato.	44
5.3	Schema delle interazioni che caratterizzano lo sviluppo di un incendio (Immagine tratta da Karlsson e Quintiere (2000), modificata)	46
6.1	Curve HRR sperimentali per diverse tipologie di materassi (Sundström 1996).	52
6.2	Esempio di curva HRR convenzionale.	54
6.3	Schema del metodo e definizione degli scenari di avversità potenziale	60
6.4	Schema del metodo per la caratterizzazione delle avversità indotte da esplosione.	61

ELENCO DELLE FIGURE

7.1	Relazione tra HRR massimo e superficie esposta di oggetti in legno (in alto) e plastica (in basso) (tratto da Natori (2008)). . .	73
7.2	Planimetria dell'ambiente considerato e principali fuel packages presenti all'interno (tratto da Madrzykowski e Walton (2004)). .	76
7.3	Postazione di lavoro (tratto da Madrzykowski e Walton (2004)). .	77
7.4	Confronto tra HRR sperimentale (Madrzykowski e Walton 2004) (punti) e HRR stimato: sono riportati la fase di crescita per diversi growth rate ed il picco di HRR stimato a partire da Natori (2008) (linea tratteggiata) e da Hietaniemi e Mikkola (2010) (punto e linea): (a) postazione singola; (b) 4 postazioni.	79
8.1	Schematizzazione di un incendio all'interno di una cella adottata da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981).	82
8.2	Confronto tra T_{HGL} stimato con la metodologia MQH e misurati sperimentalmente. Le linee nere tratteggiate, indicano l'incertezza delle misure sperimentali, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_E$, che corrisponde a un intervallo di confidenza al 95%. Le linee rosse tratteggiate, indicano l'incertezza delle temperature previste, la pendenza è pari a $\delta \pm 2\sigma_M$ (Tratto da Overholt (2014)).	87
8.3	Andamento della temperatura dell'hot gas layer in funzione della risoluzione numerica.	93
8.4	Confronto tra le temperature ottenute dalle simulazioni con FDS e le temperature ottenute attraverso la metodologia MQH: (a) scenari con fattore di ventilazione $2.8 \text{ m}^{5/2}$. L'area rossa identifica i casi in cui la combustione è controllata dalla ventilazione. (b) Scenari con fattore di ventilazione $12.5 \text{ m}^{5/2}$. (c) Scenari con fattore di ventilazione $2.8 \text{ m}^{5/2}$ e introduzione della correzione nella procedura. Le linee tratteggiate indicano l'incertezza delle previsioni FDS, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_{FDS}$	95
8.5	Confronto tra le temperature ottenute dalle simulazioni con FDS e le temperature ottenute attraverso la metodologia MQH: (a) Scenari con superficie del pavimento 6x6 m. (c) Scenari con superficie del pavimento 12x12 m. (c) Scenari con superficie del pavimento 20x20 m. Le linee tratteggiate indicano l'incertezza delle previsioni FDS, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_{FDS}$	97
9.1	Schema di riferimento per il point-source model.	102
9.2	Confronto tra flusso termico radiativo stimato con il modello point-source e misurato sperimentalmente. Le linee nere tratteggiate, indicano l'incertezza delle misure sperimentali, la pendenza è pari a $1 \pm \sigma_E$, che corrisponde a un intervallo di confidenza al 95%. Le linee rosse tratteggiate, indicano l'incertezza delle temperature previste, la pendenza è pari a $\delta \pm \sigma_{FDS}$ (Tratto da Overholt (2014))	104
9.3	Confronto tra i flussi termici stimati da FDS al variare della mesh: 5 cm (linea continua) e 10 cm (linea tratteggiata) per un HRR di 200 kW (in nero) e 300 kW (in grigio).	107

ELENCO DELLE FIGURE

9.4	Confronto tra i flussi termici radiativi previsti da FDS e stimati attraverso il point-source model come proposto da Modak (1977) (a) e nella versione in NFPA92b (b). La posizione della sorgente puntiforme ideale è stata posta al centro del fuoco ad una altezza pari ad un quarto dell'altezza della fiamma. Le linee tratteggiate indicano l'incertezza delle previsioni FDS, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_M$	109
9.5	Flusso termico radiativo al pavimento in una cella causato dall'hot gas layer.	110
10.1	Schema concettuale alla base del modello di Ogle (1999). (a) Si forma una miscela infiammabile all'interno di un volume di riferimento; (b) La miscela infiammabile brucia a volume costante; (c) Terminata la combustione i prodotti di combustione si espandono; (d) I prodotti di combustione espandendosi si mescolano con l'aria circostante, senza cedere calore all'esterno del volume di riferimento.	118
10.2	Schema di riferimento adottato per la definizione degli scenari di esplosione potenziale e la valutazione delle sovrappressioni. . . .	120
11.1	Processo d'esodo e le interazioni che lo caratterizzano (Immagine tratta da Bryan (2002), modificata).	124
11.2	Schematizzazione temporale del processo d'esodo: riferimenti per la valutazione della prestazione del sistema d'esodo.	126
11.3	Il processo d'esodo concettualizzato nel modello delle frontiere d'esodo. La <i>hot zone</i> rappresenta la cella in cui si manifesta l'evento avverso. La <i>warm zone</i> rappresenta il compartimento in cui si sviluppa l'evento avverso. La <i>temporary-cold zone</i> è la zona oltre la compartimentazione che racchiude la warm zone. Infine la <i>refuge zone</i> e la <i>safe zone</i> rappresentano luoghi che non risentono degli effetti avversi dell'evento (Immagine da S. Grimaz e Tosolini (2013)).	127
11.4	Analisi multilivello della vulnerabilità del sistema d'esodo e test eseguiti con il metodo PASS. (Immagine tratta da S. Grimaz e Tosolini (2013), modificata)	129
11.5	Fattori utilizzati nell'analisi per considerare le interazioni tra persone - edificio - condizioni ambientali.(Immagine tratta da S. Grimaz e Tosolini (2013)).	129
12.1	Immagini del LabCUBE _{egress}	132
12.2	Layout del LabCUBE _{egress} . (Immagine tratta da Tosolini, S. Grimaz e Salzano (2013))	133
12.3	Rappresentazione schematica della larghezza efficace in un corridoio.	135
12.4	Velocità di movimento in funzione della densità di affollamento per diverse tipologie di percorsi (Immagine tratta da Nelson e Mowrer (2002), modificata).	136
12.5	Definizione della larghezza di ingombro e dello spazio necessario per il libero movimento delle persone.	137

ELENCO DELLE FIGURE

12.6	Caratteristiche geometriche dei corridoi studiati. A sinistra un percorso caratterizzato da un franco (definito come differenza tra larghezza nominale e larghezza di ingombro delle persone) sufficiente a garantire il libero movimento delle persone. Al centro e a destra i corridoi studiati nelle sperimentazioni LabCUBE _{egress} .	138
12.7	Tipologie di percorsi studiati nel LabCUBE _{egress} : (a) percorsi dritti; (b) percorsi con curve a 90°; (c) percorso con curva a 180°.	139
12.8	Calcolo della densità sui percorsi all'interno del LabCUBE _{egress} .	140
12.9	Velocità di movimento misurate nel LabCUBE _{egress} (a) lungo percorsi dritti di larghezza 0.8 m (scenario R) e 0.9 m (scenario L); (b) lungo percorsi con curve a 90° di larghezza 0.8 m (scenario R90) e 0.9 m (scenario L90); (c) lungo percorsi con curva a 180° e larghezza 0.8 m (scenario R180).	141
12.10	Confronto tra le velocità di movimento misurate nel LabCUBE _{egress} , rappresentate con boxplot per ogni classe di densità e la curva standard (Nelson e Mowrer 2002): (a) percorso dritto di larghezza 0.9 m (scenario L); (b) percorso dritto di larghezza 0.8 m (scenario R); (c) percorso con curva a 90° di larghezza 0.9 m (scenario L90); (d) percorso con curva a 90° di larghezza 0.8 m (scenario R90); (e) percorso con curva a 180° di larghezza 0.8 m (scenario R180).	145
13.1	Schema dello scenario considerato.	148
13.2	Schematizzazione dello scenario considerato secondo il modello concettuale delle frontiere d'esodo.	149
14.1	Posizione dei punti di osservazione e delle videocamere all'interno del teatro.	156
14.2	Gruppi di classi appartenenti alle stesse scuole e scelta delle uscite. l'area evidenziata in rosso indica l'unico caso in cui gruppi-classe appartenenti alla stessa scuola hanno scelt percorsi di uscita diversi.	159
14.3	Ingresso principale del teatro (gap 2). Il gruppo di 63 persone uscito dalla platea attraverso il gap D per raggiungere l'esterno ha utilizzato solo l'uscita posta a destra.	160

Elenco delle tabelle

2.1	Descrizione degli elementi che costituiscono il Processo Fondamentale di Generazione del Danno.	21
3.1	Descrizione degli elementi in cui viene suddivisa una generica attività.	30
3.2	Classificazione delle contromisure in funzione della gravità delle conseguenze associali ad un potenziale mancato funzionamento. .	34
6.1	Definizione degli scenari potenziali di incendio.	51
6.2	Valori del growth factor α e classificazione della velocità di crescita dal fuoco (Karlsson e Quintiere 2000).	53
6.3	Definizione degli scenari potenziali di esplosione.	62
7.1	Definizione degli scenari potenziali di incendio in funzione delle caratteristiche dei fuel packages.	65
7.2	Definizione degli scenari distributivi.	66
7.3	Classificazione dei materiali in funzione dei flussi termici necessari per l'accensione (Clarke et al. 1990; Hadjisophocleous e Benichou 1999).	68
7.4	Classificazione qualitativa delle condizioni di confinamento. . . .	68
7.5	Classificazione della velocità di crescita del fuoco in funzione delle caratteristiche del fuel package.	71
7.6	Valori per la costante HRRPUA in base ai dati in Natori (2008)).	74
7.7	Valori per la costante HRRPUA proposti da Hietaniemi e Mikkola (2010).	75
8.1	Riassunto principali caratteristiche dei set di esperimenti considerati da Overholt (2014)). D, diametro equivalente del fuoco; H, W, L altezza, larghezza e lunghezza della cella.	86
8.2	Impatto delle temperature dell'hot gas layer (T_{HGL}) sui bersagli esposti.	88
8.3	Geometrie delle celle considerate.	89
8.4	Definizione degli HRR caratteristici di ciascuna cella. Il simbolo * indica i casi in cui HRR_p è maggiore di $HRR_{maxvent}$	90
8.5	Definizione degli scenari considerati nel caso di t-squared fire. . .	90
9.1	Riassunto principali caratteristiche dei set di esperimenti considerati da Overholt (2014)). D, diametro equivalente del fuoco; H, W, L altezza, larghezza e lunghezza della cella.	104

ELENCO DELLE TABELLE

9.2	Principali caratteristiche degli scenari considerati. D, diametro equivalente del fuoco; H, W, L altezza, larghezza e lunghezza della mesh.	105
9.3	Sintesi incertezza modello point-source rispetto alle previsioni ottenute da FDS per diverse altezze della sorgente puntiforme ideale rispetto alla base del fuoco.	108
9.4	Relazione tra temperatura dell'hot gas layer, irraggiamento e propagazione dell'incendio (tratto da Clarke et al. (1990)).	109
9.5	Confronto tra distanze di coinvolgimento, basate su tre valori di flusso termico radiativo per l'innesco dei materiali, ottenute da FDS e stimate con l'equazione 9.11.	112
9.6	Confronto tra distanze di coinvolgimento, basate su tre valori di flusso termico radiativo per l'innesco dei materiali, ottenute da FDS e stimate con l'eq. 9.11. Il simbolo - indica i casi in cui all'interno dell'ambiente considerato il flusso termico è maggiore rispetto al valore soglia considerato.	112
10.1	Relazione tra sovrappressione generata da un'esplosione e danni sugli edifici.	115
10.2	Definizione degli scenari di esplosione potenziale.	116
10.3	Definizione del coefficiente di dispersione convenzionale in relazione alle modalità di conservazione delle sostanze pericolose.	119
11.1	Descrizione di fattori introdotti in PASS per considerare le diverse interazioni tra persone - edificio - ambiente.	130
12.1	Larghezze del boundary layer per diverse tipologie di percorsi (tratta da Nelson e Mowrer (2002)).	135
12.2	Larghezze del boundary layer per diverse tipologie di percorsi (tratta da Nelson e Mowrer (2002)).	136
12.3	Caratteristiche dei percorsi studiati nel LabCUBE _{egress}	138
12.4	Velocità di movimento misurate durante le sperimentazioni nel LabCUBE _{egress} per i diversi tipi di percorsi.	142
12.5	Risultati del test t. $P(T \leq t)$ è la probabilità della ipotesi nulla, ovvero dell'ipotesi "le medie sono uguali".	142
12.6	Riduzione della velocità di movimento rilevata lungo i percorsi nel LabCUBE _{egress} rispetto alle velocità dedotte dalla curva standard per un ideale corridoio largo e confronto con previsione PASS.	144
13.1	Definizione degli scenari potenziali di incendio in funzione delle caratteristiche dei fuel packages.	150
13.2	Risultati del test della capacità di deflusso al varco critico.	152
14.1	Persone defluite attraverso i varchi.	159
14.2	Confronto tra i flussi ai varchi (in <i>persone/s</i>) stimati con l'approccio proposto in SFPE (2003) e in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) e misurati durante la prova di evacuazione.	162

ELENCO DELLE TABELLE

14.3	Flussi ai varchi (in <i>persone/s</i>) stimati con l'approccio proposto in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) introducendo la larghezza di ingombro propria dei bambini e flussi misurati durante la prova di evacuazione.	162
14.4	Confronto tra i flussi al varco D stimati con l'approccio proposto in SFPE (2003) e in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) e misurati durante la prova di evacuazione per effetto dell'utilizzo di metà larghezza del varco.	163

Pagina intenzionalmente vuota.

Introduzione

Nell'ambito della sicurezza sul lavoro, il rischio incendio è uno dei rischi più diffusi nelle attività lavorative, indipendentemente dal settore produttivo (primario, secondario e terziario), sia pubblico che privato. L'evento avverso incendio pone in modo particolarmente accentuato il problema della gestione dell'emergenza e dell'evacuazione.

Gli scenari d'incendio, pur governati da leggi chimico-fisiche sostanzialmente note, si presentano in forme diverse in relazione ai materiali combustibili presenti, alle condizioni d'uso dei locali, alle tipologie di persone coinvolte, agli affollamenti e al sito ove è ubicata l'attività. Tutti questi parametri, di fatto, contribuiscono a definire situazioni di maggiore o minore vulnerabilità del sistema attività-occupanti rispetto all'incendio e, in particolare, definiscono dei vincoli e delle condizioni operative per la gestione dell'emergenza.

Incendi come quello avvenuto presso il locale di pubblico spettacolo "The Station Nightclub" (Rhode Island, febbraio 2003) con un esito finale di 100 vittime e oltre 200 feriti, o più recentemente (ottobre 2015) in un locale di pubblico spettacolo a Bucarest in Romania con un esito di 29 vittime pongono in evidenza l'esito spesso devastante degli incendi.

In entrambi i casi l'incendio è stato innescato da un uno spettacolo pirotecnico all'interno del locale durante un concerto. L'innescò dei rivestimenti interni della sala in poliuretano espanso è stato seguito da un rapidissimo sviluppo dell'incendio con grande produzione di gas tossici. L'inadeguatezza del sistema d'esodo unito alla particolare severità dell'incendio ne ha determinato l'esito.

Questi esempi da un lato pongono in evidenza l'importanza della componente gestionale e organizzativa sulla prevenzione e gestione delle potenziali emergenze indotte in caso di incendio, dall'altro consentono di introdurre l'idea per cui gli scenari d'incendio, pur presentandosi con forme diverse, possono essere ricondotti a schemi pre-codificati, i quali possono essere definiti preventivamente ed essere utilizzati come strumento conoscitivo del potenziale evento avverso da affrontare oltre che fornire un supporto alle decisioni per la gestione dello scenario stesso.

Da un punto di vista gestionale risulta pertanto strategico analizzare i vari ambienti lavorativi o di vita per individuarne a priori i punti di forza e di debolezza e per quanto possibile, sarebbe anche utile caratterizzare gli scenari emergenziali che si potrebbero generare, conoscere la loro evoluzione nel tempo e le criticità che si possono sviluppare. Una corretta definizione delle contromisure da adottare richiede, infatti, una preventiva caratterizzazione degli scenari ai quali si può essere chiamati a rispondere, in modo da poter definire preventivamente azioni e misure che è opportuno porre in atto per salvaguardare i valori esposti, in primis la vita umana.

A prescindere dal rispetto dei requisiti minimi imposti dalle normative in materia di sicurezza e antincendio, risulta pertanto utile disporre di strumenti di valutazione dell'esistente capaci di fornire elementi di supporto alle decisioni sia in fase preventiva che in fase di gestione dell'emergenza in caso di incendio. Per tale fine è particolarmente indicato l'impiego di metodi di tipo valutativo che, più che portare a indici di rischio, permettono di mantenere una visione del problema secondo logiche più consone al *problem solving*, ossia in modo da fungere essi stessi da supporto alle decisioni nella definizione dei comportamenti più adatti a rispondere a situazioni emergenziali.

In altri termini, la tipologia di risposta è il risultato di una serie di valutazioni di scenario che passano attraverso una fase di riconoscimento della potenziale situazione avversa che si deve fronteggiare e l'individuazione della risposta più idonea secondo logiche e schemi pre-codificati, che considerano anche la fattibilità delle stesse in rapporto alle risorse (anche temporali) a disposizione. Questo approccio, noto in letteratura come metodo degli scenari elementari (S. Grimaz e Pini 1999), consente di predefinire gli schemi di risposta e quindi facilitare il training formativo secondo logiche di tipo situazionale contestualizzato. Una tale impostazione della gestione delle emergenze fornisce in modo indiretto anche importanti informazioni utili per attuare efficaci misure di prevenzione.

In questo quadro, il laboratorio SPRINT (Sicurezza e Protezione Intersettoriale) dell'Università degli Studi di Udine ha sviluppato una metodologia che, a partire da una ispezione dell'attività e il riconoscimento di alcuni elementi sostanziali che la caratterizzano, consente di identificare la potenziale emergenza da affrontare. La metodologia prende il nome di INSPECT - Inspection and Study of Potential Emergency-scenarios for Countermeasure Tailoring (S. Grimaz, Dattilo e Maiolo 2014). L'aspetto innovativo della metodologia INSPECT è l'impiego dello strumento concettuale degli scenari emergenziali che consentono di descrivere in modo convenzionale e pre-codificato la situazione emergenziale. Questa viene descritta attraverso tre elementi: lo scenario incidentale associato all'interazione tra effetti avversi dell'incendio e i valori esposti, l'interdipendenza con il contesto esterno in cui l'attività è inserita e la vulnerabilità funzionale associata alle caratteristiche che possono favorire o ostacolare il supporto da parte di squadre di soccorso esterne.

La metodologia verrà descritta in maggiore dettaglio nella Parte I.

L'attività di ricerca si inserisce nel quadro di INSPECT e si è sviluppata su due fronti principali schematizzati in Figura 1.

Il primo fronte su cui si è posta l'attenzione riguarda le avversità che possono manifestarsi a seguito di un incendio o una esplosione all'interno di una generica cella, termine con cui in INSPECT viene identificata una generica stanza o un volume chiuso, delimitato da pareti.

Il lavoro di ricerca ha portato a definire un set di scenari di avversità potenziale che consente di descrivere in modo pre-codificato le effetti avversi indotti dagli eventi incendio ed esplosione, entro cui incasellare l'universo degli scenari reali.

La definizione degli scenari non è fine a se stessa, ma funzionale alla definizione delle contromisure, ovvero alle misure preventive e protettive che hanno lo scopo di ridurre il livello di rischio.

In quest'ottica quindi, la definizione degli scenari deve partire dagli effetti attesi per l'evento avverso, differenziando tra diversi livelli di avversità e da qui procedere a ritroso per individuare quali sono, o possono essere, le cause che portano ad un evento caratterizzato dal livello di avversità considerato. In

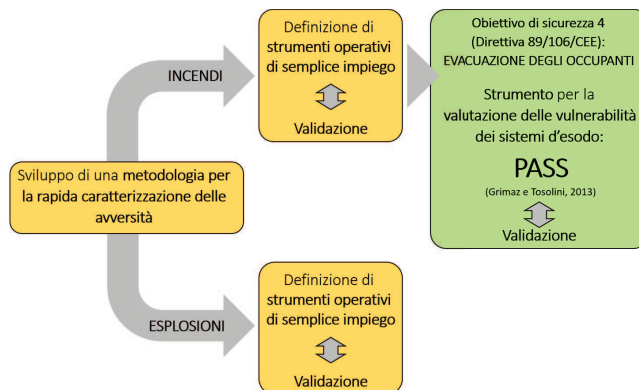


Figura 1: Schema degli obiettivi che hanno caratterizzato l'attività di ricerca.

questo modo è possibile individuare gli elementi sostanziali che caratterizzano un generico scenario reale ai fini della gestione del problema considerato e che devono essere individuati durante l'ispezione dell'attività. A ciascuno scenario pre-definito sono quindi associati gli elementi conoscitivi essenziali per identificare il livello di impatto che l'incendio o l'esplosione possono avere sui valori esposti.

A questo fine, l'attività di ricerca ha consentito di individuare alcune semplici equazioni analitiche disponibili in letteratura che da un lato costituiscono uno strumento di supporto all'identificazione degli scenari di avversità e dall'altro consentono una valutazione in termini quantitativi delle caratteristiche dell'incendio o dell'esplosione e degli effetti avversi generati (Temperatura e altezza dello strato di gas caldi e flusso termico radiativo in caso di incendio, sovrappressione massima nel caso delle esplosioni).

I risultati ottenuti sono descritti nella Parte II.

Nel metodo INSPECT vengono valutate le vulnerabilità dell'attività al fine di definirne la prestazione o performance rispetto ai cinque obiettivi di sicurezza introdotti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989) per il requisito essenziale di sicurezza numero 2 - "Sicurezza in caso di incendio":

1. *la capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;*
2. *la produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere siano limitate;*
3. *la propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata;*
4. *gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti;*
5. *sia presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso.*

L'analisi delle vulnerabilità avviene attraverso specifici test che hanno lo scopo di porre in evidenza la capacità del sistema di far fronte alle richieste di prestazione poste dagli scenari incidentali rispetto al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza. Vista la complessità del fenomeno incendio e la molteplicità di interazioni tra i suoi effetti e l'ambiente circostante, lo sviluppo dei test per valutare le vulnerabilità richiede un approccio fortemente multidisciplinare.

Nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata sull'obiettivo 4 - "*gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti*" e rappresenta il secondo fronte su cui si è concentrata l'attività di ricerca. In particolare, per l'analisi delle vulnerabilità del sistema d'esodo è stato adottato il metodo PASS (Preliminary Assessment of the egress-System Safety) (S. Grimaz e Tosolini 2013; S. Grimaz, Tosolini e Dolcetti 2010; Tosolini 2013).

In questo lavoro il metodo PASS è stato ulteriormente analizzato e alcuni fattori sono stati verificati rispetto a nuovi dati ottenuti dall'analisi di sperimentazioni effettuate nel LabCUBE_{egress} (S. Grimaz, Dusso et al. 2014; Tosolini, S. Grimaz, Pecile et al. 2012).

I test di vulnerabilità sviluppati a partire da PASS sono stati applicati a un nuovo caso studio (il Teatro Verdi di Pordenone).

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i dati ottenuti dall'analisi di una prova di evacuazione non preannunciata, organizzata in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, tenutasi presso il Teatro Verdi di Pordenone il 10 febbraio 2015 che ha coinvolto oltre 300 persone.

La scelta di eseguire una prova di evacuazione non preannunciata ha il pregio di fornire indicazioni riguardanti i comportamenti e i tempi di reazione e di movimento degli occupanti in presenza di un'evacuazione teoricamente di emergenza. La prova infatti, oltre che come strumento di validazione del metodo PASS, ha consentito di ottenere interessanti informazioni sulle dinamiche comportamentali e di movimento in condizioni di emergenza. Queste informazioni possono essere ritenute rappresentative di una reale situazione di emergenza poiché le persone coinvolte non erano state preventivamente messe a conoscenza della prova.

I risultati ottenuti verranno illustrati nella Parte III.

Parte I

Le emergenze in caso di incendio e il metodo INSPECT

Capitolo 1

Emergenza e sicurezza in caso di incendio

Le emergenze in caso di incendio in attività civili possono riguardare una molteplicità di contesti: possono interessare attività al chiuso, come ad esempio centri commerciali, teatri, cinema, locali per concerti o attività sportive, scuole, strutture ricettive, strutture sanitarie, stazioni ferroviarie, uffici, magazzini... oppure riguardare attività all'aperto, come aree in cui si svolgono concerti, eventi sportivi, mercati, fiere... In generale quindi, tutte le attività umane possono essere soggette a questo tipo di emergenze.

Lo sviluppo di un incendio determina condizioni ambientali ostili e spesso incompatibili con la sopravvivenza delle persone, con la tutela dei beni, il business-continuity e, più in generale, con la salvaguardia dei valori esposti. La gestione delle emergenze in caso di incendio e soprattutto la loro prevenzione risulta pertanto fondamentale per la salvaguardia dei valori esposti a questo tipo di avversità.

La complessità che caratterizza le emergenze indotte da un incendio è dovuta alle molteplici interazioni tra l'incendio ed il contesto in cui questo si sviluppa. In particolare si possono distinguere tre interazioni principali:

- interazioni con le persone coinvolte;
- interazioni con l'attività direttamente coinvolta nell'incendio, sia essa uno spazio confinato come un edificio o uno spazio aperto
- interazioni con il contesto esterno nel quale è inserita l'attività coinvolta nell'incendio. Il contesto esterno infatti, può determinare da un lato il coinvolgimento di altre attività contigue nell'incendio e dall'altro può favorire o meno le operazioni di soccorso da parte di squadre di soccorso esterne.

1.1 Interazioni tra l'incendio e le persone

Un incendio che si sviluppa in uno spazio confinato è caratterizzato dalla produzione di calore, fumo, gas di combustione e da una diminuzione della concentrazione

1.1. Interazioni tra l'incendio e le persone

di ossigeno. Essendo l'incendio una combustione non voluta, i suoi prodotti possono essere definiti come agenti avversi, i quali propagandosi, possono interagire o "impattare" con l'ambiente circostante dando luogo ad effetti avversi.

Effetti del fumo

I fumi costituiscono la frazione "visibile" degli effluenti prodotti dalla combustione. Sono costituiti da particolato solido e da particelle liquide (nebbie o vapori condensati), queste ultime costituite essenzialmente da vapore acqueo che al di sotto dei 100°C condensa. La dimensione di queste particelle è di grande importanza in quanto determina quanto in profondità possono penetrare nel sistema respiratorio (Purser 2002). I fumi vengono trasportati dai gas caldi della combustione e oltre che irritare il sistema respiratorio possono ridurre il livello di visibilità, in funzione della concentrazione del particolato nell'ambiente e dell'effetto fisiologico sull'occhio. La diminuzione del livello di visibilità determina nelle persone la perdita di orientamento, prolungando i tempi di permanenza in situazioni di pericolo e influenzando sulla velocità di movimento in caso di esodo (Butler e Mulholland 2004; Purser 1996).

Effetti di gas asfissianti, irritanti e tossici

Durante un incendio vengono prodotti diversi gas di combustione in relazione ai costituenti chimici dei materiali coinvolti nel processo di combustione, della concentrazione di ossigeno presente nell'ambiente e delle temperature raggiunte durante la combustione (Purser 2002). Tra i principali gas di combustione sono compresi l'anidride carbonica (CO_2) e il monossido di carbonio (CO), oltre a questi possono essere presenti altri gas come anidride solforosa (SO_2) acido cianidrico (HC), acido cloridrico (HCl), ammoniaca (NH_3), ossidi di azoto (NO_x). I gas di combustione possono impattare in diverso modo sull'organismo umano e in relazione al meccanismo d'azione possono essere distinti in asfissianti, irritanti e tossici (R. Gann e Bryner 2008; ISO 13571 2007; Purser 2002). L'inalazione dei prodotti della combustione può portare ad una diminuzione delle capacità di reazione della persona, a danni permanenti o al decesso. Gli effetti provocati dall'inalazione dei gas tossici, variano in funzione del tipo di gas, del tempo di esposizione, della concentrazione del gas, dell'età e dello stato di salute delle persone esposte, le quali possono presentare differente sensibilità ai prodotti della combustione (R. Gann e Bryner 2008; Purser 2002). L'incremento della temperatura e della percentuale di anidride carbonica (CO_2) nell'ambiente coinvolto nell'incendio portano ad un aumento iniziale della frequenza di respirazione ed alla conseguente inalazione di maggiori quantità di prodotti di combustione (Purser 2002). Tra i gas asfissianti il monossido di carbonio (CO) possiede una elevata velocità d'azione, con immediati effetti tossici a livello del trasporto di ossigeno, dell'omeostasi cardiorespiratoria e neurologica (Purser 2002). I prodotti della combustione sono presenti non solo nell'ambiente o nel luogo in cui ha origine l'incendio, ma per effetto dei moti convettivi che si determinano possono essere trasportati in altre parti dell'edificio mettendo a rischio l'incolumità di persone presenti anche in locali lontani da quello in cui ha avuto origine l'incendio (Cooper 2002). Inoltre, anche se freddi, mantengono inalterata la loro pericolosità come evidenziato da molti incidenti, si veda ad esempio Madrzykowski e Walton (2004).

Effetti della diminuzione della concentrazione di ossigeno

Durante un incendio in ambienti confinati, la percentuale di ossigeno in aria diminuisce a causa del consumo per alimentare la combustione dei materiali. Questa riduzione può provocare ipossia, anossia, con effetti variabili sull'organismo umano in funzione del progressivo ridursi del contenuto di ossigeno nel sangue arterioso e delle specifiche condizioni di salute della persona (R. Gann e Bryner 2008; ISO 13571 2007).

Effetti termici

Il calore trasmesso dalle fiamme e dai gas di combustione caldi può causare danni alle persone esposte. I principali effetti dell'esposizione al calore sono:

- ipertermia, a causa della temperatura elevata in cui una persona è immersa, i meccanismi fisiologici della termoregolazione non riescono a dissipare l'incremento del calore corporeo, causando gravi alterazioni alle funzioni cardio-respiratorie e cerebrali;
- ustioni della superficie cutanea e delle vie respiratorie, la gravità delle ustioni dipende dalla temperatura dei gas o dall'entità dell'irraggiamento termico dalle fiamme, dalla durata dell'esposizione e nel caso delle ustioni alle vie respiratorie anche dalla percentuale di umidità contenuta nell'aria inalata.

Va inoltre considerato il fatto che una rapida propagazione delle fiamme può rendere inaccessibile o inutilizzabile parte del sistema d'esodo e quindi impedire o ostacolare l'evacuazione delle persone.

1.1.1 Criticità connesse ai comportamenti e alle caratteristiche delle persone

La gestione di una emergenza incendio oltre agli effetti diretti che l'incendio ha sul corpo umano, non può prescindere dal considerare i comportamenti e le azioni che possono essere intraprese dalle persone. Queste azioni sono di tipo diverso e difficilmente prevedibili ed hanno spesso un ruolo fondamentale nel determinare l'esito di una emergenza. In caso di incendio infatti, le persone reagiscono attuando una varietà di risposte fisiche e comportamentali che derivano dalla continua interazione con l'ambiente e con le altre persone presenti (Proulx 2002). Kobes et al. (2009) riporta come di frequente i comportamenti degli individui coinvolti in un incendio sono caratterizzati da incertezza e indecisione sulle azioni da attuare e dalla tendenza a ritardare l'evacuazione. In molti casi le persone continuano a svolgere le attività in cui sono impegnate, ignorando la situazione di pericolo o eventuali segnali di allarme. Il comportamento degli occupanti nelle situazioni di emergenza è infatti fortemente influenzato dalle informazioni disponibili: le persone in possesso di informazioni ambigue tendono a minimizzare la gravità della situazione in atto, ciò può portare ad attuare azioni non appropriate, come appunto ignorare i segnali di allarme e ritardare l'inizio dell'evacuazione. (Pauls, Groner et al. 2009; Proulx 2002). In molti casi le persone, anche se si sono inizialmente portate in sicurezza all'esterno dell'edificio, cercano di rientrare all'interno alla ricerca di amici e familiari o per tentare di recuperare oggetti personali o animali. L'affiliazione, ossia l'appartenenza a

1.2. Interazioni tra l'incendio e l'attività coinvolta

gruppi di persone legate da vincoli affettivi o di responsabilità reciproca, può determinare dinamiche di gruppo e la tendenza ad attuare comportamenti gregari noti in letteratura come *herding behaviour*, che possono ritardare l'allontanamento da una situazione di pericolo o portare ad un utilizzo non efficiente del sistema di vie di esodo (SFPE 2003).

In alcuni casi, le conseguenze disastrose che si registrano in seguito ad un incendio sono connesse alle reazioni incontrollate delle persone, che attuano comportamenti *nonadaptive*, come ad esempio la fuga precipitosa lungo le vie di esodo, talvolta anche calpestando le persone cadute a terra, come nell'incendio verificatosi nel 2003 nel locale di pubblico spettacolo 'The Station Nightclub' nel Rhode Island, USA, con 100 vittime e oltre 200 feriti (Grosshandler, Bryner e Madrzykowski 2005).

Va inoltre considerata la possibile presenza di persone con difficoltà a rispondere correttamente in condizioni critiche, a causa di disabilità o limitazioni di tipo motorio, sensoriale o cognitivo. Queste necessitano di più tempo per l'evacuazione e in generale possono incontrare maggiori difficoltà nell'affrontare una via di esodo per allontanarsi da un'area critica, mentre in alcuni casi possono non essere in grado di allontanarsi autonomamente, come nel caso di persone allettate. Le caratteristiche delle risposte attuate dalle persone possono dipendere anche da altri fattori, come lo stato di allerta; persone che stanno dormendo, in stato di ebbrezza o sotto l'effetto di farmaci o sostanze stupefacenti, possono essere incapaci di percepire o interpretare correttamente segnali o informazioni ricevute e di attuare azioni appropriate (Proulx 2002).

Va infine sottolineato che oltre agli questi aspetti prettamente legati al comportamento umano, il buon esito di una evacuazione è spesso legato alla qualità del sistema d'esodo e come già ricordato alla qualità delle informazioni che le persone ricevono (SFPE 2003).

1.2 Interazioni tra l'incendio e l'attività coinvolta

Nel caso in cui l'incendio si sviluppi in un edificio, il coinvolgimento delle strutture portanti e degli elementi non strutturali, degli impianti e dei materiali e dei beni presenti in un edificio, introduce ulteriori elementi di complessità nella gestione delle emergenze in caso di incendio.

L'esposizione delle strutture di un edificio alle temperature elevate indotte da un incendio può in molti casi comprometterne la stabilità. I materiali da costruzione esposti alle sollecitazioni termiche prodotte dall'incendio subiscono un degrado delle proprietà meccaniche che può ridurre la resistenza meccanica, fino al collasso strutturale dell'edificio o parte di esso. L'incremento di temperatura determinato dall'incendio può inoltre introdurre coazioni termiche che possono determinare la perdita di capacità portante delle strutture (Purkiss 2007).

L'esposizione alle fiamme o anche al calore trasmesso dai prodotti di combustione caldi può portare al degrado delle caratteristiche meccaniche e all'instabilità di elementi non strutturali, come ad esempio rivestimenti, controsoffitti, arredi o altri elementi che, da un lato possono innescarsi propagando ulteriormente l'incendio, dall'altro possono collassare, ostruendo potenziali vie di fuga o impattare direttamente sulle persone.

1. Emergenza e sicurezza in caso di incendio

Il coinvolgimento nell'incendio di impianti tecnologici può generare, in relazione alla loro tipologia e caratteristiche, ulteriori eventi incidentali ed introdurre elementi di pericolosità aggiuntivi.

Gli impianti di ventilazione possono favorire la propagazione dell'incendio e dei prodotti di combustione all'interno dell'edificio (Milke e Klote 2008).

Il danneggiamento di impianti elettrici, impianti fotovoltaici o di componenti elettriche può comportare pericoli di elettrocuzione, corto circuiti con successivi incendi e mancato funzionamento di apparecchiature di emergenza.

L'irraggiamento o il coinvolgimento diretto nelle fiamme di contenitori o impianti contenenti fluidi in pressione può causare lo scoppio degli stessi con effetti di tipo meccanico come onde di pressione e proiezione di frammenti.

Il danneggiamento o la rottura di contenitori o impianti può provocare fuoriuscite di sostanze pericolose come ad esempio sostanze infiammabili, esplosive, comburenti, corrosive, tossiche, nocive, irritanti e cancerogene che aggravano ulteriormente la situazione di emergenza.

L'interazione dell'incendio con l'attività o l'edificio coinvolto, quindi non determina solamente una perdita di valori economici, ma introduce ulteriori elementi di complessità e di effetti avversi che possono impattare sulle persone, siano esse occupanti o soccorritori.

1.3 Interazioni tra l'incendio ed il contesto esterno

Le emergenze incendio possono essere caratterizzate da ulteriori criticità, connesse alle particolari condizioni di contesto in cui si verifica l'evento. Le specifiche caratteristiche di ubicazione dei luoghi o plano-volumetriche dei fabbricati interessati dall'evento possono dare luogo a interconnessioni con altre attività contigue o con l'ambiente esterno, favorendo così la propagazione dell'incendio e degli effetti avversi ad elementi esterni.

Ubicazione e contesto possono inoltre introdurre criticità connesse alla raggiungibilità da parte dei soccorritori e quindi ostacolare o rendere complesse le attività di controllo ed estinzione dell'incendio ed il salvataggio delle persone da parte delle squadre di soccorso. Le differenti possibilità di avvicinamento e di accessibilità dei mezzi di soccorso, di utilizzo di attrezzature per lo spegnimento dell'incendio o per il salvataggio delle persone o la disponibilità di risorse idriche possono condizionare in modo determinante l'attività di soccorso svolta dai Vigili del fuoco (Pecile 2013).

1.4 Strumenti di supporto alle decisioni per la gestione delle emergenze in caso di incendio

Gli scenari d'incendio si possono presentare in forme sempre diverse e dipendono dai materiali presenti, dalle condizioni d'uso dei locali, dalla tipologie di persone coinvolte, dagli affollamenti, dal sito ove è ubicata l'attività.

Da un punto di vista gestionale risulta pertanto strategico analizzare i vari ambienti lavorativi o di vita per individuarne a priori i punti di forza e di debolezza e per caratterizzare gli scenari emergenziali che si potrebbero

1.4. Strumenti di supporto alle decisioni per la gestione delle emergenze in caso di incendio

generare, conoscere la loro evoluzione nel tempo e le criticità che si possono sviluppare. Una corretta definizione delle contromisure da adottare richiede, infatti, una preventiva caratterizzazione degli scenari ai quali si può essere chiamati a rispondere, in modo da poter definire preventivamente azioni e misure che è opportuno porre in atto per salvaguardare i valori esposti.

1.4.1 L'impostazione normativa attuale per la gestione della sicurezza in caso di incendio

La sicurezza antincendio è un fattore chiave nella gestione di un edificio o di una attività. Essa si attua attraverso un insieme di scelte progettuali, interventi tecnologici e azioni volte a minimizzare i danni attesi a persone, beni e strutture in caso di un incendio. Fino a pochi anni fa la sicurezza antincendio è stata messa in atto basandosi esclusivamente sulla verifica del rispetto delle disposizioni imposte dalla normativa attraverso un approccio che viene detto "prescrittivo". Con questa impostazione tradizionale, le regole tecniche stabiliscono direttamente le misure di sicurezza antincendio fissando i livelli minimi da rispettare e contribuendo così a diffondere la visione secondo la quale la sicurezza emerge dai testi normativi. Tale approccio, nonostante sia di semplice applicazione per i tecnici e permetta di risolvere la maggior parte dei casi progettuali, risulta inadeguato in situazioni non contemplate dalla norma tecnica o per le quali la normativa non riesce a dare risposte sufficienti e complete alle esigenze, come nel caso di attività o edifici esistenti (S. Grimaz, Dattilo e Maiolo 2014).

Una svolta significativa, a livello nazionale, in merito alla prevenzione incendi è avvenuta con l'emanazione del DM 9 maggio 2007 (2007) che introduce il cosiddetto "approccio ingegneristico" o "prestazionale" alla sicurezza antincendio. L'approccio prestazionale è attuato attraverso la Fire Safety Engineering (FSE), disciplina che attraverso l'applicazione di principi ingegneristici, di regole e giudizi basati sulla valutazione scientifica del fenomeno di combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano ha l'obiettivo di tutelare la vita umana, proteggere i beni e l'ambiente, quantificare i rischi da incendio e valutare analiticamente le misure di prevenzione ottimali, necessarie a limitare, entro i livelli previsti, le conseguenze dell'incendio (ISO/TR 13387-1 1999).

L'approccio ingegneristico imponendo di verificare che siano rispettati degli obiettivi specifici, si contrappone all'approccio prescrittivo, che obbliga semplicemente all'applicazione passiva della normativa tecnica. Infatti, mentre l'approccio tradizionale si focalizza sui valori numerici minimi da garantire nel progetto, quello prestazionale definisce, più in generale, gli obiettivi di sicurezza che si devono raggiungere e le prestazioni che l'opera deve garantire, consentendo maggiore flessibilità nella progettazione. D'altro canto l'applicazione dell'approccio prestazionale richiede sia una conoscenza approfondita del fenomeno incendio e dei meccanismi chimici e fisici che lo caratterizzano, sia la conoscenza di modelli e codici di calcolo in grado di riprodurre, attraverso simulazioni, questo fenomeno. Questi aspetti hanno considerevolmente ostacolato la diffusione dell'approccio prestazionale in Italia.

1.4.2 La gestione delle emergenze in caso di incendio

Ai fini della gestione delle emergenze incendio, entrambi gli approcci sopracitati sono difficilmente applicabili: da un lato le regole tecniche con carattere prescrit-

1. Emergenza e sicurezza in caso di incendio

tivo pur essendo semplici sono di difficile applicazione a causa della eccessiva rigidità, dall'altro, l'approccio prestazionale pur assicurando una grande flessibilità è molto complesso e introduce un certo grado di incertezze oltre a non essere facilmente controllabile.

Sarebbe utile, pertanto, poter disporre di uno strumento che fosse caratterizzato dalla semplicità di utilizzo tipica delle norme prescrittive e della flessibilità dell'approccio prestazionale. Un tale strumento va ricercato nei principi e nei metodi della fire safety engineering, il cui scopo è quello di permettere e promuovere lo sviluppo di soluzioni ingegneristiche ai problemi di sicurezza posti dagli incendi (Drysdale 2011).

Nel seguente lavoro verrà presentato INSPECT (Inspection and Study of Potential Emergency-scenarios for Countermeasure Tailoring), un metodo semplificato pensato per essere uno strumento valutativo rapido che a partire da una ispezione visiva dell'attività, consente una valutazione della performance di sicurezza in caso di incendio in funzione delle effettive caratteristiche riscontrate e descritte attraverso scenari emergenziali. Questa analisi è funzionale alla definizione delle misure di sicurezza antincendio da adottare con lo scopo di prevenire o gestire correttamente una situazione di emergenza indotta da un incendio. Tale approccio consente di adattare le misure di sicurezza alle specifiche caratteristiche dell'attività.

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 2

Modelli concettuali di riferimento per la gestione delle emergenze

Un'emergenza può essere definita come una condizione critica generata da un evento avverso che causa un incremento significativo del livello di rischio rispetto a quello caratteristico di una condizione ordinaria (S. Grimaz 2000).

Al contrario la sicurezza può essere definita come una condizione caratterizzata da un livello di rischio accettabile, di conseguenza un sistema generico può ritenersi sicuro rispetto a una determinata situazione avversa, come ad esempio l'incendio, se il livello di rischio generato da tale evento è ritenuto accettabile.

Definire il concetto di rischio e introdurre i principali modelli per la sua valutazione e gestione risulta pertanto una premessa fondamentale prima di descrivere INSPECT (Inspection and Study of Potential Emergency-scenarios for Countermeasure Tailoring). INSPECT verrà proposto in questa tesi come un metodo che consente la rapida caratterizzazione dei potenziali eventi avversi e la successiva valutazione della performance di sicurezza dell'attività considerata in caso di incendio. Per una corretta gestione delle emergenze infatti, è fondamentale conoscere a priori, ossia prima del verificarsi dell'emergenza stessa, i potenziali eventi avversi e le sue principali criticità che caratterizzano una attività. Tale conoscenza permette di identificare le contromisure tecniche e/o organizzative più adeguate per prevenire, limitare o contrastare le emergenze.

2.1 Il concetto di rischio

Il concetto di rischio è consolidato in particolare nell'ambito della gestione delle emergenze indotte da disastri naturali, nell'ambito della sicurezza in caso di incendio o della gestione della sicurezza in ambito industriale, tuttavia non esiste una definizione univoca. Nella letteratura tecnica, infatti, sono proposte diverse definizioni.

Di seguito, a titolo di esempio, sono riportate alcune definizioni proposte da diversi autori in vari ambiti:

2.1. Il concetto di rischio

- UNESCO (1972). *Risk is a possibility of loss. The type or cause of the risk may be further specified as appropriate.*
- UNDRO (1979). *Risk means the expected number of lives lost, persons injured, damage to property and disruption of economic activity due to a particular natural phenomenon, and consequently the product of specific risk and elements at risk. Specific risk means the expected degree of loss due to a particular natural phenomenon: it is a function of both natural hazard and vulnerability. Therefore, total risk can be expressed in pseudo-mathematical form as:*

$$\text{Risk} = \text{Hazard} * \text{Elements at Risk} * \text{Vulnerability}$$

- Fournier d'Albe (1982). *Risk is the probability of loss in a given period of time. It can be obtained from the combination of three elements:*

$$\text{Risk} = \text{Hazard} * \text{Elements at risk} * \text{Vulnerability}$$

- Clarke et al. (1990). *Risk is the expected life safety loss.*
- UNDHA (1992). *Risk is "Expected losses (of lives, persons injured, property damaged, and economic activity disrupted) due to a particular hazard for a given area and reference period. Based on mathematical calculations, risk is the product of hazard and vulnerability".*
- Crichton (1999). *Risk is the probability of a loss, and this depends on three elements, hazard, vulnerability and exposure. If any of these three elements in risk increases or decreases, then risk increases or decreases respectively.*
- Sayers et al. (2003). *Risk is a combination of the chance of a particular event, with the impact that the event would cause if it occurred. Risk therefore has two components - the chance (or probability) of an event occurring and the impact (or consequence) associated with that event. The consequence of an event may be either desirable or undesirable... In some, but not all cases, therefore a convenient single measure of the importance of a risk is given by:*

$$\text{Risk} = \text{Probability} * \text{Consequence}$$

- Watts e Hall (2002). *Risk is the potential for realization of unwanted, adverse consequences to human life, health, property, or the environment. Estimation of risk (for an event) is usually based on the expected value of the conditional probability of the event occurring times the consequence of the event given that it has occurred. It follows that risk for a building, a product, or some other entity would be the probability distribution of events and associated consequences relevant to that building, product, or entity.*
- UNISDR (2004). *Risk is the probability of harmful consequences, or expected losses (deaths, injuries, property, livelihoods, economic activity disrupted or environment damaged) resulting from interactions between natural or*

2. Modelli concettuali di riferimento per la gestione delle emergenze

human-induced hazards and vulnerable conditions. Conventionally risk is expressed by the notation

$$Risk = Hazards * Vulnerability$$

Some disciplines also include the concept of exposure to refer particularly to the physical aspects of vulnerability.

- Yung (2008). *Risk is the probability of a certain unwanted fire scenario and the consequence of that scenario.*
- ISO/FDIS 13943 (2008). *Fire risk is combination of the probability of a fire and a quantified measure of its consequence. It is often calculated as the product of probability and consequence.*
- NFPA 551 (2010). *Risk is "The paired probabilities and consequences for possible undesired events associated with a given facility or process".*

Si osserva come nonostante gli ambiti di applicazione siano diversi, il concetto di rischio venga sempre legato al concetto di perdita di un valore o a quello di conseguenze non volute o dannose per gli elementi esposti (persone, ambiente, beni) causate da un evento avverso (*hazard*). Le precedenti definizioni possono essere ricondotte a due distinti modelli per valutare il rischio: il modello "classico" o probabilistico e il modello "UNESCO".

2.2 Il modello classico o probabilistico

Secondo il modello classico, il livello di rischio può essere espresso come il prodotto della probabilità di accadimento di un evento avverso e una misura o magnitudo delle conseguenze espressa in termini di uno specifico valore misurabile, come ad esempio numero di vite perse, perdite finanziarie, danni economici. La definizione di rischio considerata può essere formalizzata con la seguente relazione:

$$R = P * M$$

Dove:

R = rischio;

P = probabilità di accadimento dell'evento;

M = magnitudo legata al verificarsi dell'evento stesso.

È importante osservare come questo modello basato su un semplice prodotto consenta una stima diretta dei danni attesi rispetto ad un evento ipotizzato, senza però esplicitare le cause, né la dinamica. Esso costituisce quindi un fondamento per poter confrontare rischi derivanti da eventi diversi, tuttavia non è sufficiente a descrivere compiutamente il reale rischio che caratterizza un determinato sistema (Helm 1996). Intuitivamente infatti, si potrebbe pensare che due rischi caratterizzati dallo stesso valore numerico **R** abbiano la stessa "importanza", spesso non è così però: eventi con una bassa probabilità di accadimento e grande magnitudo delle conseguenze sono molto diversi da eventi con elevata probabilità di accadimento ma conseguenze relativamente basse in termini di magnitudo

2.3. Il modello UNESCO

(Sayers et al. 2003). È pertanto uno strumento di valutazione del rischio che si presta ad essere utilizzato in modo efficace ad esempio in ambito assicurativo o statistico, ma è scarsamente utilizzabile come strumento di gestione del rischio stesso. Le variabili sulle quali è possibile agire per ridurre il rischio, infatti, sono solo due: probabilità e magnitudo. Se l'obiettivo non è solo quantificare il rischio ma anche la sua gestione è utile fare riferimento a un modello che consenta di esplicitare tutti gli elementi che concorrono a definirlo.

2.3 Il modello UNESCO

Secondo il modello UNESCO il rischio è una funzione di tre elementi:

- La pericolosità o *hazard*, intesa come la probabilità di accadimento di un dato evento o fenomeno potenzialmente dannoso, in un determinato intervallo di tempo, con riferimento a una determinata area.
- Gli elementi a rischio, intesi come tutto ciò che ha un valore, ad esempio le persone, edifici, attività economiche, beni aventi valore economico, storico, artistico o culturale.
- La vulnerabilità, che può essere definita come la predisposizione a subire danni. In altri termini può essere definita come il grado di perdita che un set di elementi a rischio riporta a seguito del verificarsi di un evento avverso di una data magnitudo.

La definizione di rischio considerata può essere formalizzata con la seguente relazione:

$$\mathbf{R} = \mathbf{H} * \mathbf{E} * \mathbf{V}$$

Dove:

$\mathbf{R}$ = rischio;

$\mathbf{H}$ = pericolosità o *hazard*;

$\mathbf{E}$ = elementi a rischio;

$\mathbf{V}$ = vulnerabilità.

Questo modello di rischi fu proposto per la prima volta in letteratura dallo UNDRO (1979) e da Fournier d'Albe (1982) per la gestione del rischio e la valutazione della vulnerabilità da eventi naturali, tuttavia dal momento che questo modello consente di considerare in modo esplicito sia le cause che le dinamiche che portano alla generazione di un danno ha trovato impiego anche in ambito fire safety (S. Grimaz e Pini 1999) ed è alla base del metodo P.Ra.G.Em. (Procedure Ragionate per la Gestione delle Emergenze) sviluppato allo scopo di dotare i vigili del fuoco del CNVVF di strumenti operativi per affrontare efficacemente emergenze in caso di incidenti coinvolgenti GPL (L. Grimaz 1997).

2. Modelli concettuali di riferimento per la gestione delle emergenze

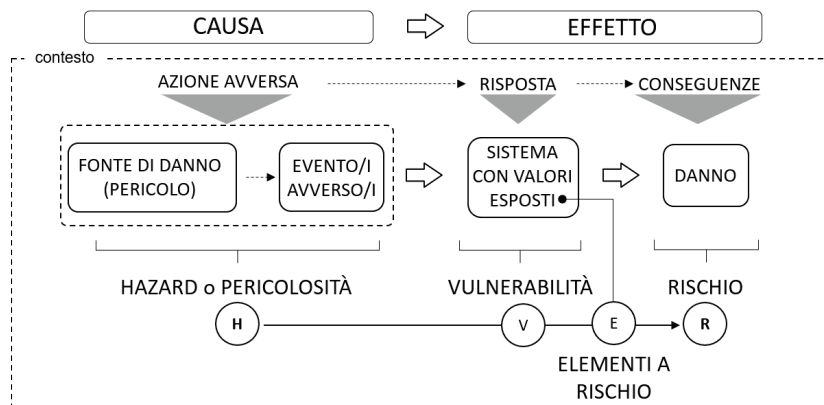


Figura 2.1: Integrazione tra lo schema logico causa-effetto ed il modello UNESCO.

2.4 Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno

S. Grimaz e Pini (1999) e successivamente S. Grimaz, Dattilo e Maiolo (2014) adottando come riferimento il modello UNESCO e integrandolo in una logica *causa - effetto*, hanno sviluppato un modello concettuale interpretativo chiamato *Processo Fondamentale di Generazione del Danno* (PFGD).

Il punto di partenza di questo modello interpretativo è lo schema logico causa-effetto. Questo viene declinato in chiave *azione avversa-risposta-conseguenza* dove è stato introdotto l'elemento "risposta", ossia il "filtro" attraverso il quale gli effetti di una azione avversa vengono modificati in senso positivo o negativo, per generare le conseguenze sul sistema investito. Tale schema, illustrato in figura 2.1, è inserito all'interno di un contesto, inteso come l'insieme di tutti i fattori che non possono essere controllati ma che possono contribuire a determinare l'esito finale del processo (condizioni al contorno).

Lo schema concettuale appena illustrato può essere ulteriormente sviluppato per mettere in luce gli elementi che contribuiscono a descrivere la dinamica del processo di generazione del danno secondo lo schema in figura 2.2. Secondo tale schema, una sorgente (fonte di danno), caratterizzata da un certo grado di pericolosità, se predisposta e attivata genera un evento avverso che dà luogo a degli effetti avversi. Questi si propagano e, dopo l'impatto con il sistema contenente valori esposti (il bersaglio), determinano un danno. Gli elementi che costituiscono il PFGD sono descritti in tabella 2.1.

Questo modello consente di considerare in modo esplicito gli elementi che concorrono a determinare un danno a partire da una sorgente di pericolo e, vista la sua generalità, può essere applicato a qualsiasi sistema in cui sia necessario gestire i rischi. È interessante notare come la parte del Processo Fondamentale di Generazione del Danno che ha inizio con l'evento avverso sia una rappresentazione del modello sorgente-bersaglio proposto da Barry (2002) nell'*Handbook of Fire Protection Engineering*.

Si osserva inoltre che rispetto al modello classico di valutazione del rischio, il quale richiede un approccio rigorosamente probabilistico, e quindi quantitativo, il modello del PFGD consente di effettuare valutazioni in modo qualitativo per

2.4. Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno

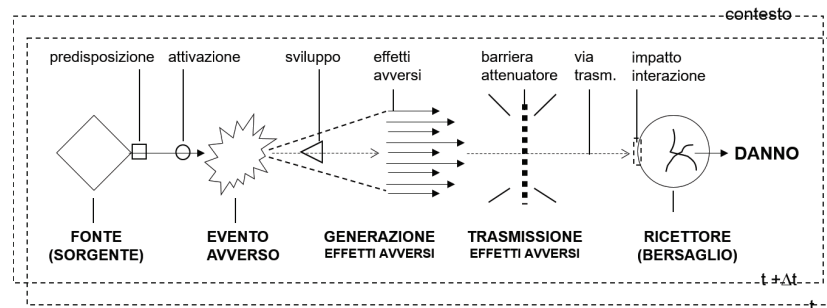


Figura 2.2: Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno.

scenari o avvalendosi dell'apporto di giudizi di esperti senza ricorrere ad algoritmi di calcolo. Per questi motivi il modello del PFGD (S. Grimaz 2000; S. Grimaz e Pini 1999) risulta particolarmente adatto ad essere utilizzato nello sviluppo di metodologie e di strumenti di supporto alle decisioni per la gestione delle emergenze e della sicurezza.

2.4.1 Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno e la gestione delle emergenze e della sicurezza in caso di incendio

La gestione delle emergenze in caso di incendio può essere schematizzata come un problema di gestione dell'interazione tra effetti avversi generati dall'incendio ed i valori esposti considerati, pertanto essa si focalizza essenzialmente sulla implementazione e sulla gestione di misure protettive.

La gestione della sicurezza in caso di incendio invece, rappresenta non solo un problema di gestione dell'interazione tra gli effetti avversi dell'incendio ed i valori esposti, ma anche e soprattutto, un problema di gestione delle condizioni che possono portare al verificarsi di un'emergenza. Volendo quindi gestire la sicurezza in caso di incendio, si devono gestire le potenziali cause di un evento avverso oltre che le potenziali conseguenze. L'ottica di intervento è quindi sia preventiva che protettiva.

Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno è uno strumento privilegiato di analisi per la definizione di strumenti di supporto alla gestione della sicurezza e delle emergenze in caso di incendio. L'individuazione e la caratterizzazione degli elementi e delle circostanze che possono portare al verificarsi di un evento avverso, che ne possono influenzare lo sviluppo e la conseguente generazione di effetti avversi e le modalità di trasmissione e impatto con i bersagli permette di definire concettualmente il problema della gestione della sicurezza in caso di incendio.

A partire dalle componenti essenziali del Processo Fondamentale di Generazione del Danno è possibile distinguere undici tipologie di azioni o contromisure elementari per la gestione della sicurezza in caso di incendio (figura 2.3):

- limitazione della quantità o riduzione della pericolosità intrinseca delle sostanze e materiali combustibili o infiammabili;
- riduzione delle condizioni predisponenti;

2. Modelli concettuali di riferimento per la gestione delle emergenze

Tabella 2.1: Descrizione degli elementi che costituiscono il Processo Fondamentale di Generazione del Danno.

Elemento del PFGD	Descrizione
Sorgente	Qualsiasi oggetto, elemento o sostanza che, potenzialmente, è in grado di generare effetti avversi.
Predisposizione	Caratteristiche che rendono la sorgente più o meno incline a generare un evento avverso.
Attivazione	L'attivazione è qualsiasi azione, circostanza o forma di energia che permette di innescare l'evento.
Evento avverso	L'evento è un accadimento che ha causato danno o ne ha la potenzialità.
Sviluppo	Lo sviluppo rappresenta l'insieme dei fattori che amplificano o riducono l'evento.
Agenti o effetti avversi	Gli agenti o effetti avversi generatisi a partire dall'evento. È importante notare come le avversità siano in relazione con le caratteristiche degli elementi esposti.
Barriera	Le barriere sono gli interventi di protezione volti a contenere, attenuare o evitare l'interazione tra gli agenti avversi e gli elementi esposti.
Vie di propagazione	Le vie di propagazione degli agenti avversi rappresentano le modalità con cui gli effetti generati dall'evento avverso impattano sui bersagli, ossia la modalità di interazione tra effetti avversi ed elementi esposti.
Bersaglio	Il bersaglio rappresenta gli elementi caratterizzati da un valore esposti a rischio (elementi esposti).

2.4. Il Processo Fondamentale di Generazione del Danno

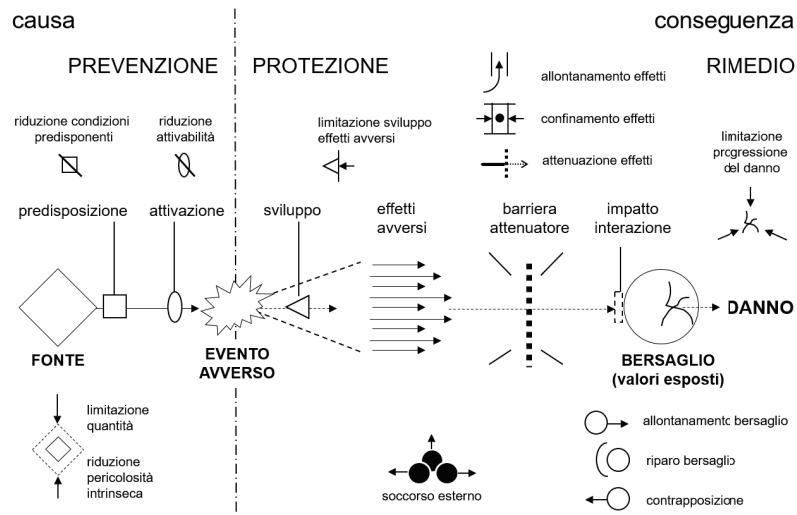


Figura 2.3: Contromisure elementari e il loro ruolo funzionale nel Processo Fondamentale di Generazione del Danno.

- riduzione delle occasioni e condizioni di attivabilità dell'evento;
- controllo/contrapposizione allo sviluppo dell'evento avverso con conseguente limitazione della produzione degli effetti avversi;
- deviazione, confinamento, attenuazione degli effetti avversi prodotti dall'evento con misure di protezione collettiva;
- protezione dei bersagli dagli effetti avversi con misure di protezione individuale;
- allontanamento del bersaglio dall'area di influenza degli effetti avversi;
- azioni di auto-protezione dei bersagli dagli effetti avversi;
- azioni di contrapposizione all'evento avverso e agli effetti da parte dei bersagli;
- azioni di supporto esterno di soccorso;
- limitazione della progressione del danno a seguito dell'interazione/impatto agente-bersaglio.

Le prime tre azioni, agendo a monte dell'evento, sono di tipo preventivo mentre le rimanenti sono di tipo protettivo intervenendo a valle di questo, tuttavia grazie al Processo Fondamentale di Generazione del Danno, le contromisure, intese come l'insieme di azioni, provvedimenti o apprestamenti finalizzati a interrompere il processo che può portare al danneggiamento dei bersagli, sono classificate in funzione della specifica fase del processo in cui intervengono.

Questo modello interpretativo, vista la sua generalità, può essere applicato sistematicamente considerando diversi bersagli (ad esempio persone, assets, strutture...), in questo modo è possibile focalizzare l'attenzione separatamente

2. Modelli concettuali di riferimento per la gestione delle emergenze

sul processo che porta al danneggiamento di ogni specifico bersaglio e sulle specifiche contromisure da attuare.

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 3

INSPECT

INSPECT (*Inspection and Study of Potential Emergency-scenarios for Counter-measure Tailoring*) è un metodo semplificato pensato per essere uno strumento valutativo rapido a partire dagli elementi raccolti durante una ispezione visiva dell'attività considerata. INSPECT è finalizzato alla valutazione della performance di sicurezza in caso di incendio e alla definizione delle misure di sicurezza antincendio da adottare in relazione alle effettive caratteristiche riscontrate che vengono descritte attraverso scenari emergenziali potenziali.

Da un punto di vista gestionale infatti, risulta strategico analizzare i vari ambienti lavorativi o di vita per individuarne a priori i punti di forza e di debolezza e per quanto possibile, caratterizzare gli scenari emergenziali che si potrebbero generare, conoscerne l'evoluzione nel tempo e le criticità che si possono sviluppare. Una corretta definizione delle contromisure da adottare richiede, infatti, una preventiva caratterizzazione degli scenari ai quali si può essere chiamati a rispondere, in modo da poter definire preventivamente azioni e misure che è opportuno porre in atto per salvaguardare i valori esposti, in primis la vita umana.

Il metodo INSPECT è stato sviluppato per fornire uno strumento di valutazione dell'esistente in grado di fornire elementi di supporto alle decisioni sia in fase preventiva che in fase di gestione dell'emergenza in caso di incendio.

Il metodo ha i suoi fondamenti nel modello di valutazione del rischio introdotto dall'UNESCO, e nel modello interpretativo del processo fondamentale di generazione del danno (S. Grimaz, Dattilo e Maiolo 2014), oltre che sui principi della fire safety engineering definiti nell'SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (SFPE 2002).

Il metodo INSPECT è strutturato in due parti principali: nella prima parte, chiamata *caratterizzazione*, a partire da una ispezione dell'attività in esame, vengono individuate le potenziali situazioni avverse, in termini di incendi o esplosioni, che possono caratterizzare l'attività. Una volta identificate le avversità potenziali, nella seconda parte viene valutata la performance di sicurezza dell'attività. Questa valutazione avviene attraverso specifici test di vulnerabilità che mirano a verificare la prestazione dell'attività rispetto ai 5 obiettivi definiti nella Direttiva 89/106/EEC (1989) per il requisito essenziale di sicurezza numero 2: *Sicurezza in caso di incendio*.

Questa impostazione è coerente con l'impostazione metodologica introdotta dalle normative europee nei settori della sicurezza e prevenzione ed in particolare

3.1. I concetti alla base

dalla Direttiva quadro 89/391/EEC (1989), la quale prevede che tutte le azioni volte a migliorare la sicurezza e salute sul luogo di lavoro debbano discendere da una preliminare valutazione del rischio.

Il metodo INSPECT è stato proposto in una sua prima versione da S. Grimaz, Dattilo e Maiolo (2014) ed è stato adottato dal Ministero dell'Interno - Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco per la stesura di norme di prevenzione incendi relative rispettivamente alle strutture turistico-ricettive all'aria aperta, DM 28 febbraio 2014 (2014) e alle attività di demolizioni di veicoli, DM 1 luglio 2014 (2014).

Entrambe le applicazioni fanno riferimento ad attività all'aperto in cui, a differenza degli incendi in ambienti confinati, non si presenta il problema delle interazioni tra gli effetti dell'incendio e l'ambiente confinato in cui si sviluppa.

Per estendere l'applicabilità del metodo anche ad attività in ambienti confinati, in questo lavoro il metodo è stato ulteriormente sviluppato, sia dal punto di vista concettuale, sia dal punto di vista degli strumenti operativi necessari per renderlo applicabile.

In questo capitolo verrà presentata la logica alla base del metodo, mentre gli strumenti operativi verranno presentati nelle successive parti II e III.

3.1 I concetti alla base

Il metodo INSPECT (Inspection and Study of Potential Emergency-scenarios for Countermeasure Tailoring) nasce dalla considerazione che le contromisure antincendio necessarie e più efficaci sono quelle che consentono di far fronte alla specifica situazione emergenziale che si può generare in una data attività. In particolare, l'idea è quella di identificare le contromisure a partire da una categorizzazione delle situazioni emergenziali. Questa categorizzazione viene effettuata attraverso l'introduzione di scenari emergenziali.

Nel metodo INSPECT le contromisure sono definite come le azioni, provvedimenti o apprestamenti finalizzati a governare e interrompere il processo che può portare al danneggiamento dei bersagli. Le contromisure possono essere di tipo preventivo, ossia rivolte ad agire sulle cause generatrici dello situazione emergenziale, oppure protettive ossia volte a contenere le conseguenze che lo situazione emergenziale può determinare, secondo lo schema in figura 3.1.

3.1.1 Gli scenari emergenziali

Una delle principali novità introdotte dal metodo INSPECT è il concetto di scenario emergenziale come elemento cardine per la gestione delle emergenze e della sicurezza in caso di incendio.

Gli scenari emergenziali consentono di descrivere la possibile emergenza che si deve fronteggiare prendendo in considerazione solo gli elementi significativi che caratterizzano la realtà ai fini dell'individuazione delle soluzioni da attuare per la gestione del problema. In pratica attraverso gli scenari emergenziali si vuole dare risposta alle seguenti domande (figura 3.1):

- Qual è lo scenario incidentale che potrebbe manifestarsi?
- Che livello di interdipendenza esiste con il contesto esterno?

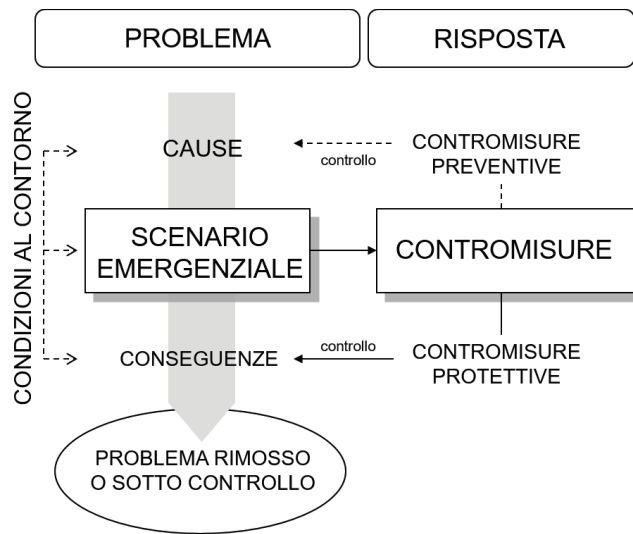


Figura 3.1: Schema logico alla base del metodo INSPECT.

- Che limiti o difficoltà esistono nel poter essere supportati dai soccorsi esterni per fronteggiare lo scenario?

La costruzione degli scenari emergenziali viene effettuata con riferimento alla definizione di rischio elaborata dall'UNESCO ed al modello concettuale del Processo Fondamentale di Generazione del Danno. In particolare, vengono presi in considerazione tre elementi che possono caratterizzare una situazione di emergenza che consentono di dare risposta alle domande precedentemente formulate (figura 3.3):

- gli *scenari incidentali*, associati alla potenziale interazione tra gli eventi avversi e l'esposizione di persone o beni;
- l'*interdipendenza*, legata al grado di dipendenza tra l'attività in esame ed il contesto esterno in cui è inserita;
- la *vulnerabilità funzionale*, associata alle specifiche caratteristiche del sito in relazione alla possibilità e facilità di ricevere supporto da squadre di soccorso esterne rispetto all'attività.

Anche la descrizione delle avversità e dell'esposizione avviene attraverso l'impiego di scenari precodificati. Si parla rispettivamente di *scenari di avversità potenziali*, i quali descrivono in modo precodificato la peggiore situazione di avversità derivante dall'attivazione di eventi avversi che può caratterizzare una cella e di *scenari di esposizione*, che descrivono la distribuzione e la natura dei bersagli che possono interagire con gli effetti avversi.

Data la grande varietà di situazioni emergenziali che si possono verificare, grazie all'impiego degli scenari emergenziali, queste possono essere ricondotte ad un numero finito di casi da utilizzare come riferimento per la gestione dell'emergenza, o in un'ottica più ampia, della sicurezza in caso di incendio. Ciascuno scenario infatti, può essere rappresentativo di molteplici situazioni reali,

3.1. I concetti alla base

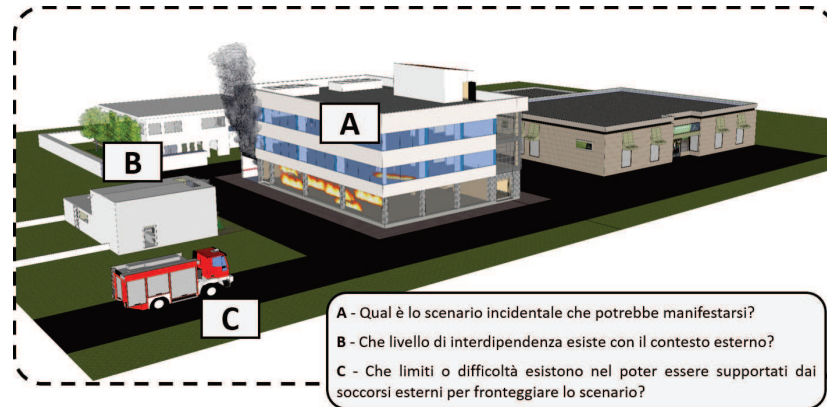


Figura 3.2: Elementi di una situazione di emergenza descritti attraverso gli scenario emergenziali.

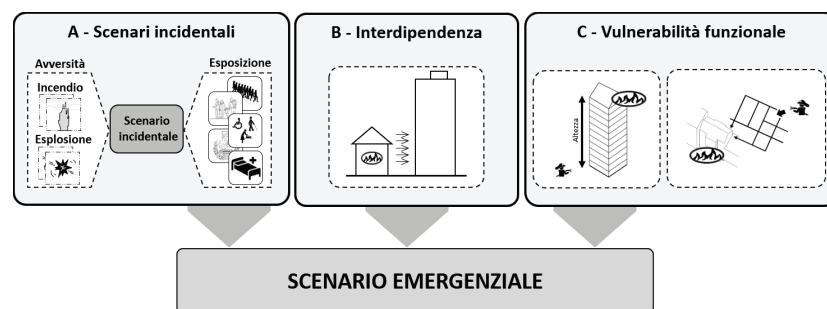


Figura 3.3: Elementi caratteristici di uno scenario emergenziale.

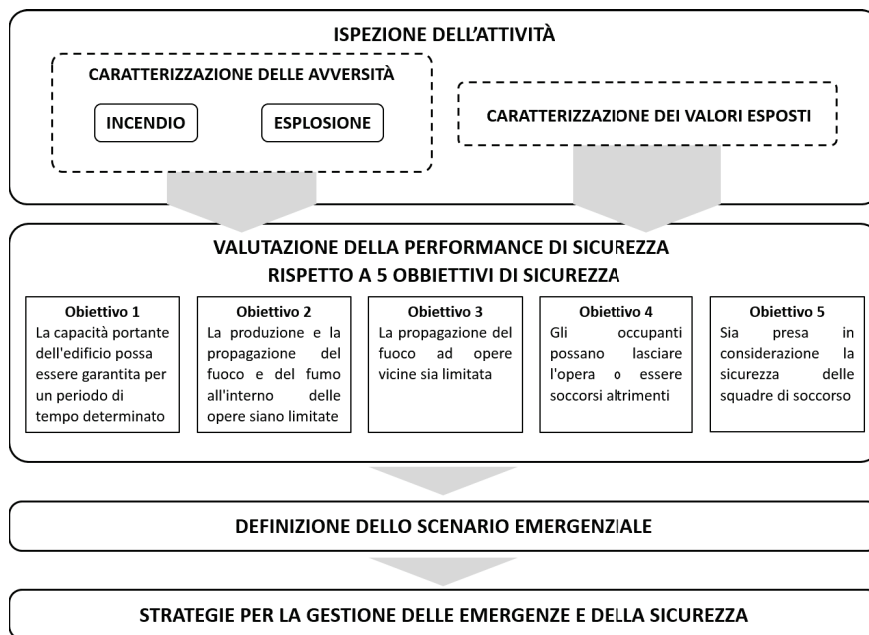


Figura 3.4: Schema del metodo INSPECT.

caratterizzate dalle stesse caratteristiche sostanziali, che si può essere chiamati ad affrontare.

Pur non descrivendo la realtà nella sua interezza e complessità, gli scenari emergenziali consentono di fare valutazioni semplificate e immediate, focalizzando l'attenzione sui soli elementi essenziali. La definizione dello scenario infatti, avviene combinando gli elementi significativi che caratterizzano la realtà emergenziale ai fini dell'individuazione delle soluzioni da attuare per la gestione dell'emergenza. È quindi possibile ricondurre a un numero limitato di casi pre-codificati l'universo di situazioni che possono verificarsi nella realtà.

Uno scenario emergenziale consente di descrivere in modo pre-codificato gli elementi connotativi di una situazione emergenziale. Questo favorisce la comunicazione e la comprensione della situazione da affrontare, delle specifiche criticità che la caratterizzano, degli obiettivi da raggiungere, inoltre fornisce un supporto nella individuazione delle risposte da attuare.

3.2 La struttura del metodo

Il processo di analisi e valutazione proposto nel metodo INSPECT segue un percorso ben definito come riportato in figura 3.4.

3.2.1 Ispezione dell'attività e caratterizzazione degli scenari incidentali

Nella prima fase attraverso una ispezione visiva rapida vengono raccolte le informazioni sostanziali ai fini dell'analisi e della caratterizzazione dell'attività. L'attività viene innanzitutto suddivisa in unità funzionali, comparti e celle come

3.2. La struttura del metodo

Tabella 3.1: Descrizione degli elementi in cui viene suddivisa una generica attività.

Elemento	Definizione
Unità funzionale	Insieme delle unità volumetriche e delle aree all'aperto nel quale vi è presenza di una o più attività funzionalmente interrelate, comprese le relative pertinenze.
Unità volumetrica	Volume edilizio unitario delimitato completamente o parzialmente da partizioni edilizie o elementi fisici di separazione.
Comparto	Zona costituita da un insieme di celle che si ipotizzano unitarie sotto il profilo delle condizioni operative e di rischio.
Cella	Ambiente delimitato da barriere fisiche più o meno permeabili agli effetti dell'evento e dotato di uno o più varchi.
Ambiente	Spazio interno ad una unità volumetrica.

definite in Tabella 3.1, secondo una logica mutuata dal metodo GRIS.U (S. Grimaz e Pini 1999).

Le celle rappresentano l'unità di analisi del metodo INSPECT. Per ogni cella vengono raccolte le informazioni che consentiranno la successiva definizione degli scenari incidentali: da un lato quindi, si dovranno raccogliere dati relativi al tipo e alla quantità di materiale combustibile e altro materiale pericoloso presente. Si devono considerare anche tutte le caratteristiche che concorrono a determinare la predisposizione a causare determinati eventi avversi (predisposizione del materiale a essere coinvolto in un incendio, disposizione relativa del materiale e disposizione all'interno della cella, modalità di stoccaggio e utilizzo), dall'altro devono essere valutati gli scenari di esposizione.

La definizione degli scenari di avversità potenziale e dei criteri per la loro definizione e individuazione sono stati uno degli obiettivi di questa tesi e verranno dettagliati nel seguito.

L'identificazione degli scenari di avversità potenziale e degli scenari di esposizione consente di definire lo scenario incidentale che caratterizza ogni cella dell'attività, questi sono poi classificati in funzione delle criticità intrinseca e della gravosità delle misure di salvaguardia. Nel metodo INSPECT sia gli scenari di avversità potenziale, sia gli scenari di esposizione vengono rappresentati attraverso pittogrammi funzionali alla creazione di mappe di pericolosità e di rischio che coprono l'attività esaminata, favorendo una rapida visualizzazione delle zone critiche che la caratterizzano.

3.2.2 Valutazione della performance dell'attività rispetto agli obiettivi di sicurezza

Nella seconda fase, una volta definite le avversità potenziali, viene valutata la performance dell'attività o dell'edificio rispetto a 5 obiettivi definiti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989) per il requisito essenziale di sicurezza numero 2: *Sicurezza in caso di incendio*.

La Direttiva 89/106/EEC (1989) definisce i requisiti essenziali di sicurezza che i prodotti da costruzione devono garantire per poter essere impiegati per la realizzazione di opere da costruzione, o in parti di esse, all'interno dell'Unione

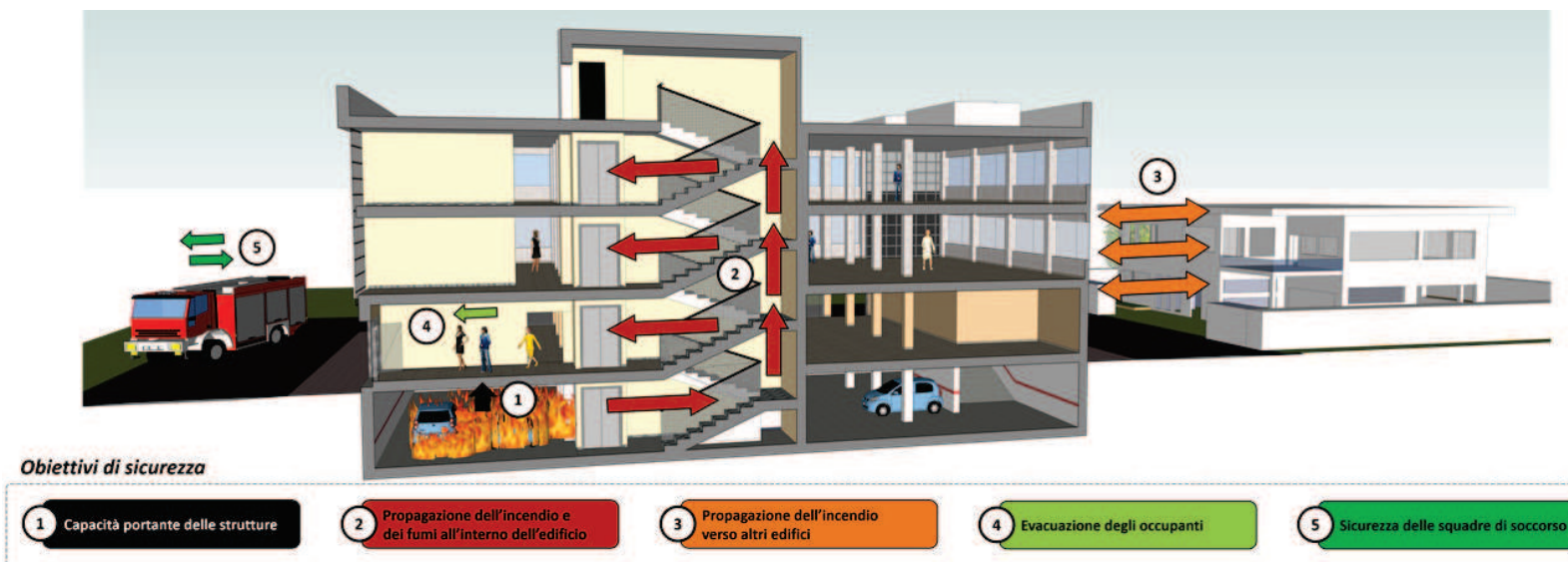


Figura 3.5: Requisito essenziale di sicurezza numero 2. I cinque obiettivi posti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989) integrati nel metodo INSPECT per la verifica della performance di sicurezza di una attività.

3.2. La struttura del metodo

Europea. Per lo specifico requisito essenziale sicurezza in caso di incendio, gli obiettivi che le opere devono essere concepite e costruite in modo che:

1. la capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;
2. la produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere siano limitate;
3. la propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata;
4. gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti;
5. sia presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso.

Assumendo come riferimento la definizione di vulnerabilità data nel modello UNESCO (Fournier d'Albe 1982; UNDRO 1979), nel quale questa rappresenta la predisposizione a subire danni a seguito del verificarsi di un evento avverso, nel metodo INSPECT le vulnerabilità dell'attività vengono valutate al fine di definirne la prestazione o performance di sicurezza rispetto ai cinque obiettivi di sicurezza.

L'analisi delle vulnerabilità avviene attraverso specifici test di vulnerabilità che hanno lo scopo di porre in evidenza la capacità del sistema di far fronte alle richieste di prestazione poste dagli scenari incidentali rispetto al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza. Questo approccio consente quindi di identificare i punti di debolezza dell'attività. Tanti più punti di debolezza presenta il sistema, tanto maggiore la sua vulnerabilità e di conseguenza tanto peggiore sarà la sua performance di sicurezza.

3.2.3 Definizione dello scenario emergenziale

Gli elementi raccolti durante la fase di ispezione e caratterizzazione dell'attività e la successiva valutazione della performance rispetto agli obiettivi di sicurezza fornisce gli elementi necessari alla definizione dello scenario emergenziale.

Scenario incidentale

La caratterizzazione dell'attività attraverso l'individuazione degli scenari di avversità potenziale e dei valori esposti consente di definire gli scenari incidentali che possono caratterizzare l'attività. In relazione al livello di avversità e alla vulnerabilità dei bersagli, gli scenari incidentali sono caratterizzati da diversi livelli di criticità.

Interdipendenza

L'esito dei test di vulnerabilità oltre a porre in evidenza le eventuali criticità che caratterizzano l'attività rispetto ai cinque obiettivi di sicurezza, consentono anche di identificare il secondo elemento che caratterizza uno scenario emergenziale: l'interdipendenza.

In INSPECT un'attività si considera non interdipendente (o isolata) se tutto il suo perimetro è separato dal contesto con elementi separanti di caratteristiche idonee. Viceversa, l'assenza di elementi di separazione perimetrale, anche

in una sola porzione del perimetro, porta a considerare l'insediamento come interdipendente con il contesto.

Nel metodo INSPECT per elemento separante si intende un elemento fisico, un dispositivo, o una distanza le cui proprietà dimensionali, meccaniche e/o chimico-fisiche sono tali da evitare o impedire la propagazione dell'incendio tra le due parti da esso separate.

Per individuare l'eventuale presenza di interdipendenza dell'attività in esame con l'esterno è stato sviluppato un test di vulnerabilità specifico che assume come riferimento l'obiettivo 3 per il requisito di sicurezza in caso di incendio: "*propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata*". Questo test vuole determinare se vi può essere propagazione tra due edifici per effetto del flusso termico radiativo emesso dall'edificio sorgente. Gli elementi che vengono considerati sono le caratteristiche dell'edificio sorgente in termini di superfici non protette (che fungono da radiatore), le caratteristiche di avversità dell'incendio in termini di temperature che possono essere raggiunte, la distanza rispetto ad edifici o altri elementi e il flusso termico necessario per l'innescio di un incendio in relazione alla tipologia di materiali caratteristici dell'edificio bersaglio.

La presenza di interdipendenza pone in essere la necessità di attuare opportune misure di coordinamento con i soggetti o le attività esterne interdipendenti interessate.

Vulnerabilità funzionale

Agli aspetti precedentemente descritti il metodo INSPECT integra la valutazione della vulnerabilità funzionale dell'attività. Questa avviene con riferimento alle caratteristiche di ubicazione e lay-out dell'attività, le quali incidono sulla raggiungibilità e accessibilità da parte di squadre di soccorso esterne. La caratterizzazione viene effettuata valutando i seguenti fattori:

- disponibilità dell'assistenza da parte di soccorritori esterni in termini di raggiungibilità e di accessibilità all'insediamento;
- presenza di lay-out favorevole alla praticabilità dell'intervento;
- estensione massima dei comparti;
- affollamento massimo previsto.

3.2.4 Strategie per la rimozione degli scenari di avversità

Il metodo INSPECT propone per ciascuno scenario di avversità potenziale un insieme di strategie che hanno lo scopo di fornire supporto alle decisioni in merito alla scelta delle azioni da intraprendere per la prevenzione o la gestione delle emergenze.

Le strategie sono state sviluppate utilizzando come riferimento il Processo Fondamentale di Generazione del Danno e sono rivolte a impedire il generarsi dello scenario, oppure a modificare lo scenario in un altro caratterizzato da livelli inferiori di avversità, o ancora a definire le condizioni necessarie per gestire in modo adeguato la risposta all'evento qualora questo abbia comunque a verificarsi. Il metodo INSPECT individua undici tipologie di azioni o contromisure elementari per la gestione della sicurezza in caso di incendio, come definite nel Paragrafo 2.4.1.

3.2. La struttura del metodo

Tabella 3.2: Classificazione delle contromisure in funzione della gravità delle conseguenze associate ad un potenziale mancato funzionamento.

Categoria	Descrizione
I	Il mancato funzionamento del sistema si limita a determinare difficoltà operative in termini di dilatazione delle tempistiche di intervento ma non aggravano la situazione in termini di avversità dell'evento.
II	Il mancato funzionamento del sistema determina un consistente aggravio dello scenario emergenziale sia in termini di avversità e quindi di potenziali conseguenze sui bersagli esposti, sia in termini di complessità dell'intervento riparatore alternativo.

Nel quadro di INSPECT è stata introdotta una classificazione delle contromisure in relazione al fatto che queste siano attuate mediante sistemi automatici o sistemi che richiedono operazioni di manutenzione per garantirne la funzionalità. Questa classificazione è effettuata in funzione della gravità delle conseguenze associate ad un potenziale mancato funzionamento dei sistemi (Tabella 3.2) e quindi fornire ulteriori elementi per il supporto alle decisioni in merito al tipo di contromisure da adottare.

Le contromisure possono essere ulteriormente suddivise nei seguenti gruppi in base al loro ruolo funzionale secondo lo schema in figura 3.6:

- misure organizzative generali: organizzazione, coordinamento, preparazione, manutenzione;
- precauzioni: misure che agiscono su sorgente, predisposizione e attivazione;
- misure di allontanamento: vie di esodo, facilitatori d'esodo;
- misure per la comunicazione: punti di riferimento, mezzi di comunicazione, sistemi di allarme;
- misure di protezione: riparo dei bersagli; deviazione, attenuazione degli effetti avversi;
- misure di contrasto dell'evento: dotazioni di base, spegnimento, soppressione.

Considerazioni

INSPECT rappresenta un nuovo approccio basato sulla categorizzazione degli scenari emergenziali che vengono valutati a partire da una ispezione dell'attività. Il concetto di scenari di emergenza è utile per finalità di gestione della sicurezza e delle emergenze. Attraverso le strategie per la riduzione delle avversità i datori di lavoro possono identificare le contromisure su misura dello scenario emergenziale specifico. Per queste ragioni il metodo è stato apprezzato sia dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco che lo hanno adottato per la stesura di norme di prevenzione incendi relative rispettivamente alle strutture turistico-ricettive all'aria aperta, DM 28 febbraio 2014 (2014) e alle attività di demolizioni di veicoli, DM 1 luglio 2014 (2014) e dalle associazioni imprenditoriali coinvolte in queste attività.

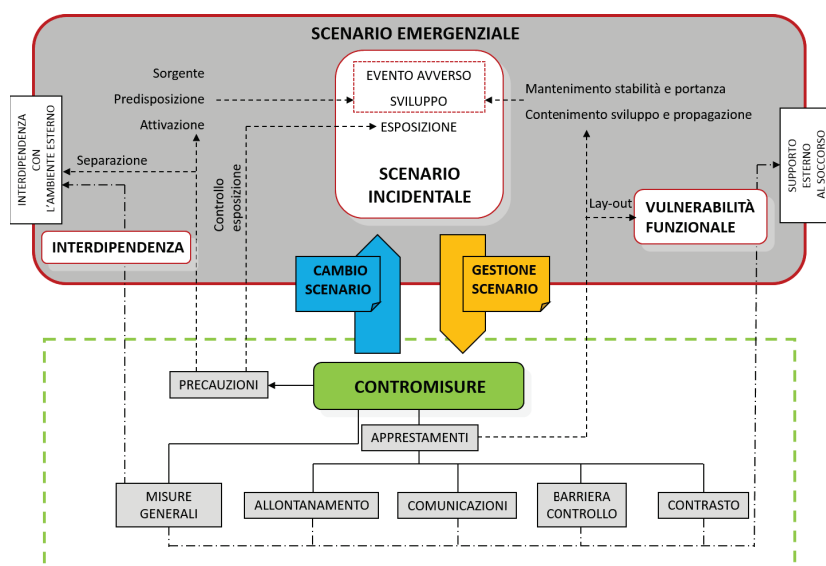


Figura 3.6: Contromisure e loro ruolo funzionale.

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 4

Obbiettivi della ricerca

Nel capitolo 1 sono state presentate le principali problematiche che possono caratterizzare un'emergenza in caso di incendio. Da quanto esposto, emerge come la gestione di queste emergenze possa presentare difficoltà operative e organizzative soprattutto in mancanza di una preventiva conoscenza delle potenziali situazioni da affrontare.

La capacità di gestione di un'emergenza, intesa come l'insieme dei comportamenti e delle azioni di risposta da adottare è pertanto strettamente connessa alla conoscenza dello scenario emergenziale da affrontare e della sua possibile evoluzione.

Nel capitolo 3 è stato introdotto il metodo INSPECT come strumento di supporto alle decisioni per la gestione delle emergenze in caso di incendio. In INSPECT agli scenari emergenziali individuati attraverso una ispezione dell'attività, vengono associate specifiche contromisure finalizzate alla prevenzione o alla gestione delle situazioni di emergenza.

In figura 4.1 sono evidenziati gli obiettivi del lavoro di ricerca rispetto al metodo INSPECT.

Caratterizzazione delle avversità

Nel quadro di quanto esposto, il primo obiettivo dell'attività di ricerca è stato quello di definire gli scenari di avversità potenziale che possono caratterizzare una generica attività in caso di incendio o di esplosione.

Sono stati individuati i criteri e i metodi che consentono di definire le avversità indotte da un incendio a partire da una rapida ispezione delle attività. A questo scopo, sono stati proposti alcuni modelli concettuali poi tradotti in strumenti ingegneristici che consentono di descrivere in modo semplificato la dinamica degli incendi e consentono di identificare gli scenari e le avversità a partire da una ispezione delle attività ed il riconoscimento di alcuni elementi connotativi, senza ricorrere all'impiego di modelli di simulazione. Gli strumenti ingegneristici proposti sono stati validati attraverso il confronto con i risultati di modelli di simulazione di incendio. Un analogo percorso è stato seguito per definire gli scenari e le avversità indotte in caso di esplosione in ambienti confinati.

Questi aspetti verranno sviluppati nella Parte II.

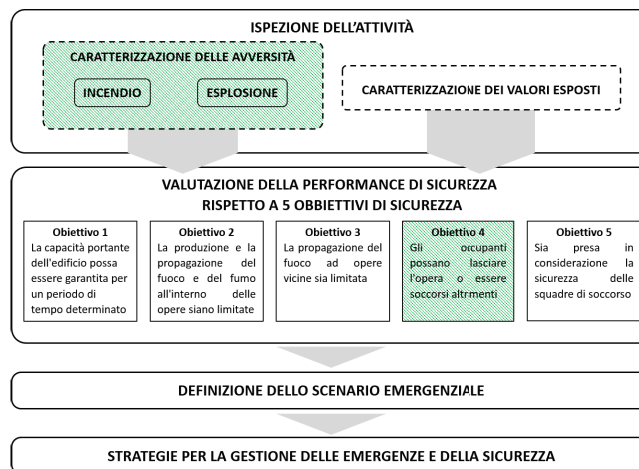


Figura 4.1: Schema del metodo INSPECT e aree su cui si è focalizzata l'attività di ricerca.

Performance di sicurezza

Nel metodo INSPECT vengono valutate le vulnerabilità dell'attività al fine di definirne la prestazione o performance rispetto ai cinque obiettivi di sicurezza introdotti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989). L'analisi delle vulnerabilità avviene attraverso specifici test che hanno lo scopo di porre in evidenza la capacità del sistema di far fronte alle richieste di prestazione poste dagli scenari incidentali rispetto al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza. Vista la complessità del fenomeno incendio e la molteplicità di interazioni tra i suoi effetti e l'ambiente circostante lo sviluppo dei test per valutare le vulnerabilità richiede un approccio fortemente multidisciplinare.

Nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata sull'obiettivo 4 - *"gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti"*.

È stato adottato come riferimento l'analisi della vulnerabilità del sistema d'esodo il metodo PASS (Preliminary Assessment of the egress-System Safety) (S. Grimaz e Tosolini 2013; S. Grimaz, Tosolini e Dolcetti 2010; Tosolini 2013).

In questo lavoro il metodo PASS è stato ulteriormente analizzato e alcuni fattori sono stati verificati rispetto a nuovi dati ottenuti dall'analisi di sperimentazioni effettuate nel LabCUBE_{egress} (S. Grimaz, Dusso et al. 2014; Tosolini, S. Grimaz, Pecile et al. 2012).

I test di vulnerabilità sviluppati a partire da PASS sono stati applicati a un caso studio (il Teatro Verdi di Pordenone).

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i risultati di una prova di evacuazione non preannunciata, organizzata in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, tenutasi presso il Teatro Verdi di Pordenone il 10 febbraio 2015 che ha coinvolto oltre 300 persone. La prova ha inoltre consentito di ottenere interessanti informazioni sulle dinamiche comportamentali e di movimento. I risultati ottenuti verranno illustrati nella Parte III.

Parte II

Gli scenari di avversità potenziale

Capitolo 5

Incendi in ambienti confinati

L'incendio è una combustione non voluta i cui prodotti (calore, fumo, gas di combustione) propagandosi possono interagire o "impattare" con gli elementi esposti (persone, beni) dando luogo ad effetti avversi come descritto nel Capitolo 1.

Nel contesto del metodo INSPECT vi è la necessità di definire i modelli concettuali e gli strumenti operativi che consentano di definire gli scenari di avversità potenziale a partire dai dati raccolti attraverso una ispezione dell'attività.

In questa Parte verranno prima richiamati gli elementi principali che caratterizzano la dinamica di incendio in ambienti confinati necessari per inquadrare e definire il problema, quindi verranno presentati i modelli concettuali introdotti per schematizzare ed affrontare il problema (Capitolo 7) ed infine gli strumenti ingegneristici che consentono di descriverlo in modo semplificato (Capitoli 8 e 9).

5.1 Descrizione qualitativa della dinamica di incendio in ambienti confinati

Lo sviluppo di un incendio in un ambiente confinato, di seguito identificato con il termine di cella, in accordo con la terminologia introdotta in INSPECT, è di per sé un fenomeno molto complesso a causa delle numerose interazioni che si verificano tra il fuoco, i prodotti della combustione e lo spazio all'interno del quale l'incendio si sviluppa.

In generale lo sviluppo di un incendio in uno spazio confinato può essere schematizzato attraverso una successione di quattro fasi: ignizione (*ignition*), sviluppo (*growth*), incendio pienamente sviluppato (*fully developed fire*) e decadimento (*decay*). L'inizio di un incendio coincide con l'ignizione del materiale combustibile presente all'interno dello spazio confinato. A seguito dell'ignizione, il fuoco tende a crescere, propagandosi e coinvolgendo porzioni maggiori del combustibile.

Per effetto della combustione vengono rilasciati nella cella energia sotto forma di calore e prodotti della combustione (fumi e gas tossici). Durante la combustione si forma un flusso di gas caldi (il pennacchio o *plume*) che sale dal fuoco trasportando verso l'alto i prodotti della combustione e incamerando aria fresca, aumentando così il suo volume. Quando il pennacchio incontra il soffitto della stanza, viene deviato e il flusso di gas caldi miscelati con l'aria incamerata

5.1. Descrizione qualitativa della dinamica di incendio in ambienti confinati

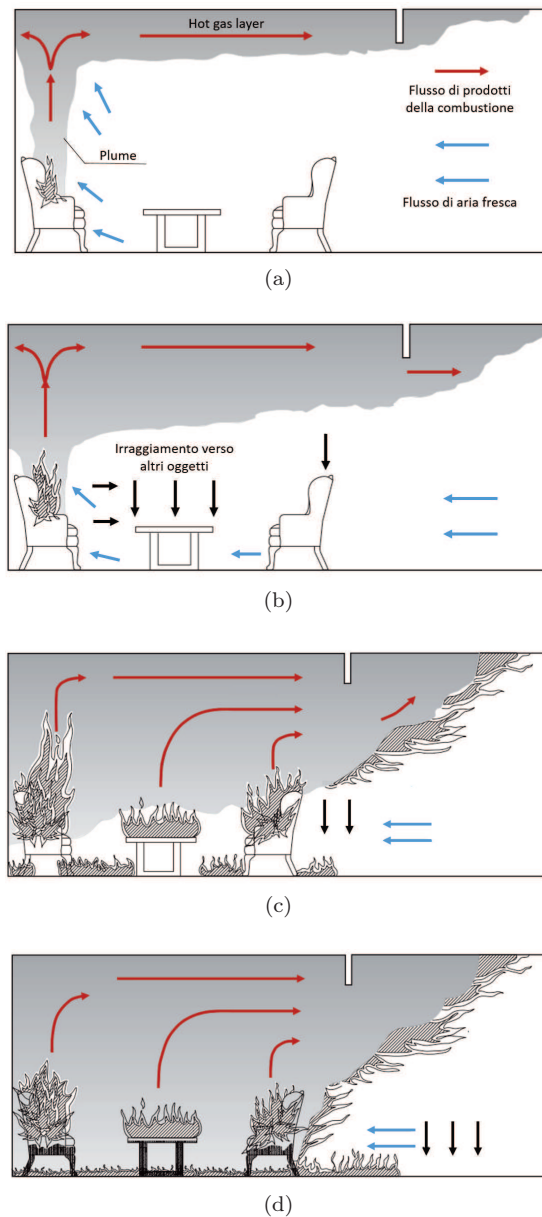


Figura 5.1: Evoluzione di un incendio in uno spazio confinato: (a) ignizione e crescita dell'incendio: formazione del plume e dell'hot gas layer; (b) fase di crescita dell'incendio: irraggiamento verso altri oggetti; (c) flashover; (d) incendio pienamente sviluppato. Immagini tratte da NFPA 921 (2011), modificate.

si propaga orizzontalmente lungo il soffitto, formando il *ceiling jet* o getto a soffitto. Quando il *ceiling jet* raggiunge le pareti laterali della stanza, inizia ad accumularsi sotto il soffitto uno strato di gas caldi carico dei prodotti della combustione (*hot gas layer* o *upper layer*). Numerose osservazioni sperimentali, fin dalla metà degli anni '70, si veda ad esempio Fowkes (1974) e Quintiere,

Steckler e Corley (1984), hanno mostrato come in questa fase la cella in cui si sviluppa l'incendio risulta suddiviso piuttosto nettamente in due zone, quella superiore calda e carica dei gas di combustione e il sottostante strato di aria sostanzialmente pulita e fresca (*lower layer*). Questa fase è schematizzata in Figura 5.1 (a).

Se il fuoco continua a crescere, il plume continua a trasferire energia e prodotti della combustione verso lo strato caldo superiore aumentandone il volume, la temperatura e la concentrazione di gas tossici e fumi. A causa dell'aumento di volume, l'interfaccia tra i due strati tende a scendere verso il pavimento. La velocità con cui avviene la discesa dello strato caldo dipende dalla velocità con cui cresce l'incendio, la quale dipende a sua volta dal tipo di materiale combustibile presente e dalla quantità di ossigeno disponibile (Quintiere 1998).

In queste prime fasi dell'incendio la combustione è di tipo *fuel-controlled*, ossia vi è una sovrabbondanza di ossigeno rispetto al materiale combustibile in fase di vapore disponibile per la combustione.

Le pareti della cella ed altri oggetti presenti al suo interno vengono progressivamente riscaldati per effetto del calore trasmesso sia direttamente dalle fiamme sia dallo strato caldo per conduzione, convezione e irraggiamento. Questo può causare l'innesco del fuoco su altri oggetti e in questo modo vi è un ulteriore apporto di energia all'interno della cella che può causare un rapido aumento della temperatura dello strato di gas caldi, determinando la rapida transizione tra la fase di crescita dell'incendio verso la fase di incendio pienamente sviluppato. In questa fase tutti i materiali presenti all'interno della cella partecipano all'incendio (Figura 5.1 (b)).

Il fenomeno che segna il passaggio dalla fase di crescita a quella di incendio pienamente sviluppato viene identificato con il termine di *flashover*. L'instaurarsi del flashover viene in genere identificato con i seguenti criteri (Peacock et al. 1999; Quintiere 1998) (Figura 5.1 (c)):

- la temperatura dello strato di gas caldi raggiunge i $500^{\circ}\text{C} \div 600^{\circ}\text{C}$;
- il livello di irraggiamento al livello del pavimento raggiunge i 20 kW/m^2 ;
- le fiamme fuoriescono dalle aperture (porte e finestre).

Quando l'incendio raggiunge la fase di pieno sviluppo (Figura 5.1 (d)), le condizioni di combustione passano da *fuel-controlled* a *ventilation-controlled*, ossia controllate dalla ventilazione in quanto la concentrazione di ossigeno presente all'interno della cella non è sufficiente per la combustione di tutti i vapori combustibili presenti e la potenza termica rilasciata all'interno della cella è quindi limitata.

Questa fase dell'incendio può durare fino ad alcune ore e le temperature possono raggiungere valori prossimi ai 1200°C . La fase di decadimento inizia a causa del progressivo consumo del materiale combustibile che segna anche una riduzione del rilascio di energia. Inizia quindi una fase di diminuzione della temperatura. Convenzionalmente la fase di decadimento inizia quando la massa del combustibile presente nella cella è ridotta al $20 \div 30\%$ rispetto a quella inizialmente presente (Drysdale 2011; Karlsson e Quintiere 2000).

Facendo riferimento alla dinamica dell'incendio appena descritta, quando viene raggiunto il flashover e la fase di incendio pienamente sviluppato, le temperature e la produzione di fumi e gas tossici sono tali per cui la sopravvivenza

5.1. Descrizione qualitativa della dinamica di incendio in ambienti confinati

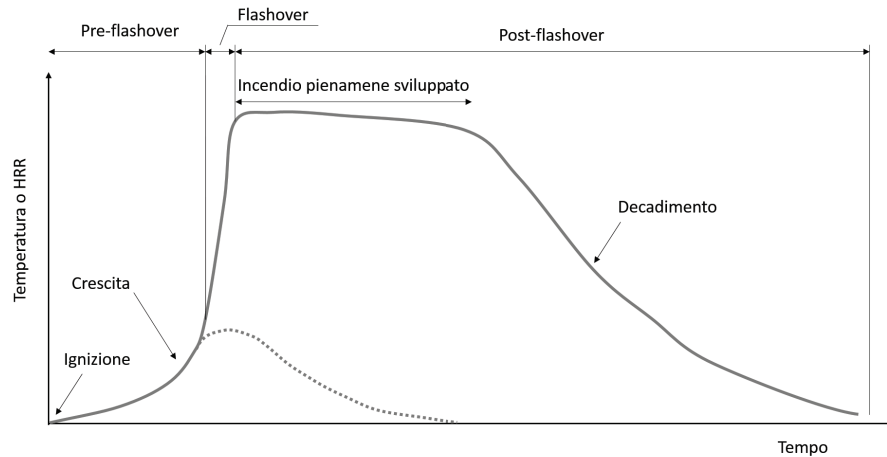


Figura 5.2: Descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio in una cella ossia in un ambiente confinato.

delle persone è compromessa non solo all'interno del locale di origine, ma in tutto l'edificio per effetto della propagazione attraverso porte e altre aperture (Drysdale 2011; Karlsson e Quintiere 2000). Di conseguenza la salvaguardia delle persone deve essere presa in considerazione durante le prime fasi dell'incendio (ignizione e crescita), prima che le condizioni ambientali diventino insostenibili per la vita umana. Quando viene raggiunto il flashover e l'incendio pienamente sviluppato invece la stabilità strutturale è posta in pericolo, va comunque evidenziato che anche in condizioni di pre-flashover, nel caso di fuochi localizzati particolarmente intensi posti in corrispondenza di elementi portanti (Purkiss 2007).

In Figura 5.2 è rappresentata la dinamica di un incendio in termini di evoluzione delle temperature (o alternativamente della potenza termica rilasciata) nel tempo. È interessante osservare come si possano manifestare dinamiche diverse da quella appena descritta e rappresentata dalla curva in linea continua. Infatti, se l'incendio si sviluppa in un locale chiuso, senza aperture che assicurino una costante ventilazione o solo con piccole fessure, l'ossigeno all'interno del locale viene progressivamente consumato dalla combustione fino a scendere al di sotto della concentrazione necessaria per sostenere la combustione e l'incendio può autoestinguersi, senza raggiungere il flashover o la fase di incendio pienamente sviluppato (Quintiere 1998). Questa dinamica è rappresentata in Figura 5.2 dalla curva con linea punteggiata. Va osservato che la dinamica di incendio descritta dalla linea punteggiata può essere rappresentativa anche di uno scenario in cui non vi è materiale combustibile sufficiente a raggiungere il flashover o la quantità di materiale combustibile coinvolto nell'incendio è limitata, per cui l'incendio tende ad esaurirsi senza raggiungere la fase di pieno sviluppo.

5.2 Elementi che influenzano la dinamica di un incendio all'interno di una cella

L'applicazione del processo fondamentale di generazione del danno per l'analisi delle dinamiche di incendio consente di dare una chiave di lettura del problema utile ai fini della identificazione degli elementi da considerare durante l'ispezione dell'attività finalizzata alla sua categorizzazione in un set predefinito di scenari di avversità.

5.2.1 Il combustibile

Secondo lo schema logico del processo fondamentale di generazione del danno, le condizioni necessarie affinché si realizzi l'evento avverso incendio sono tre e devono essere presenti contemporaneamente: è necessario che sia presente una sorgente, che questa sia predisposta e che infine vi sia una attivazione.

La presenza di una sorgente si traduce nella presenza di materiale combustibile. Poiché la reazione di combustione avviene tra vapori combustibili miscelati al comburente (in genere l'ossigeno presente nell'aria) in quantità opportune, entro limiti che definiscono l'intervallo di infiammabilità caratteristico per ogni sostanza combustibile, il concetto di predisposizione si traduce nella propensione dei materiali combustibili presenti all'interno della cella a sviluppare vapori e nel fatto che questi possono miscelarsi con il comburente.

Il tipo di materiale combustibile è quindi uno dei fattori principali che contribuiscono a determinare lo sviluppo del fuoco in una cella. La tipologia di combustibili può essere suddivisa in solidi, liquidi e gas. Come dimostrato in numerosi esperimenti (si veda ad esempio Babrauskas (2016a)) la forma e lo spessore dei combustibili solidi determina diverse dinamiche di sviluppo del fuoco: in generale, a parità di materiale, oggetti spessi provocano una crescita lenta del fuoco ma che può bruciare per tempi lunghi. Viceversa, oggetti sottili o caratterizzati da piccola pezzatura causano uno sviluppo del fuoco più rapido. Similmente un oggetto combustibile caratterizzato da una superficie esposta elevata, generalmente brucia più rapidamente di un combustibile altrimenti equivalente, ma caratterizzato da una piccola superficie esposta. La quantità complessiva di materiale presente, generalmente espressa attraverso il carico d'incendio, non è pertanto l'unico parametro da considerare quando si devono valutare le avversità indotte da un incendio: un elevato carico di incendio pertanto non determina necessariamente una maggiore pericolosità, infatti piccole quantità di materiale ma caratterizzate da una crescita rapida del fuoco possono essere più pericolose quando i valori esposti sono le vite umane (Karlsson e Quintiere 2000).

La predisposizione è pertanto influenzata da fattori propri del materiale combustibile (propensione intrinseca a sviluppare vapori combustibili e quindi partecipare alla combustione) e da elementi più propri invece della sfera gestionale, quali le modalità di conservazione e utilizzo dei materiali stessi come evidenziato in S. Grimaz e Pini (1999) e Hietaniemi e Mikkola (1997).

Infine è necessaria un'energia di attivazione efficace in grado di innalzare la temperatura della miscela combustibile-comburente fino alla temperatura di accensione. Tale energia che rappresenta l'innesco, solitamente viene fornita da un agente esterno attraverso un contatto diretto con una fiamma, una scintilla,

5.2. Elementi che influenzano la dinamica di un incendio all'interno di una cella

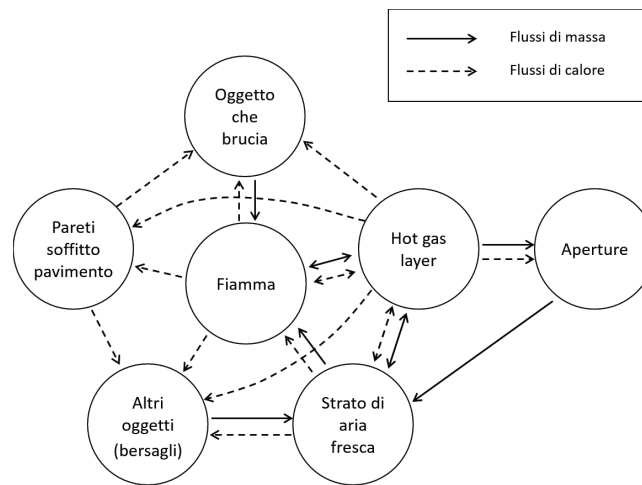


Figura 5.3: Schema delle interazioni che caratterizzano lo sviluppo di un incendio (Immagine tratta da Karlsson e Quintiere (2000), modificata)

oppure indiretto tramite irraggiamento termico. È necessario porre in evidenza che la sorgente di calore deve essere adeguata sia al materiale combustibile, sia alla pezzatura con cui tale materiale è disponibile.

Una volta che l'incendio si è innescato, si instaura un complesso scambio di flussi di massa e di energia tra l'oggetto che brucia e l'ambiente in cui si sviluppa (Figura 5.3) che porta alla propagazione degli agenti avversi (calore, fumi, gas) all'interno della cella e all'esterno di questa, verso altre celle.

La posizione dei materiali combustibili presenti all'interno di questa hanno un effetto marcato sullo sviluppo dell'incendio e sui *pattern* di propagazione. In particolare la distribuzione spaziale dei materiali combustibili, unita alle loro caratteristiche intrinseche e alle modalità di conservazione, determina una predisposizione a favorire determinati schemi di propagazione dell'incendio. In questa prospettiva la distanza relativa e l'orientamento dei materiali combustibili sono elementi di rilevante importanza. La distribuzione all'interno della cella determina in misura considerevole quanto velocemente il fuoco si possa propagare tra i diversi oggetti combustibili per effetto dell'irraggiamento dalle fiamme, o per contatto diretto con queste: materiali impilati uno sull'altro o che si sviluppano prevalentemente in verticale favoriscono una propagazione delle fiamme molto più rapida rispetto a materiali distribuiti orizzontalmente (Drysdales 2011; Karlsson e Quintiere 2000; NFPA 921 2011).

5.2.2 La cella in cui si sviluppa l'incendio

Anche le caratteristiche della cella hanno un ruolo di primo piano sullo sviluppo dell'incendio. L'hot gas layer e la porzione delle superfici di delimitazione della cella a contatto con esso (pareti e soffitto) che vengono progressivamente riscaldate, trasmettono calore principalmente per irraggiamento verso l'oggetto che brucia e contribuendo così ad aumentarne la sua velocità di combustione. Analogamente gli altri oggetti combustibili presenti vengono riscaldati progressivamente. La temperatura e lo spessore dello strato caldo e la temperatura

delle superfici di pareti e soffitto avrà pertanto un grande impatto sulla crescita dell'incendio (Cooper 2002; Tien, Lee e Stretton 2002; Walton e Thomas 2002).

Un oggetto che brucia in una piccola cella causerà il raggiungimento di temperature relativamente elevate e in tempi minori rispetto al caso in cui lo stesso oggetto bruci in una cella di dimensioni maggiori. In questo secondo caso infatti le temperature dell'hot gas layer saranno più basse, tempi più lunghi per il riempimento da parte dei fumi e quindi meno feedback termico verso i materiali combustibili presenti, di conseguenza lo sviluppo dell'incendio sarà tendenzialmente più lento.

Una volta innescato l'incendio, il suo sviluppo è influenzato anche dalle aperture presenti nella cella, infatti perché la combustione continui vi deve essere un continuo apporto di ossigeno. Nelle celle caratterizzate da un volume moderato e che non presentano aperture o nei casi in cui queste sono chiuse, il fuoco consuma presto l'ossigeno presente e può autoestinguersi o continuare a bruciare molto lentamente, senza fiamme visibili (*smoldering combustion*, si veda ad esempio Drysdale (2011)), a seconda della disponibilità di ossigeno.

Nel caso in cui siano invece presenti delle aperture, le dimensioni, la forma e la loro posizione diventano importanti per il potenziale sviluppo dell'incendio. Durante la fase di crescita, prima che il regime di combustione diventi controllato dalla ventilazione, le aperture se da un lato favoriscono l'ingresso di aria fresca, dall'altro possono agire come un sistema di scarico dei fumi e dei gas verso l'esterno in questo modo diminuisce il feedback termico verso il combustibile presente all'interno della cella e la crescita del fuoco risulta più lenta.

Quando la combustione diviene controllata dalla ventilazione, la dimensione delle aperture e la loro forma assumono un ruolo molto importante. In questa fase dell'incendio è stato verificato sperimentalmente (Kawagoe 1958) e successivamente confermato da vari autori (ad esempio Pettersson, Magnusson e Thor (1976)), che il tasso di combustione dipende fortemente dal *fattore di ventilazione* definito come $A_0\sqrt{H_0}$, dove A_0 rappresenta la superficie dell'apertura e H_0 la sua altezza. Questo risultato è stato ottenuto anche per via teorica applicando il principio di conservazione dell'energia a uno spazio confinato in condizioni di incendio pienamente sviluppato e analizzando teoricamente i flussi di massa in entrata e in uscita (Karlsson e Quintiere 2000).

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 6

Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

Nel metodo INSPECT le situazioni avverse che si possono verificare in una generica attività in caso di incendio vengono descritte attraverso lo strumento degli scenari di avversità potenziale. L'identificazione degli scenari di avversità potenziale non è fine a se stessa, ma deve portare con sé le informazioni essenziali e necessarie per valutare la performance dell'attività esaminata in caso di incendio rispetto ai 5 obiettivi di sicurezza, finalizzata all'individuazione delle contromisure da adottare per la gestione delle emergenze.

Il sistema su cui possono impattare gli agenti avversi generati da un incendio (calore, fumi, gas di combustione) è caratterizzato da bersagli diversi, ciascuno con specifiche vulnerabilità rispetto agli effetti dell'incendio: generalmente durante la fase di crescita o di pre-flashover l'enfasi viene posta sulla salvaguardia della vita umana e la limitazione delle perdite di beni. L'evoluzione dell'incendio in questa fase può essere descritta attraverso curve potenza rilasciata - tempo. Quando viene raggiunto il flashover e la fase di incendio pienamente sviluppato le condizioni indotte dall'incendio sono tali da rendere impossibile la sopravvivenza delle persone, in questa fase il focus è posto sulla stabilità delle strutture e la limitazione della propagazione dell'incendio verso altre attività. L'incendio in questa fase viene in genere caratterizzato attraverso una curva temperatura-tempo.

Nell'ambito della Fire Safety Engineering sono stati introdotti metodi di calcolo di tipo deterministico che consentono di valutare i diversi elementi che caratterizzano l'evoluzione di un incendio e le condizioni da esso determinate come la velocità di crescita, la potenza termica rilasciata, la propagazione del fuoco tra diversi oggetti, la propagazione dei fumi e le temperature raggiunte. L'impatto dell'incendio sui bersagli esposti (ad esempio le persone o la struttura dell'edificio), la loro risposta a queste condizioni e di conseguenza il livello di danno atteso può essere stimato confrontando i risultati ottenuti dai calcoli

6.1. Scenari di incendio potenziale

rispetto a criteri predefiniti (Hadjisophocleous e Benichou 1999).

Alla luce di quanto descritto nei paragrafi e nei capitoli precedenti, gli elementi che vengono considerati negli scenari di avversità sono i seguenti:

- Elementi che consentono di identificare lo scenario di incendio potenziale;
- Elementi che consentono di descrivere la dinamica dell'incendio in termini di potenza termica rilasciata (HRR);
- Elementi che consentono di identificare la presenza di pericolosità speciali.

Questi elementi consentono di valutare l'impatto dell'incendio sui bersagli esposti.

6.1 Scenari di incendio potenziale

Uno scenario di incendio potenziale descrive in modo pre-codificato lo schema di propagazione dell'incendio (fire pattern), consentendo quindi di individuare qualitativamente quale sarà lo scenario da affrontare in termini di estensione dell'incendio e dei potenziali percorsi seguiti dal fuoco nella sua propagazione da un oggetto all'altro.

Queste informazioni sono di particolare importanza da un lato per evidenziare la presenza di situazioni critiche che possono causare impedimenti all'evacuazione delle persone, ad esempio a causa di un incendio che si propaga sui rivestimenti delle pareti e che può ostacolare l'accesso al sistema d'esodo, si veda ad esempio NFPA (1980), dall'altro possono evidenziare la presenza di scenari particolarmente gravosi dal punto di vista delle risorse necessarie per gestire tali scenari.

Nel metodo proposto, gli scenari di incendio potenziale vengono descritti attraverso pittogrammi a partire dall'identificazione del *fuel package* o pacchetto combustibile caratteristico della cella esaminata. Questo strumento concettuale verrà introdotto nel prossimo capitolo assieme agli strumenti ingegneristici che consentono di definirlo operativamente.

In Tabella 6.1 sono rappresentati gli scenari potenziali di incendio definiti nel lavoro di ricerca e introdotti in INSPECT. La definizione degli scenari è stata ottenuta a partire da una analisi e concettualizzazione dei diversi casi che si possono verificare nella realtà attraverso l'analisi della predisposizione come introdotta nel capitolo precedente. Gli scenari individuati possono anche essere combinati tra loro per descrivere lo scenario di incendio potenziale che caratterizza una determinata situazione reale.

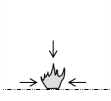
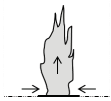
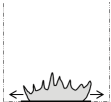
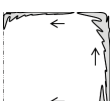
Di fatto quindi, gli scenari di incendio potenziale costituiscono un utile strumento di supporto alla scelta delle azioni da attuare in un ottica di prevenzione dell'emergenza e alle tattiche che i vigili del fuoco o le squadre di soccorso interne devono adottare per gestire l'emergenza, nel caso in cui questa si verifichi. Gli scenari infatti consentono una rapida identificazione e comunicazione del potenziale incendio da affrontare.

L'impiego di pittogrammi è funzionale alla creazione di mappe di pericolosità che coprono l'intera attività esaminata, consentendo di mettere in luce le principali criticità che la caratterizzano.

L'identificazione degli scenari di incendio potenziale inoltre costituisce la base per la successiva valutazione della dinamica di incendio in termini di rilascio

6. Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

Tabella 6.1: Definizione degli scenari potenziali di incendio.

Pittogramma	Scenario di incendio potenziale
	Incendio confinato al singolo oggetto che brucia.
	Le fiamme possono propagarsi prevalentemente in verticale.
	Le fiamme possono propagarsi prevalentemente in orizzontale.
	Le fiamme possono propagarsi sia in orizzontale che in verticale.
	Le fiamme possono propagarsi lungo pareti, soffitto o sui pavimenti.

di energia, velocità di crescita del fuoco e di temperature raggiunte all'interno della cella, consentendo così una valutazione delle condizioni ambientali che si instaurano nella cella esaminata che possono essere potenzialmente critiche per la sopravvivenza delle persone, per la salvaguardia dei beni e la stabilità delle strutture.

6.2 Dinamica dell'incendio

La descrizione qualitativa della dinamica di un incendio effettuata nel capitolo precedente può essere tradotta in termini quantitativi assumendo come riferimento l'*heat release rate* o rateo di rilascio di energia (indicato con HRR o $\dot{Q}$), che dal punto di vista fisico rappresenta la potenza termica rilasciata dall'incendio.

6.2.1 Heat release rate

L' HRR è la grandezza che meglio esprime la pericolosità posta dall'incendio di un generico oggetto combustibile o da un insieme di oggetti e consente di descrivere la gravosità delle condizioni che l'incendio determina nella cella in cui si sviluppa (Babrauskas e Peacock 1992; Quintiere 1998). L' HRR , infatti, è in relazione con i più importanti fenomeni che caratterizzano l'evoluzione di un incendio: la propagazione del fuoco ad altri oggetti per effetto dell'irraggiamento dalle fiamme, le caratteristiche del plume e dell'*hot gas layer* e l'instaurarsi del *flashover* in un locale.

Valutare l' HRR di un incendio in pratica significa valutarne la grandezza in termini quantitativi (Babrauskas e Peacock 1992).

6.2. Dinamica dell'incendio

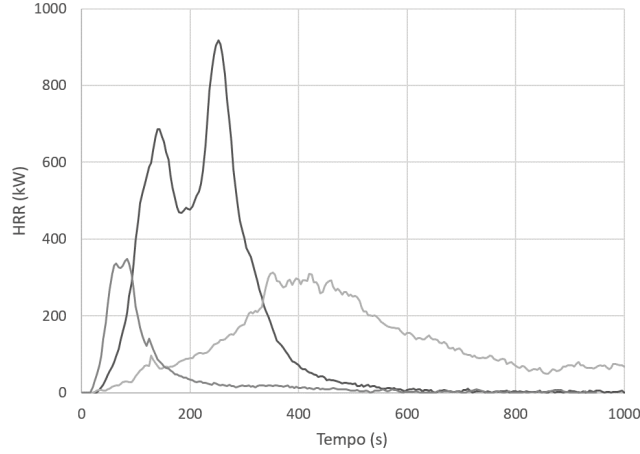


Figura 6.1: Curve HRR sperimentali per diverse tipologie di materassi (Sundström 1996).

A partire dall'HRR, infatti, possono essere stimate le condizioni ambientali causate da un incendio all'interno di una generica cella, tra queste la stima delle temperature dello strato caldo, detta *Hot Gas Layer Temperature* (HGLT) è di fondamentale importanza, infatti ha un effetto diretto sulla sicurezza delle persone e sulla capacità portante delle strutture. La stima di HGLT è anche necessaria per la previsione del feedback termico verso altro materiale combustibile presente e quindi la previsione della propagazione dell'incendio a oggetti remoti rispetto a quello da cui origina l'incendio.

Da un punto di vista teorico l'HRR può essere calcolato come prodotto del *burning rate* o flusso di massa del combustibile che brucia $\dot{m}_{fuel}$ (kg/s) per il potere calorifico ΔH_{eff} (kJ/kg) dello stesso materiale (Karlsson e Quintiere 2000):

$$HRR = \dot{m}_{fuel} \cdot \Delta H_{eff} \quad (6.1)$$

L'HRR di uno specifico oggetto o materiale o di un gruppo di oggetti può essere determinato direttamente attraverso vari tipi di prove sperimentali, si vedano ad esempio Babrauskas (2016a) e Janssens (2016).

Numerosi studi sono stati finalizzati alla definizione dell'HRR per i materiali più comuni presenti in attività civili come sedie, cuscini, materassi, tessuti vari, apparecchi e componenti elettrici, computer, elettrodomestici, postazioni di lavoro, ecc. (si vedano ad esempio Babrauskas (2016a), Kim e Lilley (2000), NFPA 92b (2009) e Sardqvist (1993)).

In generale, nelle curve HRR sperimentali si possono individuare le fasi caratterizzanti l'evoluzione dell'incendio: una fase di crescita, seguita da una di decrescita e tra queste un picco o una fase con andamento più o meno costante come mostrato in Figura 6.1.

Gli HRR ottenuti sperimentalmente possono essere adottati come riferimento per la stima dell'HRR di altri oggetti dalle caratteristiche simili presenti nello

6. Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

Tabella 6.2: Valori del growth factor α e classificazione della velocità di crescita dal fuoco (Karlsson e Quintiere 2000).

Velocità di crescita	α
Lenta o Slow (S)	0.003
Media o Medium (M)	0.012
Rapida o Fast (F)	0.047
Ultra-rapida o Ultra-fast (UF)	0.188

specifico contesto da valutare (Anderson e Ezekoye 2014; Babrauskas 2016a; Karlsson e Quintiere 2000).

In molti casi tuttavia questo approccio può non essere adeguato sia per la mancanza di dati a disposizione in letteratura, in questi casi è più utile fare riferimento a curve HRR convenzionali.

Le curve HRR convenzionali sono costruite a partire da una schematizzazione delle curve HRR sperimentali.

Le curve HRR sperimentali della maggior parte dei materiali mostrano come alla fase di ignizione segua una fase di crescita caratterizzata da incrementi di HRR più o meno accentuati nel tempo in funzione delle caratteristiche dei materiali combustibili, della loro forma, superficie esposta e orientamento (Karlsson e Quintiere 2000)). In questa fase la crescita del fuoco generalmente segue un andamento parabolico e viene comunemente semplificata adottando i cosiddetti fuochi "*t quadro*" o "*t squared fires*". In base a questo modello, l'HRR varia secondo l'equazione:

$$HRR = \alpha \cdot t^2 \quad (6.2)$$

Dove α rappresenta il *growth factor* del fuoco (kW/s^2) e t il tempo trascorso dall'ignizione (s). Il coefficiente α individua quattro classi di fuochi come indicato in Tabella 6.2.

La durata della fase di crescita può essere stimata con l'equazione:

$$t_{max} = \sqrt{\frac{HRR_{max}}{\alpha}} \quad (6.3)$$

Il valore massimo dell' HRR_{max} dipende oltre che dalle caratteristiche dell'oggetto o degli oggetti combustibili in termini di tipologia di materiale e dalla superficie esposta, anche dalle caratteristiche della cella in cui l'incendio si sviluppa, infatti l'HRR dell'oggetto può essere tale da causare il flashover e l'instaurarsi di condizioni di incendio pienamente sviluppato all'interno della cella. In termini generali si può quindi scrivere:

$$HRR_{max} = \min(HRR_{max_{vent}}; HRR_p) \quad (6.4)$$

Dove HRR_p rappresenta l'HRR massimo proprio dell'oggetto o del gruppo di oggetti considerati e $HRR_{max_{vent}}$ rappresenta l'HRR massimo in funzione delle condizioni di ventilazione. Metodi per stimare HRR_p verranno presentati nel prossimo capitolo, mentre $HRR_{max_{vent}}$ può essere determinato attraverso la relazione:

$$HRR_{max_{vent}} = \dot{m}_{O_2} \cdot \Delta H_{c,O_2} \quad (6.5)$$

6.2. Dinamica dell'incendio

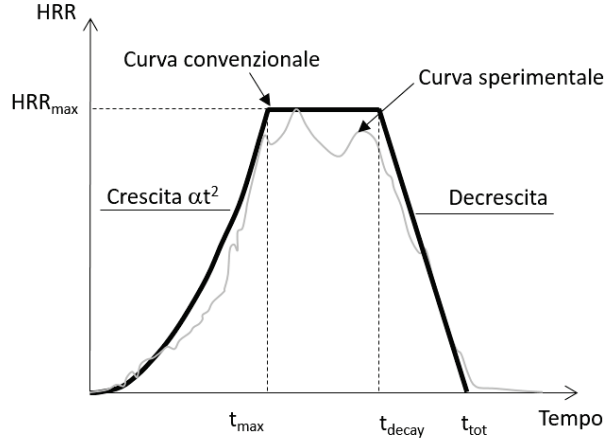


Figura 6.2: Esempio di curva HRR convenzionale.

Dove $\dot{m}_{O_2} = 0.23 \cdot \dot{m}_{air}$ è il flusso di ossigeno che entra nella cella ipotizzando che la sua concentrazione in aria sia pari al 23% (Karlsson e Quintiere 2000) e $\dot{m}_{air} = 0.5 \cdot A_0 \sqrt{H_0}$ è il flusso d'aria in ingresso nella cella attraverso le aperture (Kawagoe 1958). $\Delta H_{c,O_2} \cong 13200 \text{ MJ/kg}_{(O_2)}$ è l'energia rilasciata per ogni chilogrammo di ossigeno consumato (Tewarson 2002) il quale è approssimativamente costante per tutti i materiali. Da qui si ottiene:

$$HRR_{max_{vent}} = 1518 \cdot A_0 \sqrt{H_0} \quad (6.6)$$

La durata di questa fase è legata alla quantità di materiale combustibile presente. ISO/TR 13387-2 (1999) indica che la fase di decrescita ha inizio quando viene raggiunta la soglia dell'80% dell'energia totale E_{tot} :

$$t_{decay} = t_{max} + \frac{0.80 \cdot E_{tot} - \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot t_{max}^3}{HRR_{max}} \quad (6.7)$$

Dove t_{decay} rappresenta l'istante in cui inizia la fase di decrescita, $\frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot t_{max}^3$ è l'energia prodotta durante la fase di crescita del fuoco. Segue la fase di decadimento e spegnimento caratterizzata da una riduzione dei valori di HRR nel tempo, la quale viene in genere schematizzata con un andamento lineare ISO/TR 13387-2 (1999). Il tempo trascorso il quale l'incendio si estingue e la potenza termica rilasciata si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento viene consumato il restante 20% dell'energia termica inizialmente disponibile:

$$t_{tot} = t_{decay} + 2 \cdot \frac{0.20 \cdot E_{tot}}{HRR_{max}} \quad (6.8)$$

La schematizzazione così introdotta porta a definire curve HRR convenzionali (Figura 6.2) che possono essere utilizzate ai fini del metodo proposto.

In generale è possibile determinare la velocità di crescita di un incendio e il picco di HRR a partire dalla destinazione d'uso del locale (NFPA 92b 2009; UNI EN 1991-1-2 2004).

6. Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

Tale approccio può essere utile ai fini della progettazione della sicurezza in caso di incendio per nuove attività, dove le caratteristiche del contenuto combustibile non sono note a priori o sono note solo indicativamente.

Tuttavia, poiché lo scopo del metodo INSPECT è quello di valutare l'esistente per caratterizzarne l'effettiva pericolosità in caso di incendio, questo approccio non è adottabile in quanto non consente di fare riferimento alle specifiche caratteristiche riscontrate, quanto piuttosto a caratteristiche medie proprie della destinazione d'uso.

Questo aspetto fa nascere l'esigenza di identificare i criteri che consentono di stimare la velocità di crescita dell'incendio espressa attraverso il growth factor e il picco di HRR, a partire dagli elementi che si possono raccogliere attraverso una ispezione visiva dell'attività.

6.3 Impatto dell'incendio sui bersagli esposti

Come evidenziato nel Capitolo 1, fumo, calore e gas tossici sono i principali agenti avversi di un incendio e ad ognuno di essi sono associati molteplici effetti negativi sui valori esposti, in primis la vita umana.

Uno degli obiettivi principali del metodo INSPECT è quello di verificare la performance dell'attività rispetto alla salvaguardia della vita umana in caso di incendio.

6.3.1 Impatto dell'incendio sulle persone

Nell'ambito della Fire Safety Engineering la sicurezza delle persone si ritiene garantita se gli occupanti possono disporre di un tempo sufficiente per lasciare l'edificio in condizioni di sicurezza. Questo tempo viene generalmente indicato con l'acronimo ASET, Available Safe Egress Time, o tempo disponibile per l'evacuazione sicura. Il calcolo dell'ASET può essere effettuato una volta definiti i cosiddetti *tenability criteria* e i corrispondenti valori soglia. I *tenability criteria* possono essere suddivisi in due tipologie: puntuali e macroscopici.

Tenability criteria "puntuali"

Gli indicatori di tipo puntuale possono essere determinati quando è possibile caratterizzare in dettaglio le proprietà del combustibile, le caratteristiche di combustione, i prodotti della combustione e la loro propagazione all'interno dell'ambiente considerato. La definizione di questi indicatori richiede di considerare le concentrazioni di gas tossici e gas irritanti, la riduzione di visibilità causata dai fumi e il calore radiante e convettivo (ISO 13571 2007).

In pratica, quando si considera l'effetto di gas tossici, linee guida internazionali come ISO 13571 (2007), indicano di valutare la *Fractional Effective Dose* di gas tossici (FED_{toxic}), data dal rapporto tra la *exposure dose* e la dose del gas tossico che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto. La *exposure dose* è definita come la misura della dose di un gas tossico disponibile per inalazione, cioè presente nell'aria inspirata, calcolata per integrazione della curva concentrazione-tempo della sostanza per il tempo di esposizione.

$$FED_{toxic} = (FED_{CO} + FED_{HCN}) \cdot V_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (6.9)$$

6.3. Impatto dell'incendio sui bersagli esposti

Dove FED_{CO} , FED_{HCN} e FED_{O_2} rappresentano rispettivamente la fractional effective dose incapacitante di CO, HCN e alla bassa concentrazione di O_2 . V_{CO_2} rappresenta il fattore di iperventilazione indotto dalla CO_2 .

L'effetto dei gas irritanti viene valutato attraverso la $FEC_{irritant}$ o *Fractional Effective Concentration* definita come il rapporto tra la concentrazione dei gas irritanti disponibili per inalazione e la concentrazione degli stessi gas che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto.

$$FED_{irritant} = \sum_i \frac{[gas\ irritante_i]}{F_{C_i}} \quad (6.10)$$

Dove $[gas\ irritante_i]$ rappresenta la concentrazione del gas irritante i e F_{C_i} la concentrazione dello stesso gas che compromette le capacità del soggetto medio esposto.

Per quanto riguarda l'effetto del calore irraggiato e convettivo lo stesso standard propone un approccio basato sulla FED_{heat} , simile a quello applicato per i gas tossici:

$$FED_{heat} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{q^{1.33}}{1.33} + \frac{T^{3.4}}{5 \cdot 10^7} \right) \cdot \Delta t \quad (6.11)$$

Dove $\Delta t = t_2 - t_1$ è la durata dell'esposizione, q è il flusso termico per irraggiamento (in kW/m^2) e T la temperatura dell'aria ($^{\circ}C$).

La riduzione della visibilità viene calcolata a partire dalla concentrazione di fumi che può essere misurata attraverso l'*optical density* OD (Mulholland 2002):

$$OD = \frac{1}{L} \log \frac{I_0}{I} \quad (6.12)$$

Dove L è la distanza percorsa tra la sorgente della luce e un fotometro, I_0 è l'intensità del raggio luminoso prodotto dalla sorgente e I è l'intensità della luce al fotometro.

Questi indicatori possono ragionevolmente essere calcolati con l'ausilio di modelli fluidodinamici di simulazione di incendio (CFD), per cui il loro impiego non è adatto ai fini della metodologia di rapida identificazione delle avversità proposta.

Tenability criteria "macroscopici"

Gli indicatori di tipo macroscopico fanno riferimento al concetto di *zero exposure* o esposizione zero (ISO/TR 16738 2009), il quale prevede che gli occupanti devono potersi muovere in aria "indisturbata" e pertanto viene esclusa l'interazione tra agenti avversi e bersagli. In pratica viene adottato un modello a due zone per schematizzare l'ambiente in cui si sviluppa l'incendio, nello strato superiore sono presenti i prodotti della combustione, mentre in quello inferiore vi è aria pulita o indisturbata. I due strati sono ipotizzati uniformi in termini di temperatura e composizione, di conseguenza le proprietà sono mediate se tutto il volume di ciascuno strato.

Vengono adottati due indicatori: l'altezza minima dei fumi stratificati (hot gas layer) dal piano di calpestio e la temperatura media dello strato di fumi caldi. Questi indicatori possono essere stimati a partire da equazioni analitiche

6. Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

risolvibili anche manualmente, rendendoli particolarmente adatti ai fini della metodologia in sviluppo.

Soglie per i tenability criteria

Valori di FED e FEC pari ad 1 sono associati alla presenza di condizioni che impediscono l'esodo assumendo che gli occupanti abbiano una sensibilità media agli effetti dei prodotti dell'incendio. Per considerare le categorie più sensibili della popolazione, che risulterebbero incapacitate ben prima del raggiungimento di FED o FEC uguale a 1, ISO 13571 (2007) suggerisce di adottare il valore 0.3 come soglia di prestazione per FED e FEC.

Per quanto riguarda i tenability criteria di tipo macroscopico, ISO/TR 16738 (2009) prevede che l'altezza minima dell'hot gas layer dal piano di calpestio sia pari a 2.5 m. Questo valore è ridotto a 1.83 m in NFPA 101 (2009). Per quanto riguarda la temperatura media dello strato di fumi caldi, ISO/TR 16738 (2009) fissa la soglia per l'insorgere di condizioni incapacitanti degli occupanti a 200°C.

Viste le difficoltà operative insite nella determinazione degli indicatori puntuali, ai fini di una rapida valutazione delle avversità indotte da un incendio è preferibile riferirsi ai tenability criteria di tipo macroscopico. Delichatsios (2004) e Tosolini, S. Grimaz, Pecile et al. (2012) hanno mostrato che l'altezza minima dell'hot gas layer è un criterio conservativo per celle con volume inferiore a 4800 m³, per volumi maggiori Delichatsios (2004) evidenzia come la temperatura dell'hot gas layer diventa invece il criterio da considerare, in quanto la temperatura soglia viene raggiunta prima dell'altezza limite.

Di qui la necessità di individuare gli strumenti ingegneristici che ne consentano la valutazione a partire dagli elementi che possono essere osservati durante una ispezione dell'attività.

6.3.2 Equazioni per il calcolo dell'altezza dell'hot gas layer

Karlsson e Quintiere (2000) hanno proposto un metodo semplificato per calcolare l'altezza dell'hot gas layer (o layer height, LH) dal piano di calpestio, basato sulle leggi di conservazione della massa e dell'energia. Le ipotesi che identificano le condizioni di validità dell'espressione ricavata dai due autori sono le seguenti:

- Si considera un modello a zone che prevede la presenza di uno strato caldo a soffitto e uno inferiore in condizioni di aria ambiente;
- Si suppone che la densità dello strato caldo si mantenga costante nel tempo;
- Lo scambio termico attraverso i contorni del dominio è trascurabile;
- L'HRR prodotto dal fuoco è piccolo rispetto al volume del locale chiuso (condizioni di pre-flashover);
- Si considera una cella in cui lo scambio di massa con l'esterno è trascurabile.

Considerando un volume di controllo coincidente con l'hot gas layer, a partire dal principio di conservazione della massa e ipotizzando che il fuoco possa essere descritto attraverso l'equazione 6.2 è possibile ottenere la seguente espressione per LH (m):

6.3. Impatto dell'incendio sui bersagli esposti

$$LH = \left[\frac{0.21}{\rho_{HGL}} \left(\frac{\rho_a^2 \cdot g}{c_p \cdot T_a} \right)^{1/3} \cdot \frac{2}{5} \frac{\alpha^{1/3} \cdot t^{5/3}}{A} + H^{-2/3} \right]^{-3/2} \quad (6.13)$$

Dove ρ_{HGL} è la densità dell'hot gas layer (kg/m^3), ρ_a , T_a , c_p sono rispettivamente la densità (kg/m^3), la temperatura (K) e il calore specifico (kJ/kg K) dello strato di aria pulita (o lower layer), g è la costante di gravitazione universale (m/s^2), A ed H sono rispettivamente la superficie (m^2) e l'altezza (m) della cella in cui si sviluppa l'incendio. L'equazione 6.13 consente di ottenere l'altezza dello stato di fumi LH in funzione del tempo una volta nota la densità dei fumi ρ_{HGL} . Applicando il principio di conservazione dell'energia sul volume di controllo coincidente con l'hot gas layer e ipotizzando che l'aria sia un gas ideale è possibile ricavare la seguente espressione per ρ_{HGL} :

$$\rho_{HGL} = \rho_a \left[\frac{\alpha \cdot t^3}{3 \cdot (H - LH) \cdot A \cdot c_p \cdot 353} \right] \quad (6.14)$$

Assegnando un valore di primo tentativo a ρ_{HGL} e risolvendo poi iterativamente le equazioni 6.13 e 6.14 è possibile ottenere l'altezza dello strato dei fumi LH in funzione del tempo t trascorso dall'ignizione del fuoco. Combinando le equazioni 6.13 e 6.14 è possibile ottenere la seguente equazione (Tosolini, S. Grimaz e Salzano 2013) in cui una volta fissato il valore di soglia per LH è possibile calcolare direttamente l'istante in cui questa condizione viene raggiunta e quindi valutare il tempo a disposizione per l'evacuazione sicura secondo il concetto della esposizione zero:

$$t_{LH} = \left[\frac{5}{2} \left(LH^{-2/3} - H^{-2/3} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot t^3}{3(H - LH) \cdot A \cdot c_p \cdot 353} \right) \right]^{3/5} \cdot \left[\frac{A \cdot \alpha^{-1/3} \cdot \rho_a}{0.21 \left(\frac{\rho_a^2 \cdot g}{c_p \cdot T_a} \right)^{1/3}} \right]^{3/5} \quad (6.15)$$

Le equazioni 6.13, 6.14 e 6.15 consentono quindi di stimare l'altezza dell'hot gas layer a partire dalla geometria della cella (altezza e superficie del in pianta) e delle caratteristiche del combustibile (da cui dipende il fattore di crescita dell'incendio α). È importante sottolineare che questi elementi possono essere individuati a partire dall'ispezione della cella.

Studi di Delichatsios (2004), Mowrer (1999) e Tosolini, S. Grimaz e Salzano (2013) hanno evidenziato il range di validità delle equazioni 6.13, 6.14 e 6.15 in funzione del volume della cella considerata, della sua area di base, dell'altezza e della velocità di crescita del fuoco. Questi studi hanno mostrato che il metodo proposto da Karlsson e Quintiere (2000) può essere utilizzato per celle con volumi fino a 4800 m^3 .

6.3.3 Equazioni per il calcolo della temperatura dell'hot gas layer

La temperatura dell'hot gas layer (T_{HGL}) ha un effetto diretto sulla sicurezza delle persone ma non solo, essa infatti determina un riscaldamento progressivo

6. Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

di altro materiale combustibile presente all'interno della cella dovuto al feedback termico e quindi consente di fare delle previsioni sulla propagazione dell'incendio a oggetti remoti rispetto a quello da cui origina l'incendio come proposto in Clarke et al. (1990). Inoltre le temperature raggiunte all'interno della cella possono determinare condizioni critiche per la capacità portante delle strutture e per la propagazione dell'incendio verso altri edifici.

La stima di T_{HGL} va quindi al di là della sola valutazione di ASET, più in generale rappresenta un indicatore del livello di avversità globale raggiunto all'interno di una cella a causa di un incendio.

Al fine di valutare T_{HGL} una delle equazioni analitiche più utilizzate nella letteratura tecnica (Drysdales 2011; Karlsson e Quintiere 2000; Walton, Thomas e Ohmiya 2016) all'interno di una cella in condizioni di ventilazione naturale è quella proposta da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981):

$$T_{HGL} = T_a + 6.85 \left(\frac{HRR^2}{A_0 \sqrt{H_0} \cdot h_k \cdot A_T} \right)^{1/3} \quad (6.16)$$

Questa equazione consente di stimare la temperatura dell'hot gas layer una volta note la superficie interna totale della cella A_T (m^2), il fattore di ventilazione $A_0 \sqrt{H_0}$ ($m^{5/2}$) le caratteristiche dei materiali che costituiscono pareti, soffitto e pavimento della cella, i quali determinano il coefficiente h_k (*effective heat transfer coefficient* in $kW/(m^2 K)$) e le caratteristiche dei materiali combustibili presenti (HRR, kW).

L'equazione è stata derivata a partire da un bilancio energetico semplificato per la cella, quindi sono state derivate una serie di variabili adimensionali da cui dipende la temperatura. Usando risultati sperimentali, dove la temperatura era una quantità misurata e tutte le variabili adimensionali erano note, gli autori hanno determinato una serie di costanti attraverso un'analisi di regressione e sono quindi arrivati all'equazione 6.16 che può essere calcolata direttamente a mano. L'equazione 6.16 mette in luce gli elementi necessari per stimare la temperatura dello strato caldo ed è importante evidenziare come questi possono essere raccolti attraverso una ispezione della cella.

Vista la semplicità di utilizzo la relazione è particolarmente indicata ai fini di una rapida valutazione delle avversità, tuttavia prima di essere adottata nel metodo INSPECT verrà analizzata con maggiore dettaglio nel capitolo 8, per valutarne il campo di applicabilità e confrontare le temperature ottenute con le previsioni fornite da modelli di simulazione di incendio.

6.4 Definizione degli scenari di avversità potenziale

Sulla base di quanto delineato nei paragrafi precedenti è stata introdotta la schematizzazione rappresentata in Figura 6.3 che consente di descrivere in modo sintetico tutti gli elementi che caratterizzano lo scenario di avversità attraverso un pittogramma descrittivo dello scenario di incendio potenziale a cui sono integrate le informazioni relative all'HRR convenzionale corrispondente. In Figura 6.3 sono evidenziati gli elementi che devono essere osservati e identificati durante l'ispezione dell'attività.

6.4. Definizione degli scenari di avversità potenziale

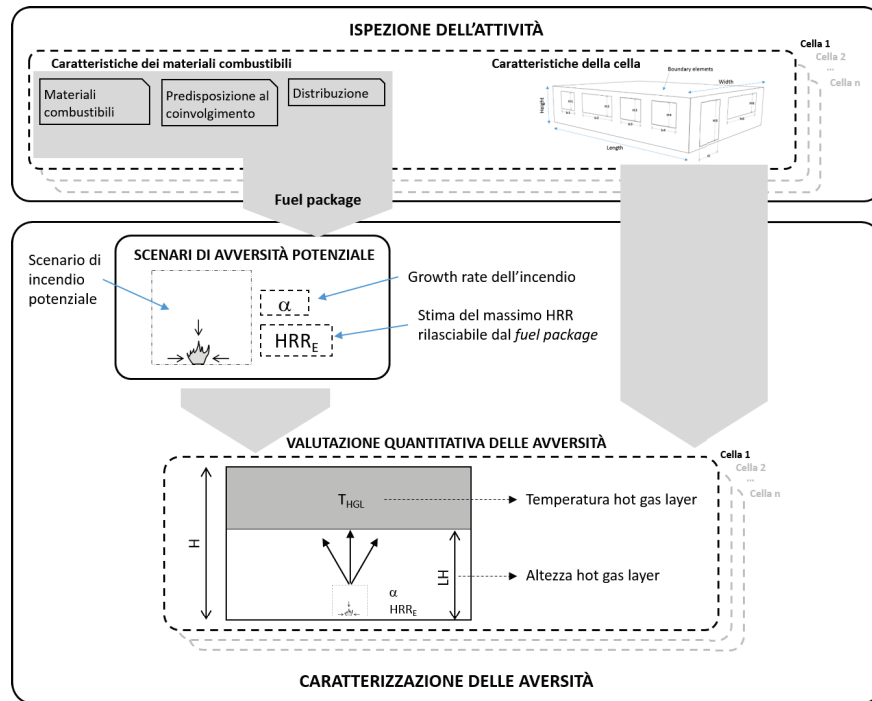


Figura 6.3: Schema del metodo e definizione degli scenari di avversità potenziale

Gli elementi descritti dallo scenario di avversità potenziale uniti alle caratteristiche della cella in cui lo scenario può manifestarsi, consentono di effettuare la valutazione quantitativa delle avversità indotte in termini di temperature ed altezza dell'hot gas layer.

Al fine di rendere fruibile la metodologia sviluppata è necessario:

- Definire il concetto di fuel package;
- Individuare i criteri che consentono l'identificazione dei fuel package a partire dagli elementi raccolti durante l'ispezione dell'attività (tipologia di materiale, predisposizione a essere coinvolti nell'incendio e distribuzione all'interno della cella)
- Identificare i criteri per la stima dell'HRR del fuel package in termini di growth factor e HRR massimo;

Questi elementi infatti sono indispensabili per la definizione dello scenario di avversità potenziale.

Per quanto riguarda la valutazione quantitativa delle avversità indotte dall'incendio, la temperatura dell'hot gas layer T_{HGL} rappresenta un utile indicatore del livello di impatto dell'incendio sui bersagli esposti. Infatti, una volta definiti i valori di soglia delle temperature oltre i quali possono attivarsi determinate conseguenze sui bersagli esposti e caratterizzato lo scenario di avversità potenziale è possibile, attraverso l'equazione 6.16, stimare la temperature raggiunte e quindi identificare il livello di danno atteso.

6. Caratterizzazione delle situazioni avverse attraverso gli scenari di avversità potenziale

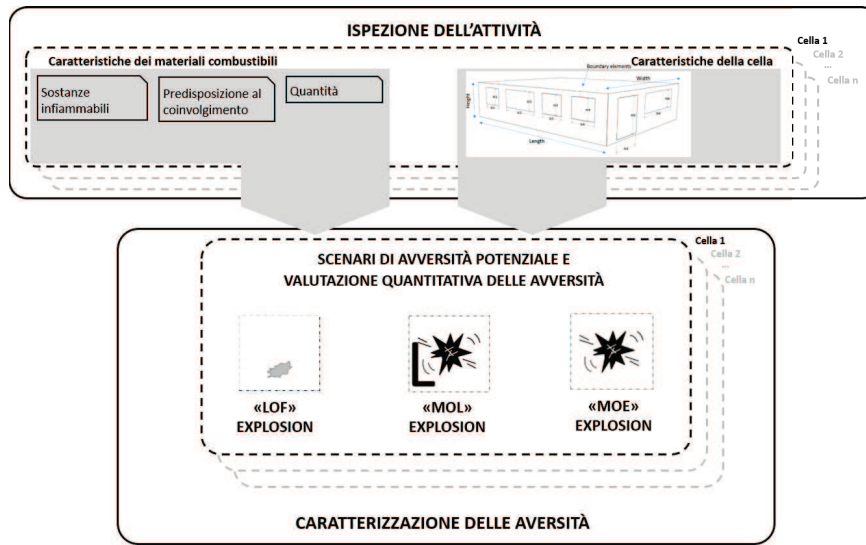


Figura 6.4: Schema del metodo per la caratterizzazione delle avversità indotte da esplosione.

L'equazione 6.16 è particolarmente indicata ai fini di una rapida valutazione delle avversità, tuttavia prima di essere adottata nel metodo INSPECT verrà analizzata con maggiore dettaglio nel capitolo 8, per valutarne il campo di applicabilità e confrontare le temperature ottenute con le previsioni fornite da modelli di simulazione di incendio.

6.5 Pericolosità speciali: esplosioni

Nelle attività civili si possono trovare quantità, generalmente piccole, di sostanze infiammabili suscettibili di formare un'atmosfera esplosiva se miscelate con l'ossigeno presente nell'aria. Questa atmosfera una volta attivata può di conseguenza portare al verificarsi di un'esplosione. La gestione delle emergenze in caso di incendio, ma in un'ottica più generale di gestione della sicurezza nei luoghi di lavoro e di vita, non può quindi prescindere dall'identificazione dei rischi indotti da esplosione. Anche per questo motivo l'Unione Europea ha emanato specifiche direttive (Direttive ATEX: 1994/9/EC (1994) e 1999/92/EC (1999)), con gli obiettivi di tutelare la sicurezza dei lavoratori, le proprietà, l'ambiente e la popolazione. Per contro, la corretta applicazione delle citate Direttive richiede una forte esperienza e le conoscenze tecnico-scientifiche alla base dei fenomeni di esplosione. Queste competenze però non sono semplici da individuare nelle piccole e medie imprese.

Una grande quantità di studi e ricerche riguarda il pericolo di esplosione in ambienti industriali, mentre vi è una chiara mancanza di studi in materia di valutazione del pericolo di esplosione in attività civili, come laboratori scolastici, officine, garage e altri, dove in genere le quantità di materiali presenti sono limitate.

Vi è quindi la necessità di sviluppare uno strumento di gestione, rivolto in particolare alle attività civili, che consenta l'identificazione del pericolo di

6.5. Pericolosità speciali: esplosioni

Tabella 6.3: Definizione degli scenari potenziali di esplosione.

Pittogramma	Scenario di esplosione potenziale
	Sovrappressioni limitate (Limited Overpressure and Fire - LOF).
	Sovrappressioni significative - Effetti localizzati (Major Overpressure and Fire with Local effect - MOL).
	Sovrappressioni significative - Effetti estesi (Major Overpressure and fire with Extended effect - MOE).

esplosione attraverso uno screening rapido dell'attività e il riconoscimento di un numero limitato di indicatori, come le proprietà ed i quantitativi massimi dei materiali stoccati o manipolati, quindi nel solco di quanto previsto in INSPECT e delineato nel capitolo 3.

Per la definizione degli scenari di avversità potenziale nel caso delle esplosioni si è adottata una metodologia analoga a quella seguita per gli incendi, delineata attraverso il flusso logico in Figura 6.4.

Sono stati definiti tre scenari di esplosione potenziale (Tabella 6.3). Ciascuno scenario è associato al raggiungimento di determinati livelli di sovrappressione all'interno di un volume di controllo convenzionale.

La metodologia che consente di identificare gli scenari in Tabella 6.3 a partire dagli elementi che possono essere raccolti durante l'ispezione dell'attività verrà dettagliata nel Capitolo 10.

Capitolo 7

Gli scenari di incendio potenziale

Nel Capitolo 6 si è introdotto lo strumento degli scenari di incendio potenziale. Uno scenario di incendio potenziale descrive in modo pre-codificato lo schema di propagazione dell'incendio o pattern di propagazione dell'incendio, consentendo quindi di individuare qualitativamente quale sarà lo scenario da affrontare in termini di estensione dell'incendio e dei potenziali percorsi seguiti dal fuoco nella sua propagazione da un oggetto all'altro. A questi elementi che consentono una descrizione qualitativa, ai fini delle successive valutazioni è necessario associare un HRR convenzionale che descriva la dinamica di incendio.

Nel presente capitolo verrà definito il concetto di *fuel package*, alla base della definizione degli scenari di incendio potenziale, quindi verranno introdotti i criteri e li strumenti ingegneristici che consentono l'identificazione dei *fuel package* a partire dagli elementi raccolti durante l'ispezione dell'attività (tipologia di materiale, predisposizione a essere coinvolti nell'incendio e distribuzione all'interno della cella) ed infine verranno identificati i criteri per la stima dell'HRR del *fuel package* in termini di *growth factor* e HRR massimo;

7.1 Il *fuel package*

Nelle situazioni reali i materiali combustibili contenuti in una generica attività sono in generale estremamente variegati.

Ai fini di una rapida valutazione dello scenario di incendio potenziale che caratterizza ogni generica cella in cui risulta suddivisa l'attività e della successiva quantificazione degli effetti avversi, è conveniente riferirsi al concetto di *fuel package* o pacchetto di combustibile.

In NFPA 921 (2011) un *fuel package* è definito come un gruppo di elementi combustibili le cui caratteristiche intrinseche e di distribuzione spaziale sono tali per cui si può ritenere che l'incendio di un singolo elemento, causi la propagazione del fuoco a tutti i rimanenti elementi del gruppo. Secondo NFPA 921 (2011), il fuoco si propaga da un oggetto all'altro principalmente per effetto dell'irraggiamento.

NFPA 921 (2011) riporta alcuni esempi di gruppi di elementi combustibili che possono essere considerati come dei *fuel package*:

7.1. Il *fuel package*

- in un ufficio, un gruppo di postazioni di lavoro adiacenti l'una all'altra;
- in una camera d'albergo o in un salotto, un gruppo di arredi o mobili disposti in vicinanza tra loro;
- scaffalature aperte e contigue in un magazzino;
- un carrello elevatore caricato con un pallet di merci isolato rispetto ad altri materiali combustibili.

In generale il concetto di fuel package viene utilizzato nella letteratura tecnica secondo due accezioni:

1. per indicare un generico elemento o oggetto che brucia (ad esempio in Anderson e Ezekoye (2014), Bwalya (2005) e Bwalya, Sultan e BiŁnichou (2004a,b)); oppure
2. secondo la definizione data da NFPA 921 (2011) per indicare un insieme di oggetti che per le loro caratteristiche possono coinvolgersi reciprocamente in un incendio, di fatto costituendo un'unica entità. Questa seconda chiave di lettura viene più spesso utilizzata nel caso di ricostruzioni di incendi (si veda ad esempio Bwalya (2008), Bwalya, Zalok e Hadjisophocleous (2007), Law et al. (2011), Natori et al. (2006), Stroup, Bryner et al. (2004), Stroup, DeLauter et al. (2001) e Zalok e Hadjisophocleous (2007) Madrzykowsky 1996, Nelson 1987, 1989).

Nel quadro di INSPECT, l'introduzione del concetto di fuel package secondo la definizione in NFPA 921 (2011), consente di prescindere dal considerare nell'analisi ogni singolo oggetto presente nella cella individualmente e di concentrarsi piuttosto su gruppi di oggetti potendo così fare riferimento a delle caratteristiche medie o prevalenti, basate sulle proprietà degli elementi costituenti il fuel package, o ponendosi in un'ottica di worst-case scenario, degli elementi più critici dal punto di vista del comportamento al fuoco del fuel package.

La definizione di fuel package data in NFPA 921 (2011) suggerisce quali sono i parametri e le proprietà che contribuiscono a definirlo e che devono essere raccolte durante le osservazioni eseguite nella fase di ispezione. Queste sono:

- il tipo di materiali combustibili (solidi, liquidi, gas), le loro proprietà chimico-fisiche, la quantità e nel caso dei solidi la loro geometria (forma e spessore);
- la distribuzione spaziale, intesa sia come disposizione relativa tra gli oggetti sia come posizione all'interno della cella;
- la predisposizione ad essere coinvolti in un incendio (condizioni di confinamento e superficie esposta).

Questi tre macro-elementi oltre a consentire la definizione dei fuel package e quindi individuare lo scenario di incendio potenziale, sono fondamentali anche per la stima dell'HRR corrispondente.

In Tabella 7.1 gli scenari di incendio potenziale definiti nel Capitolo 6 sono associati a specifiche caratteristiche dei fuel packages.

Gli elementi e i criteri che consentono la definizione dei fuel packages sono discussi nei paragrafi che seguono.

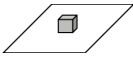
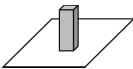
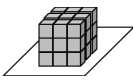
7. Gli scenari di incendio potenziale

Tabella 7.1: Definizione degli scenari potenziali di incendio in funzione delle caratteristiche dei fuel packages.

Scenario di incendio potenziale	Caratteristiche del fuel package
 Incendio circoscritto.	Oggetti combustibili isolati, l'incendio rimane confinato al singolo oggetto che brucia a causa della potenza termica rilasciata insufficiente a coinvolgere altri oggetti combustibili eventualmente presenti.
 Incendio a propagazione verticale prevalente.	Oggetti combustibili con sviluppo prevalentemente in verticale o gruppi di oggetti impilati ma separati orizzontalmente.
 Incendio a propagazione orizzontale prevalente.	Oggetti combustibili accostati o adiacenti uno all'altro prevalentemente in orizzontale e distribuiti in file o lungo superfici. Gli oggetti sono posti a livello del piano di calpestio e con limitato sviluppo nel piano verticale.
 Incendio a propagazione orizzontale e verticale.	Oggetti combustibili che si estendono sia in orizzontale che in verticale o gruppi di oggetti stoccati sia in orizzontale, lungo file o superfici, sia in verticale.
 Incendio di rivestimenti.	Materiali combustibili distribuiti con continuità o "spalmati" lungo pareti, soffitto o sui pavimenti.

7.1. Il *fuel package*

Tabella 7.2: Definizione degli scenari distributivi.

Scenario distributivo	Descrizione
 Isolato	Oggetti combustibili isolati, l'incendio rimane confinato al singolo oggetto che brucia a causa della potenza termica rilasciata insufficiente a coinvolgere altri oggetti combustibili eventualmente presenti.
 Impilato	Oggetti combustibili con sviluppo prevalentemente in verticale o gruppi di oggetti impilati e separati orizzontalmente.
 Distribuito orizzontale	Oggetti combustibili accostati o adiacenti uno all'altro prevalentemente in orizzontale e distribuiti in file o lungo superfici. Gli oggetti sono posti a livello del piano di calpestio e con limitato sviluppo nel piano verticale (inferiore a 1 m).
 Orizzontale e verticale	Oggetti combustibili che si estendono sia in orizzontale che in verticale o gruppi di oggetti stoccati sia in orizzontale, lungo file o superfici, sia in verticale.
 Rivestimenti	Materiali combustibili distribuiti con continuità o "spalmati" lungo pareti, soffitto o sui pavimenti per almeno il 5% della loro superficie.

7.1.1 Criteri per la caratterizzazione dei *fuel packages*

Nel metodo INSPECT la raccolta dei dati relativi al materiale combustibile presente in una attività avviene tramite un sopralluogo. In questo sopralluogo piuttosto che effettuare semplicemente un inventario degli oggetti o dei materiali combustibili presenti è fondamentale effettuare una valutazione più generale che prenda in considerazione anche le modalità di utilizzo o di conservazione dei materiali e la loro distribuzione all'interno della cella esaminata. È infatti l'insieme di questi elementi che concorre a determinare lo scenario di incendio potenziale, piuttosto che i singoli oggetti combustibili considerati separatamente.

Distribuzione spaziale

La posizione reciproca tra i diversi oggetti presenti e la loro distribuzione all'interno della cella esaminata concorre a determinare le caratteristiche del *fuel package*. La distribuzione degli oggetti è stata schematizzata attraverso gli scenari distributivi definiti in Tabella 7.2.

Al fine di associare ai criteri qualitativi definiti in Tabella 7.2, dei criteri quantitativi che consentano di definire oggettivamente se due oggetti possono

7. Gli scenari di incendio potenziale

coinvolgersi reciprocamente nell'incendio e quindi se appartengono allo stesso fuel package o meno si sono considerati i seguenti discriminanti:

1. Gli oggetti combustibili che sono posti in aderenza o in prossimità l'uno all'altro in modo tale che le fiamme possono diffondersi con continuità da un oggetto all'altro appartengono allo stesso fuel package;
2. Gli oggetti che si trovano a una distanza da altri oggetti o pacchetti di combustibile tale per cui le fiamme non possono propagarsi da uno all'altro per effetto del trasferimento di calore, non sono considerati parte di uno stesso pacchetto di combustibile.

Vi è quindi la necessità di definire un metodo per valutare la distanza oltre la quale due oggetti non si coinvolgono reciprocamente nell'incendio.

Un'analisi bibliografica ha evidenziato come uno dei criteri più utilizzati è quello di valutare il flusso termico radiativo emesso dall'incendio di un oggetto e dai fumi caldi in corrispondenza dell'oggetto bersaglio (Clarke et al. 1990; Hadjisophocleous e Benichou 1999; NFPA 555 2009; NFPA 92b 2009). Se il flusso termico in corrispondenza dell'oggetto bersaglio è minore di un valore soglia necessario per innescare l'incendio, i due oggetti possono ritenersi separati.

L'impiego di questo approccio richiede da un lato la stima dell'HRR dell'oggetto che brucia per primo e del flusso termico necessario per innescare l'oggetto bersaglio, i quali sono entrambi di difficile determinazione senza sperimentazioni dirette, dall'altro è necessario un modello che consenta di valutare l'irraggiamento dalle fiamme e il contributo dai fumi caldi.

Questo problema verrà affrontato in maggiore dettaglio nel Capitolo 9, tuttavia è anche possibile fare riferimento a distanze convenzionali oltre le quali gli oggetti possono ritenersi separati e quindi facenti parte di fuel packages diversi, come proposto in NFPA 555 (2009). Queste distanze sono pari rispettivamente a 140, 90 e 40 cm per oggetti facilmente, normalmente o difficilmente accendibili come definiti in Tabella 7.3, in base a risultati sperimentali inizialmente ottenuti da Babrauskas (1982). Questa classificazione, seppur grossolana, fornisce un'indicazione generale delle grandezze per il flusso termico incidente richiesto per l'accensione di diverse tipologie di oggetti e viene comunemente utilizzata nell'ambito della fire safety engineering (si veda tra gli altri Clarke et al. (1990), Hadjisophocleous e Benichou (1999) e NFPA 555 (2009)), consentendo di semplificare notevolmente il problema.

Predisposizione a partecipare all'incendio

Oltre agli elementi appena discussi è fondamentale prendere in considerazione la predisposizione degli oggetti presenti a essere coinvolti e partecipare quindi più o meno facilmente all'incendio. Il concetto di predisposizione si può applicare a due livelli:

- A livello di caratteristiche intrinseche dei materiali e degli oggetti presenti che determinano una diversa propensione a sviluppare vapori combustibili e quindi partecipare alla combustione;
- A livello di gestione dei materiali stessi, infatti le modalità di conservazione e utilizzo dei materiali possono rendere uno stesso materiale più o meno propenso a partecipare all'incendio.

7.1. Il *fuel package*

Tabella 7.3: Classificazione dei materiali in funzione dei flussi termici necessari per l'accensione (Clarke et al. 1990; Hadjisophocleous e Benichou 1999).

Flusso termico incidente per ignizione	Descrizione del materiale
10 kW/m ²	Materiali facilmente infiammabili: oggetti sottili quali carta sciolta, tendaggi, pellicole in materiale plastico non ignifugo, liquidi infiammabili.
20 kW/m ²	Materiali normalmente infiammabili: arredi imbottiti o materiali plastici in genere.
40 kW/m ²	Materiali difficilmente infiammabili: materiali che presentano una buona resistenza al calore, di spessore considerevole ed elevata inerzia termica come il legno massiccio e plastiche termoindurenti.

Tabella 7.4: Classificazione qualitativa delle condizioni di confinamento.

Condizioni di confinamento	Contributo convenzionale al fuoco del materiale combustibile stoccato
In contenitori o armadi non combustibili chiusi.	Non partecipa al fuoco.
In contenitori o armadi non combustibili aperti.	Si assume che il 90% della superficie esposta massima dei materiali combustibili stoccati partecipi al fuoco.
In contenitori o armadi combustibili oppure materiale combustibile non confinato in alcun tipo di contenitore.	Tutto il materiale stoccato contribuisce all'incendio, compreso l'eventuale contenitore o armadio.

La predisposizione a partecipare all'incendio è pertanto influenzata da fattori propri del materiale combustibile che vengono presi in considerazione attraverso la classificazione introdotta in Tabella 7.3 e da elementi più propri della sfera gestionale, quali le modalità di conservazione dei materiali stessi come evidenziato in S. Grimaz e Pini (1999) e Hietaniemi e Mikkola (1997). Per modalità di conservazione qui si fa riferimento ai contenitori o agli armadi entro cui possono essere conservati oggetti o materiali combustibili, come ad esempio libri o faldoni contenuti all'interno di un armadio. SE l'armadio è in metallo ed è dotato di ante mantenute chiuse il grado di coinvolgimento del contenuto è diverso rispetto al caso in cui gli stessi libri o faldoni sono contenuti in una scaffalatura aperta. Le modalità di conservazione quindi possono influenzare la propagazione del fuoco in diversi modi:

- Se il contenitore è combustibile può favorire la propagazione del fuoco;
- Se il contenitore è solo parzialmente chiuso ovvero non è mantenuto chiuso, può esporre il materiale immagazzinato agli effetti dell'incendio.

Ai fini dell'identificazione dei fuel packages è stata introdotta una semplice valutazione delle condizioni di confinamento dei materiali basata sulle osservazioni riportate in S. Grimaz e Pini (1999), a ciascuna condizione di confinamento è stato associato un contributo convenzionale all'incendio del materiale contenuto (Tabella 7.4).

7.1.2 Stima dell'HRR del fuel package

In genere, l'HRR di un singolo oggetto o di un insieme di oggetti può essere determinato sperimentalmente a fronte di spese consistenti (Anderson e Ezekoye 2014). Un tale approccio è impraticabile ai fini di INSPECT sia per gli elevati costi, sia per i tempi che sarebbero necessari per eseguire le prove su duplicati di tutti gli oggetti combustibili all'interno dell'attività. Di conseguenza è necessario ricorrere ad approssimazioni attraverso metodi semplificati che consentano di stimare l'HRR che deve consentire di ottenere sia una stima del growth rate, che esprime la velocità di crescita del fuoco, sia una stima del picco di potenza termica rilasciata dal fuoco.

Un approccio possibile suggerito in Babrauskas (2016a), è quello di utilizzare la curva HRR dalla letteratura disponibile degli oggetti caratterizzati da una più stretta corrispondenza con l'oggetto di interesse. La curva può essere eventualmente corretta per tener conto delle differenze tra le dimensioni e la massa degli oggetti utilizzati negli esperimenti e l'oggetto di interesse.

A partire da osservazioni sperimentali sono stati proposti vari modelli di previsione per la stima dell'HRR di diverse tipologie di oggetti. Ad esempio, Delichatsios (1976) ha proposto un modello per la previsione della velocità di crescita fuoco e dell'HRR massimo di un cataste di legno caratterizzate da varie configurazioni. Babrauskas e Krasny (1985), Babrauskas e Walton (1986), Hoglander e Sundstrom (1997) e Sundström (1996) hanno proposto metodi per la stima dell'HRR di arredi imbottiti.

Modelli di questo tipo consentono la stima del comportamento al fuoco con una certa precisione ma limitatamente a un gamma definita di oggetti combustibili, pertanto possono essere utilizzati per prevedere l'HRR di una specifica gamma di oggetti, mentre la loro applicazione non sarebbe efficace per valutare l'HRR dell'insieme di prodotti combustibili che possono costituire un fuel package.

Al fine di determinare l'HRR del fuel package si è adottata la seguente metodologia:

- Per quanto riguarda il growth rate si farà riferimento a un'analisi dei dati disponibili in letteratura con l'obiettivo di correlare le velocità di crescita del fuoco alle diverse tipologie di materiali tenendo in considerazione anche la forma e lo spessore:

$$\alpha = f(\text{tipo di materiale; forma e spessore})$$

Esempi di queste classificazioni si possono trovare in ISO/TR 13387-2 (1999) e NFPA 92b (2009). Generalmente, una velocità di crescita del fuoco di tipo lenta o slow (S) è adeguata per pacchetti di combustibile costituiti da oggetti solidi densi e spessi o da oggetti trattati per non propagare le fiamme. Una velocità di crescita del fuoco di tipo medio (M) è tipica di oggetti solidi con densità minore rispetto al caso precedente, mentre velocità di crescita di tipo rapido (F) possono essere appropriati per materiali solidi sottili. Infine, fuochi con velocità di crescita ultra rapida o ultrafast (UF) sono caratteristici di liquidi infiammabili, materiali combustibili in polvere, o altri solidi estremamente infiammabili.

- Per quanto riguarda l'HRR massimo di un oggetto o di un fuel package in condizioni di *free burning*, ossia in presenza di ventilazione sufficiente

7.1. Il *fuel package*

a consentire una combustione controllata dal combustibile, da un punto di vista fisico sembra naturale supporre che dipenderà fortemente dalla superficie esposta. A questa sarà necessario assegnare un HRR specifico, ossia per unità di superficie, che dipenderà del tipo di materiale:

$$HRR_p = f(\text{superficie esposta}; \text{tipo di materiale})$$

Anche in questo caso si è effettuata una ricerca in bibliografia per definire il valore dell'HRR specifico.

Un approccio di questo tipo sembra adatto per l'applicazione nel contesto di INSPECT, dove a partire dall'ispezione dell'attività possono essere raccolti tutti i dati necessari per la stima della growth rate e del valore di picco dell'HRR.

7.1.3 Growth rate del fuel package

Per caratterizzare la velocità di crescita del fuoco che può coinvolgere un fuel package attraverso i growth rate convenzionali definiti in Tabella 6.2, sono stati analizzati diversi riferimenti disponibili in letteratura. Gli oggetti su cui sono state effettuate le prove e da cui sono stati derivati i growth rate, sono stati suddivisi in categorie diverse in funzione della tipologia di materiale (solido, liquido o gas). Nel caso dei solidi si è effettuata una ulteriore categorizzazione in materiali costituiti principalmente da legno e da materiali plastici. Un ulteriore elemento preso in considerazione è lo spessore o la pezzatura degli oggetti, infatti il fuoco su oggetti sottili si sviluppa più velocemente rispetto a oggetti spessi. In Tabella 7.5 è riportata la sintesi dei risultati ottenuti con le fonti bibliografiche da cui sono stati derivati.

7.1.4 HRR massimo del fuel package

L'HRR massimo di un oggetto o di un fuel package (HRR_p) in condizioni di *free burning*, ossia quando vi è sufficiente ventilazione e la combustione è controllata dal combustibile è un parametro estremamente importante per valutare gli effetti dell'incendio in termini di temperatura dei fumi e i livelli di irraggiamento verso altri oggetti.

Combustibili solidi

Da un punto di vista fisico sembra logico supporre che, se l'oggetto ha caratteristiche omogenee, l'HRR dipenderà fortemente dalla superficie che contribuisce alla combustione. Questa osservazione è supportata da diversi studi in letteratura, dai quali è possibile osservare che l'HRR aumenta in funzione dell'estensione della superficie che partecipa alla combustione, pertanto questa relazione potrebbe essere espressa nella forma generale:

$$HRR(t) = \int HRRPUA(t) \cdot dA(t) \quad (7.1)$$

Dove $HRRPUA$ rappresenta l'HRR specifico per unità di superficie (kW/m^2). Questa formulazione all'apparenza semplice nasconde in realtà numerosi elementi di complessità e incertezza che caratterizzano il parametro $HRRPUA$, le cui caratteristiche variano in funzione del tipo, dello spessore e dall'orientamento dei

Tabella 7.5: Classificazione della velocità di crescita del fuoco in funzione delle caratteristiche del fuel package.

Tipo di combustibile	Materiale	Forma e spessore	Esempi	Growth rate	Riferimento
Solidi combustibili	Legno o materiale a base di cellulosa	Oggetti spessi (spessore ≥ 20 mm)	Arredi in legno massiccio, legnami, libri, carta in rotoli Rivestimenti di pareti o arredi (pannelli in truciolare o compensato); carta sciolta, scatole di cartone impilate; tessuti, stracci; segatura, fibre vegetali (ad es. cotone); pellet di legno o altro materiale granulare, pallet impilati (diverse altezze)	S	Babrauskas (2016a) e R.G. Gann et al. (2001)
		Oggetti sottili (spessore < 20 mm)		F-UF/S*	
	Materie plastiche. Materiali con elevate emissioni nocive, termoplastici e/o con gocciolamento.	Arredi in plastica	Espositori, stand, sedie singole o impilate, cestini	F-UF/S*	Babrauskas (2016a), R.G. Gann et al. (2001), Karlsson e Quintiere (2000) e Sardqvist (1993)
		Arredi imbottiti	Divani, poltrone, sedie imbottite, materassi, cuscini, biancheria da letto	M-F/S*	
		Apparecchi elettronici	Computer, stampanti, pannelli elettrici, elettrodomestici, cavi elettrici.	S	
		Oggetti sottili (spessore < 20 mm)	Materiale granulare come pellet di plastica, tessuti, materiali da imballaggio, tappeti, tendaggi, isolamento di tubazioni, rivestimenti per pareti	F-UF/S*	
		Termoplastiche	Resine sintetiche, schiume, plastiche espanse	UF/S*	
		Solidi estremamente infiammabili	Celluloide, fosforo, fiammiferi, magnesio, ecc.	UF	
Liquidi infiammabili				UF	Karlsson e Quintiere (2000)
Gas infiammabili				UF	S. Grimaz e Pini (1999)

7.1. Il *fuel package*

materiali. L'HRRPUA varia inoltre in funzione del tempo e del flusso termico incidente oltre che dalla posizione dell'elemento di area dA che sta bruciando (Si veda a questo proposito Babrauskas (2016a)).

Ulteriori elementi di complessità sono dovuti alla propagazione delle fiamme e quindi all'evoluzione dell'area dA che contribuisce alla combustione.

L'equazione 7.1 è alla base di diversi modelli di previsione dell'HRR per diverse tipologie di oggetti, si vedano ad esempio i lavori di Wickstrom e Goransson (1987) per la stima dell'HRR dei materiali di rivestimento delle pareti o Babrauskas, Baroudi et al. (1997) per gli arredi imbottiti. In questi casi il parametro HRRPUA viene determinato a partire da prove in laboratorio su campioni di piccole dimensioni attraverso il cono calorimetrico (Babrauskas 2016b). Questi approcci consentono di stimare direttamente non solo l'HRR massimo, ma anche la velocità di crescita del fuoco.

Ai fini di INSPECT, tuttavia, approcci di questo tipo risultano eccessivamente complessi e non sono adatti per effettuare valutazioni speditive, inoltre questi valgono solo per un numero limitato di tipologie di oggetti ben definite.

A partire dall'equazione 7.1 si è fatta l'ipotesi forte di poter esprimere l'HRR massimo del fuel package, HRR_p , attraverso l'espressione:

$$HRR_p = HRRPUA \cdot A_b \quad (7.2)$$

Dove $HRRPUA$ in questo caso è una costante che dipende dal tipo di materiale, mentre A_b rappresenta la superficie esposta dell'oggetto che può partecipare alla combustione.

Una ricerca bibliografica ha evidenziato che lo stesso tipo di ipotesi è stato adottato anche in altri studi in letteratura che verranno illustrati di seguito ed ha consentito di ottenere una stima per il parametro HRRPUA in relazione alla tipologia di materiali costituenti il fuel package.

Natori (2008)

Il lavoro di Natori (2008) è finalizzato a definire un metodo di stima per l'HRR di incendi localizzati, ovvero che non raggiungono la condizione di incendio pienamente sviluppato, causati da diverse tipologie di oggetti. Partendo dai risultati di prove sperimentali disponibili in letteratura (163 data sets da 30 fonti bibliografiche), gli oggetti sono stati suddivisi in due categorie sulla base del tipo di materiale costituente o comunque prevalente: legno e plastica.

Per ciascun oggetto è stata determinata la superficie esposta, qui è utile notare che l'autore ha introdotto una semplificazione, infatti poiché la superficie esposta effettiva degli oggetti può essere estremamente articolata e di difficile determinazione, è stata considerata la superficie di un parallelepipedo o di un cilindro che involuppa ciascun oggetto. È stata quindi analizzata la relazione tra la superficie esposta così determinata e l'HRR massimo sviluppato durante l'incendio, l'analisi effettuata da Natori (2008) mostra che esiste una proporzionalità tra queste due grandezze (Figura 7.1), quindi in accordo con l'ipotesi fatta e descritta dall'equazione 7.2.

Nel lavoro di Natori (2008) la relazione di proporzionalità viene descritta analiticamente nella forma:

$$HRR_p = (\mu \pm \sigma) \cdot A_b \quad (7.3)$$

7. Gli scenari di incendio potenziale

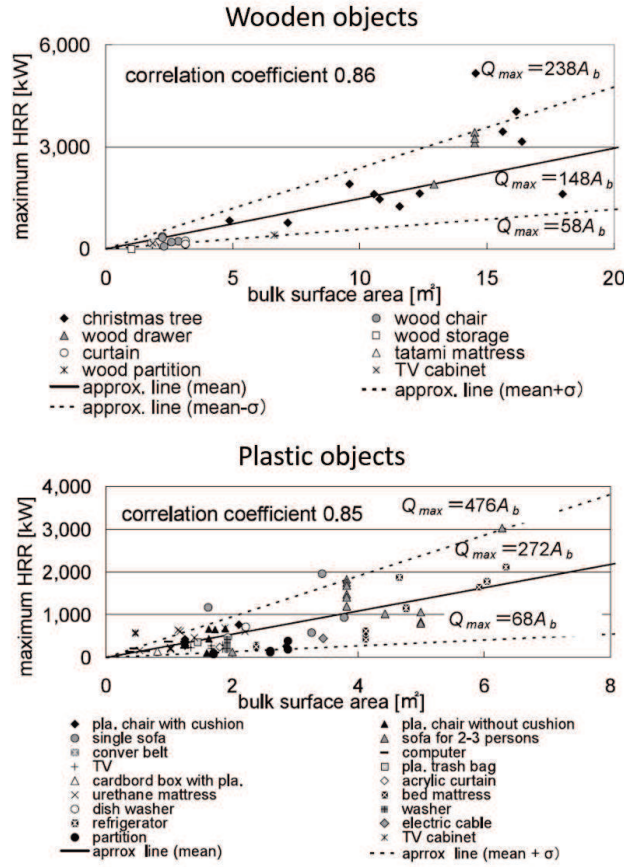


Figura 7.1: Relazione tra HRR massimo e superficie esposta di oggetti in legno (in alto) e plastica (in basso) (tratto da Natori (2008)).

I valori tra parentesi rappresentano il valore medio μ e lo scarto quadratico medio σ del rapporto tra HRR_p e la superficie esposta A_p per i data set esaminati.

Sulla base dei dati sperimentali analizzati le relazioni tra HRR massimo e superficie esposta determinate da Natori (2008) sono le seguenti:

$$HRR_p = (148 \pm 90) \cdot A_b \quad (7.4)$$

per oggetti costituiti prevalentemente da legno o suoi derivati e

$$HRR_p = (272 \pm 204) \cdot A_b \quad (7.5)$$

per oggetti prevalentemente a base di plastica.

Gli oggetti a base di plastica mostrano una variazione maggiore nella relazione tra HRR massimo e superficie esposta (Figura 7.1), che si riflette in uno scarto quadratico medio più alto rispetto agli oggetti costituiti essenzialmente da legno. Questo è dovuto alla maggiore diversità di comportamento presentate dai diversi materiali plastici.

Per garantire un adeguato margine di sicurezza, ai fini di INSPECT si è ipotizzato di assumere che la costante HRR_{PUA} nell'equazione 7.2 possa essere

7.1. Il *fuel package*

Tabella 7.6: Valori per la costante HRRPUA in base ai dati in Natori (2008)).

Categoria di oggetti/fuel package	HRRPUA (kW/m ²)
Prevalentemente in legno	238
Prevalentemente in plastica	476

assunta pari a:

$$HRRPUA = (\mu + \sigma)_{Natori} \quad (7.6)$$

si ottengono i valori in Tabella 7.6.

Assumendo questa ipotesi e calcolando HRR_p per gli oggetti appartenenti ai due data set "oggetti in legno" e "oggetti in plastica", si è osservato che rispettivamente solo il 20% e il 12% dei valori di HRR_p misurati sperimentalmente supera il valore stimato.

Hietaniemi e Mikkola (2010)

Hietaniemi e Mikkola (2010) partendo dalla considerazione che gli scenari di incendio reali sono caratterizzati dalla presenza contemporanea di diversi materiali o oggetti hanno sviluppato una metodologia per la stima dell'HRR di oggetti complessi pensata per essere implementata in FDS (Fire Dynamics Simulator) uno dei più diffusi codici di calcolo CFD per la simulazione degli incendi.

Senza entrare nei dettagli della metodologia proposta dagli autori e considerando solo gli elementi utili ai fini della stima dell'HRR massimo di un fuel package, anche in questo caso il modello concettuale di partenza è quello descritto dall'equazione 7.1.

L'HRRPUA (HRR per unità di superficie, kW/m²), come già ricordato, dipende dal tipo di materiale e dal flusso termico incidente su di esso. Nella letteratura tecnica sono disponibili una grande quantità di misure sperimentali dell'HRRPUA per i più comuni materiali presenti nelle attività civili, ottenuti attraverso prove nel cono calorimetrico. Le prove sono generalmente effettuate sottoponendo più campioni dello stesso materiale o insieme di materiali a diversi valori del flusso termico incidente. Hietaniemi e Mikkola (2010) hanno selezionato da varie fonti bibliografiche i dati relativi a prove effettuate con flusso termico incidente di 50 kW/m², ritenuto rappresentativo del flusso termico che caratterizza un incendio.

Per ridurre le difficoltà insite nel determinare l'HRRPUA più appropriato per lo specifico materiale considerato, in modo simile a quanto proposto da Natori (2008), è stata introdotta una categorizzazione dei materiali in due classi: "cellulosic materials" per gli oggetti prevalentemente in legno e altro materiale cellulosico e "other materials" per oggetti prevalentemente in plastica.

Poiché la classe "other materials" è troppo ampia per essere descritta con un unico valore di HRRPUA, Hietaniemi e Mikkola (2010) introducono una ulteriore suddivisione basata sul potere calorifico del materiale plastico. Questa scelta è giustificata dall'osservazione sperimentale che a materiali caratterizzati da un potere calorifico alto corrispondono valori di picco di HRRPUA maggiori (per maggiori dettagli si rimanda la lavoro originale).

A partire da queste considerazioni Hietaniemi e Mikkola (2010) hanno proposto la categorizzazione di HRRPUA riportata in Tabella 7.7.

7. Gli scenari di incendio potenziale

Tabella 7.7: Valori per la costante HRRPUA proposti da Hietaniemi e Mikkola (2010).

Categoria di oggetti/fuel package	HRRPUA (kW/m ²)
Fuel packages in legno o carta, oppure in teflon o altre materie plastiche con potere calorifico inferiore a 10 MJ/kg.	150
Fuel packages in legno o altro materiale cellulosico e alcune materie plastiche trattate per non propagare la fiamma o comunque non molto combustibili (ad es. PET, POM o altre materie plastiche con potere calorifico compreso tra 10 e 20 MJ/kg). Arredi e mobili possono appartenere a questa categoria o alla successiva.	300
Fuel packages caratterizzati in prevalenza da materiale cellulosico e in parte da plastiche molto combustibili (ABS PE, PP, PS, PU o altre materie plastiche con potere calorifico compreso tra 20 e 30 MJ/kg).	500
Fuel packages costituiti da quantità significative di materie plastiche non trattate per non propagare la fiamma (ABS PE, PP, PS, PU o altre materie plastiche con potere calorifico superiore a 20 MJ/kg).	1000
Fuel packages costituiti quasi esclusivamente da materie plastiche non trattate per non propagare la fiamma (ABS PE, PP, PS, PU o altre materie plastiche con potere calorifico superiore a 20 MJ/kg).	2000

I valori di HRRPUA così definiti possono essere applicati alla superficie esposta effettiva del fuel package (Equazione 7.7) considerato oppure alla superficie di inviluppo (Equazione 7.2).

$$HRR_p = \sum_k (HRRPUA \cdot A_p)_k \quad (7.7)$$

Dove la somma si estende sulle k componenti che possono costituire il fuel package.

7.2 Applicazione a un caso studio e verifica dei risultati

Al fine di verificare le capacità di stima della metodologia proposta e vista l'impossibilità di effettuare direttamente dei test in laboratorio è stato considerato come riferimento un caso in letteratura, nello specifico si è fatto riferimento al lavoro di Madrzykowski e Walton (2004) che presenta una perizia a seguito di un incendio che ha coinvolto un ufficio sito al 12° piano del Cook Country Administration Building, presso Chicago, in Illinois (USA). In conseguenza della perdita di vite umane e feriti, il Governo dell'Illinois ha incaricato il NIST a fornire una valutazione tecnica sull'accaduto coordinata da Madrzykowski e Walton (2004).

Il metodo semplificato proposto verrà applicato immaginando di effettuare l'ispezione individuando i fuel packages e stimando le caratteristiche dell'HRR. I risultati ottenuti saranno confrontati con l'analisi effettuata da Madrzykowski e Walton (2004).

In Figura 7.2 è riportata la planimetria del locale con il principale contenuto combustibile presente, si possono notare le disposizioni delle postazioni di lavoro. L'altezza degli ambienti è pari a 3 m. Si notano tre gruppi di postazioni di lavoro composti da 4 unità ciascuna nella zona centrale dell'ufficio, e altri due gruppi composti da 4 postazioni affiancate una all'altra, oltre a due postazioni singole.

7.2. Applicazione a un caso studio e verifica dei risultati

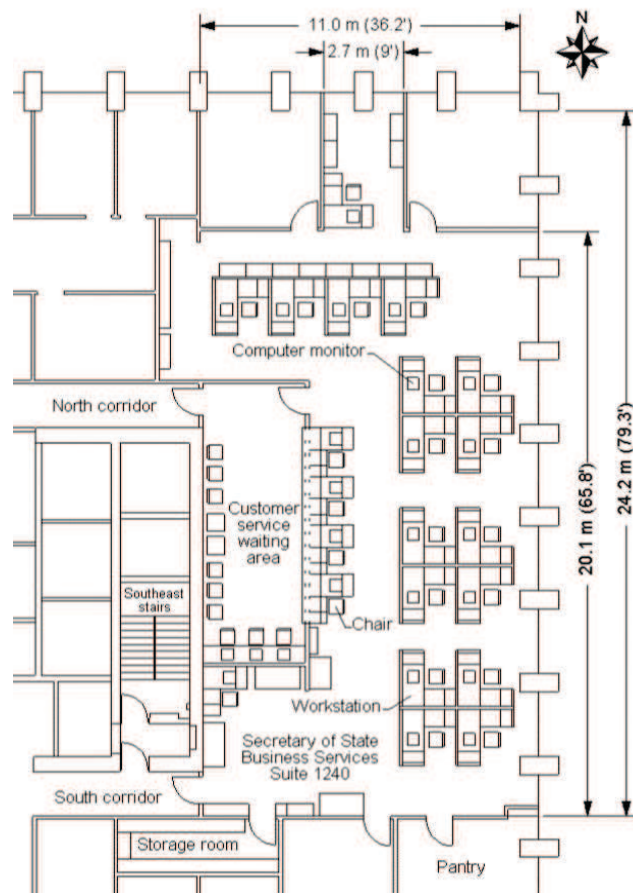


Figura 7.2: Planimetria dell'ambiente considerato e principali fuel packages presenti all'interno (tratto da Madrzykowski e Walton (2004)).

7. Gli scenari di incendio potenziale

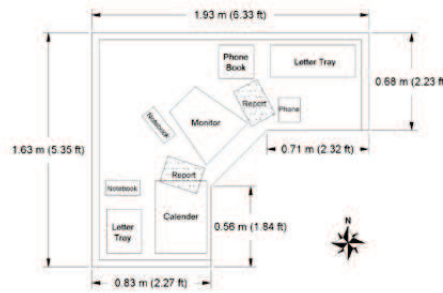


Figura 7.3: Postazione di lavoro (tratto da Madrzykowski e Walton (2004)).

Ogni postazione era costituita da componenti di origine plastica (monitor, tastiera, pc, portadocumenti, telefoni, cestini), materiale cartaceo vario, arredo in laminato (tavolo ad L, dimensioni in Figura 7.3), divisori tra le postazioni di altezza pari a 1.0 m in fibra di vetro rivestita con tessuto in poliestere, sedia di materiale imbottito (poliuretano rivestito di tessuto in poliestere). Non vi è presenza di materiale di rivestimento combustibile sulle pareti nè sul soffitto.

7.2.1 Definizione del fuel package

L'unità di analisi assunta per la definizione dei fuel package è la singola postazione. Viste le caratteristiche dei materiali che costituiscono ciascuna postazione, queste possono essere classificate come elementi normalmente accendibili (si veda Tabella 7.3). In accordo con NFPA 555 (2009), la distanza per cui due elementi normalmente accendibili possono coinvolgersi reciprocamente in un incendio è pari a 90 cm. Non vi è alcun tipo di confinamento dei materiali in contenitori o armadi non combustibili, pertanto tutti i materiali combustibili possono partecipare all'incendio. In conseguenza di ciò nell'ambiente esaminato si possono identificare cinque fuel packages costituiti ciascuno da 4 postazioni e due fuel packages costituiti da una singola postazione ciascuno (Figura 7.2).

7.2.2 Stima dell'HRR

I fuel package sono costituiti da notevoli quantità di materiale plastico, anche sottile (cestini, portalettere, materiale di rivestimento dei pannelli divisori) e carta sciolta i quali possono essere classificati come materiali con growth rate variabile tra F e UF (Tabella 7.5). Elementi come computer e altro materiale elettronico e il tavolo, possono invece essere caratterizzati con un growth rate di tipo S (Tabella 7.5). Ai fini di effettuare una valutazione a favore di sicurezza, viene assunta come velocità di crescita del fuoco caratteristica del fuel package la condizione peggiore tra quelle individuate e quindi un growth rate di tipo F o UF.

La stima di HRR massimo per il fuel package viene eseguita utilizzando entrambi i metodi proposti.

7.2. Applicazione a un caso studio e verifica dei risultati

HRRPUA secondo Natori (2008)

Adottando questo approccio la superficie esposta del fuel package è la superficie di inviluppo dell'insieme di oggetti. Considerando il caso della postazione singola, a partire dai dati disponibili in Madrzykowski e Walton (2004), questa può essere stimata in 6 m^2 . Considerando il fuel package costituito dall'insieme di 4 postazioni, la superficie di inviluppo è stata valutata in 26 m^2 . Vista la tipologia di materiali che costituiscono le postazioni si fa riferimento al valore di HRRPUA proprio dei materiali in prevalenza plastici (pari a 476 kW/m^2 , Tabella 7.6), applicando quindi l'equazione 7.2, si ottiene:

$$HRR_p = 6 \cdot 476 \simeq 2900 \text{ kW} \quad (7.8)$$

per il caso della singola postazione e

$$HRR_p = 26 \cdot 476 \simeq 12600 \text{ kW} \quad (7.9)$$

per il caso di quattro postazioni.

HRRPUA secondo Hietaniemi e Mikkola (2010)

L'applicazione dell'approccio proposto da Hietaniemi e Mikkola (2010) richiede una più accurata valutazione delle superfici esposte, per il caso della singola postazione si ottiene un valore di 13.2 m^2 , mentre nel caso delle quattro postazioni la superficie esposta è nell'ordine di 47 m^2 . Per quanto riguarda la definizione della costante HRRPUA, in base alle caratteristiche del combustibile è stato scelto il valore di 300 kW/m^2 , proprio di fuel packages in legno o altro materiale cellulosico e materie plastiche non molto combustibili (Tabella 7.7). Si ottiene quindi la seguente stima per l'HRR massimo:

$$HRR_p = 13.2 \cdot 300 \simeq 4000 \text{ kW} \quad (7.10)$$

per il caso della singola postazione e

$$HRR_p = 47 \cdot 300 = 14100 \text{ kW} \quad (7.11)$$

per il caso di quattro postazioni.

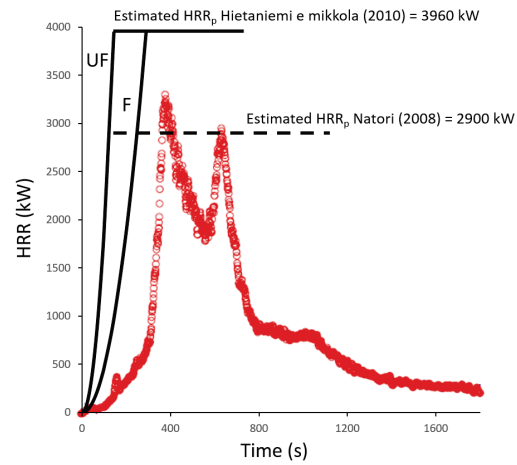
7.2.3 Confronto tra gli HRR stimati e gli HRR misurati sperimentalmente

In Figura 7.4 è illustrato il confronto tra l'HRR stimato (growth rate e HRR massimo) per i due casi di fuel package costituito da singola postazione di lavoro e da 4 postazioni con gli HRR sperimentali da Madrzykowski e Walton (2004).

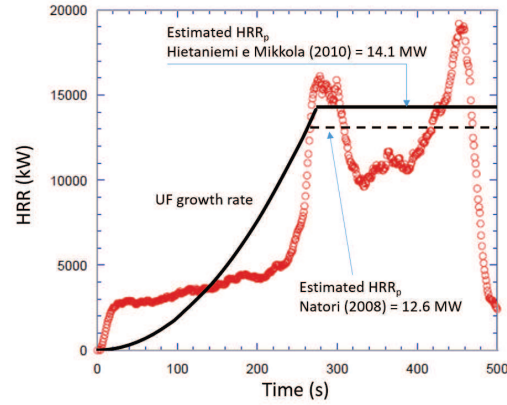
Il confronto mostra che la scelta del growth rate tra F (crescita rapido) e UF (crescita ultra rapida) sovrastima il growth rate effettivamente misurato nelle prove di laboratorio nel caso di postazione singola il quale si attesta piuttosto tra M e F. Nel caso delle 4 postazioni invece, effettivamente la fase di crescita dell'incendio viene descritta bene da un andamento di tipo UF.

Per quanto riguarda la stima del valore di HRR massimo, si nota che utilizzando il metodo proposto da Natori (2008) si ottiene una buona stima in entrambi i casi, si evidenzia solo certa sottostima nel caso delle 4 postazioni

7. Gli scenari di incendio potenziale



(a)



(b)

Figura 7.4: Confronto tra HRR sperimentale (Madrzykowski e Walton 2004) (punti) e HRR stimato: sono riportati la fase di crescita per diversi growth rate ed il picco di HRR stimato a partire da Natori (2008) (linea tratteggiata) e da Hietaniemi e Mikkola (2010) (punto e linea): (a) postazione singola; (b) 4 postazioni.

7.2. Applicazione a un caso studio e verifica dei risultati

(12600 kW contro 19000 kW misurati). Adottando invece il metodo di Hietaniemi e Mikkola (2010), il valore di picco dell'HRR viene sovrastimato nel caso di singola postazione (4000 kW contro circa 3300 kW misurati), nel caso delle 4 postazioni vi è invece una certa sottostima (15000 kW contro 19000 kW misurati).

A margine di questo confronto va osservato che vista l'estrema semplificazione introdotta dal modello adottato le stime sono più che accettabili, in quanto consentono di individuare correttamente la velocità di crescita ed ottenere l'ordine di grandezza del valore di picco dell'HRR per il fuel package caratterizzati geometrie e contenuti combustibili complessi.

Non disponendo dei dati relativi alle masse dei diversi componenti, non stato possibile determinare la durata della fase di picco e la conseguente fase di decrescita con i metodi illustrati al Capitolo 5.

Capitolo 8

Temperatura dell'hot gas layer

Nei capitoli 1 e 6 si è evidenziato come la temperatura dell'hot gas layer (T_{HGL}) abbia un effetto diretto sulla sicurezza delle persone e come essa determini un riscaldamento progressivo di altro materiale combustibile presente all'interno della cella potendo così favorire la propagazione dell'incendio ad oggetti remoti rispetto a quello da cui ha origine. Inoltre, le temperature raggiunte all'interno della cella possono determinare condizioni critiche per la capacità portante delle strutture e possono favorire la propagazione dell'incendio verso altri edifici.

Karlsson e Quintiere (2000) hanno suggerito che la temperatura dell'hot gas layer possa essere adottata come principale indicatore del livello di avversità indotto da un incendio in un ambiente confinato, consentendo di evidenziare l'insorgere di condizioni di pericolo per le persone, i beni e la stabilità strutturale.

Al fine di valutare T_{HGL} , una delle equazioni analitiche più utilizzate nella letteratura tecnica (Drysdales 2011; Karlsson e Quintiere 2000; Walton, Thomas e Ohmiya 2016) all'interno di un ambiente confinato (cella) in condizioni di ventilazione naturale è quella proposta da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981).

McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) partendo da un bilancio energetico semplificato per una generica cella con ventilazione naturale, hanno derivato una serie di variabili adimensionali da cui dipende la temperatura dell'hot gas layer nella fase di pre-flashover. Usando risultati sperimentali, dove la temperatura era una quantità misurata e tutte le variabili adimensionali erano note, attraverso una analisi di regressione hanno determinato una serie di costanti che ha consentito di ottenere una espressione dove la temperatura dei fumi può essere calcolata direttamente a mano, nel seguito identificata con la sigla MQH.

Nel seguito del capitolo verrà prima presentata la teoria alla base del metodo proposto da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981), quindi verranno presentati i confronti tra i risultati ottenuti attraverso il metodo MQH e il modello di simulazione FDS (codice CFD) per un set di scenari predefiniti. Lo scopo del confronto è quello di verificare l'attendibilità delle temperature stimate col metodo MQH confrontandole con i risultati ottenuti attraverso FDS.

8.1. Stima di T_{HGL}

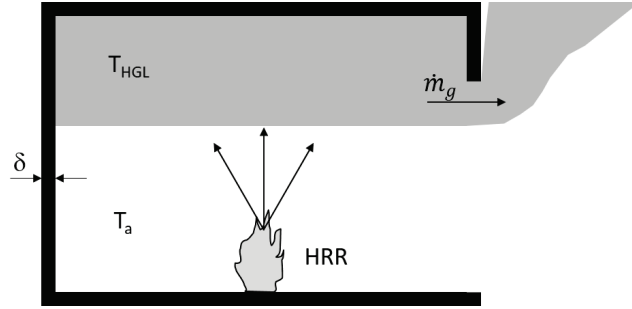


Figura 8.1: Schematizzazione di un incendio all'interno di una cella adottata da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981).

8.1 Stima di T_{HGL}

Lo schema di riferimento per analizzare il problema è rappresentato in Figura 8.1: una cella le cui pareti hanno spessore δ i cui materiali sono caratterizzati da una densità ρ , conduttività k e calore specifico c . La ventilazione è assicurata da una apertura di superficie A_0 e altezza H_0 . All'interno della cella si sviluppa un incendio caratterizzato da un generico HRR; $\dot{m}_g$ rappresenta il flusso di massa in uscita attraverso l'apertura.

McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) hanno impostato un bilancio energetico semplificato per il sistema considerato in Figura :

$$HRR = \dot{Q}_m + \dot{Q}_b \quad (8.1)$$

Dove HRR (kW) è la potenza termica rilasciata dall'incendio all'interno della cella, $\dot{Q}_m$ è la potenza dissipata verso l'esterno per effetto del flusso di massa uscente dalla cella e $\dot{Q}_b$ è la potenza termica dissipata attraverso le pareti della cella.

L'equazione 8.1 può essere scritta nella forma seguente:

$$HRR = \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + \dot{Q}_b \quad (8.2)$$

dove, oltre ai simboli già descritti, c_p è il calore specifico dei gas (kJ/kgK), $T_g - T_a$ è la differenza tra le temperature dei fumi e la temperatura ambiente (°C o K). L'HRR dell'incendio si ipotizza noto.

Il termine $\dot{Q}_b$ come detto rappresenta la potenza termica dissipata attraverso le pareti della cella. La sua definizione richiede di prendere in considerazione diversi processi di trasmissione del calore: irraggiamento e convezione in corrispondenza della superficie delle pareti della cella e conduzione all'interno delle pareti. Nell'analisi di McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981), il processo dominante è la conduzione all'interno delle pareti. Viene quindi definito un coefficiente h_k che rappresenta un coefficiente di conduzione efficace attraverso le pareti della cella, il quale verrà descritto con maggiore dettaglio nel seguito. Segue dalle considerazioni effettuate che il termine $\dot{Q}_b$ può essere definito come:

$$\dot{Q}_b = h_k A_T (T_g - T_a) \quad (8.3)$$

Dove A_T è la superficie interna della cella lungo la quale avviene il trasferimento del calore.

8. Temperatura dell'hot gas layer

La potenza dissipata verso l'esterno per effetto del flusso di massa uscente dalla cella può essere stimata a partire dal flusso di massa uscente dalla cella $\dot{m}_g$, il quale può essere espresso attraverso la seguente espressione derivata dal bilancio delle masse per la cella:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} (H_0 - H_n)^{3/2} \quad (8.4)$$

Dove C_d è un coefficiente di deflusso, W è la larghezza dell'apertura (m), H_n è l'altezza del piano neutro (m). I pedici g e a identificano le proprietà che fanno riferimento allo strato di fmi e di aria indisturbata rispettivamente.

Introducendo l'ipotesi di gas ideale, è possibile ottenere la seguente espressione:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{2g \frac{T_a}{T_g} \left(1 - \frac{T_a}{T_g}\right)} (H_0 - H_n)^{3/2} \quad (8.5)$$

Poichè l'altezza del piano neutro H_n non è nota a priori viene espressa in termini di una generica funzione delle variabili note, inoltre il prodotto $W \cdot H_0^{3/2}$ può essere scritto nella forma equivalente $A_0 \sqrt{H_0}$, ossia il fattore di ventilazione, si ottiene quindi la seguente espressione:

$$\dot{m}_g = \rho_a \sqrt{g} A_0 \sqrt{H_0} \cdot f(T_g, HRR, A_0, H_0) \quad (8.6)$$

A partire dalle equazioni 8.3 e 8.2 è possibile ricavare una espressione per l'aumento di temperatura dell'hot gas layer $\Delta T = T_g T_a$:

$$\Delta T = \frac{HRR}{\dot{m}_g c_p + h_k A_T} \quad (8.7)$$

Questa equazione però non può essere risolta direttamente in quanto l'altezza del piano neutro non è nota e la sua determinazione richiede l'impostazione del bilancio dei flussi di massa per la cella esaminata, il quale però deve essere risolto per iterazioni successive.

Questo problema è stato risolto da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) hanno definito una serie di variabili adimensionali introducendole nell'equazione 8.7, quindi attraverso i risultati di prove sperimentali hanno determinato alcune costanti che consentono di risolvere agevolmente l'equazione 8.7.

L'equazione 8.7 può essere espressa in forma adimensionale, dividendo entrambi i membri per T_a :

$$\frac{\Delta T}{T_a} = \frac{HRR}{\dot{m}_g c_p T_a + h_k A_T T_a} = \frac{HRR / (\dot{m}_g c_p T_a)}{1 + \frac{h_k A_T}{\dot{m}_g c_p}} \quad (8.8)$$

Sostituendo a $\dot{m}_g$ l'equazione 8.6, è possibile esprimere il rapporto $\Delta T/T_a$ in funzione di due gruppi adimensionali:

$$\frac{\Delta T}{T_a} = f \left(\frac{HRR}{\sqrt{g} \rho_a c_p T_a A_0 \sqrt{H_0}}, \frac{h_k A_T}{\sqrt{g} \rho_a c_p A_0 \sqrt{H_0}} \right) \quad (8.9)$$

McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) hanno ipotizzato che la funzione incognita f possa essere espressa nella forma:

8.1. Stima di T_{HGL}

$$\frac{\Delta T}{T_a} = C \cdot X_1^N \cdot X_2^M \quad (8.10)$$

Al fine di determinare le costanti C, N ed M, gli autori hanno analizzato oltre 100 esperimenti considerando sia fuochi con HRR costante, sia crescente con andamento parabolico (t-quadro). Il combustibile utilizzato varia da gas a legno a materiale plastico. Le dimensioni dei volumi considerati variano da quelli tipici di una stanza (circa 30 m³) fino a circa 3 m³. Sono state considerate diverse tipologie di aperture e una varietà di materiali per le pareti.

Linearizzando l'equazione 8.10, le tre costanti sono state determinate attraverso una regressione lineare dei dati sperimentali.

L'equazione così ottenuta da McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) è la seguente:

$$\frac{\Delta T}{T_a} = 1.63 \left(\frac{HRR}{\sqrt{g} \rho_a c_p T_a A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g} \rho_a c_p A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{-1/3} \quad (8.11)$$

L'equazione 8.11 può essere espressa in forma più compatta utilizzando dei valori convenzionali per le seguenti variabili: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $T_a = 293 \text{ K}$, $c_p = 1.05 \text{ kJ/kgK}$, si ottiene l'equazione 6.16:

$$T_{HGL} = 293 + 6.85 \left(\frac{HRR^2}{A_0 \sqrt{H_0} \cdot h_k \cdot A_T} \right)^{1/3}$$

Dove T_{HGL} è la temperatura dell'hot gas layer in K. A rigore l'area A_T interessata dallo scambio termico sarebbe solo quella a contatto con lo strato di fumi caldi, tuttavia poiché questo varia in funzione del tempo e non è noto a priori, McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) hanno assunto che A_T sia pari all'intera superficie interna della cella.

8.1.1 Il coefficiente di trasmissione del calore efficace h_k

Il coefficiente h_k può essere calcolato a partire dall'equazione di trasmissione del calore attraverso le pareti della cella. Introducendo l'ipotesi che la temperatura delle superfici interne sia pari alla temperatura dello strato di fumi T_{HGL} e che le pareti della cella possano essere considerate come degli elementi di spessore semi-infinito, risolvendo l'equazione della conduzione si ottiene la seguente espressione che descrive il flusso termico specifico $\dot{q}''$ (kW/m²) trasmesso per conduzione attraverso la parete:

$$\dot{q}'' = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{k \rho c}{t}} \cdot (T_{HGL} - T_a) \quad (8.12)$$

k , ρ , c sono rispettivamente la conducibilità, la densità e calore specifico del materiale che costituisce le pareti.

Nel caso in cui le pareti della cella siano molto sottili o per tempi di esposizione molto lunghi, per cui la trasmissione del calore diventa stazionaria, il flusso termico specifico $\dot{q}''$ (kW/m²) trasmesso per conduzione attraverso la parete diventa:

$$\dot{q}'' = \frac{k}{\delta} \cdot (T_{HGL} - T_a) \quad (8.13)$$

dove δ è lo spessore delle pareti.

Il tempo necessario perchè si instauri il regime di trasmissione del calore stazionario è determinato attraverso l'espressione:

$$t_p = \frac{\delta^2 \rho c}{4k} \quad (8.14)$$

Questo tempo descrive l'istante in cui la superficie esterna della parete subisce un incremento di temperatura pari a circa il 15% dell'incremento di temperatura sulla faccia interna.

A partire da queste considerazioni McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) hanno definito il coefficiente di trasmissione del calore efficace come:

$$h_k = \sqrt{\frac{k \rho c}{t}} \quad (8.15)$$

per $t < t_p$, e

$$h_k = \frac{k}{\delta} \quad (8.16)$$

per $t \geq t_p$.

8.1.2 Limiti di applicabilità

La metodologia MQH si presenta come uno strumento estremamente utile per effettuare valutazioni delle temperature raggiunte in un ambiente confinato a causa di un incendio con HRR noto, presenta tuttavia alcune limitazioni. Il limite principale della metodologia risiede nel fatto che i coefficienti che consentono di risolvere l'equazione sono determinati a partire da una regressione di dati sperimentali derivati da esperimenti in ambienti confinati di piccole dimensioni (volumi compresi tra circa 3 e 30 m³). Le differenze di temperature misurate nelle prove variano tra circa 20 °C e 600 °C. Nelle prove inoltre il fuoco era posto lontano dalle pareti. In conseguenza di ciò, si possono desumere le seguenti limitazioni nell'impiego della metodologia:

- L'incremento di temperatura nello scenario considerato deve essere compreso tra 20 e 600 °C;
- Poiché il metodo si basa sull'ipotesi che vi siano perdite di energia per effetto ei flussi di massa uscente dalla cella attraverso le aperture, la sua applicazione deve essere valutata con attenzione nel caso di ambienti in cui vi è accumulo significativo di fumi prima che questi possano defluire verso l'esterno (ambienti alti con aperture poste in basso o ambienti con volumi molto grandi, in cui è necessario un tempo significativo prima che i fumi raggiungano le aperture);
- Il regime di combustione all'interno dell'ambiente deve essere controllato dal combustibile. L'HRR che caratterizza l'incendio può essere costante oppure variabile nel tempo.

8.1. Stima di T_{HGL}

Tabella 8.1: Riassunto principali caratteristiche dei set di esperimenti considerati da Overholt (2014). D, diametro equivalente del fuoco; H, W, L altezza, larghezza e lunghezza della cella.

ID test	HRR (kW)	D (m)	H (m)	W (m)	L (m)
LLNL Enclosure	50÷400	0.6	4.5	4.1	5.9
NBS Multi-Room	110	0.3	2.4	2.4	12.2
NIST/NRC	350÷2200	1	3.8	7.2	21.7
Steckler	31.6÷158	0.3	2.1	2.7	2.7
WTC	1970÷3240	1.6	3.8	3.4	6.8

Con riferimento alle limitazioni individuate, Bukowski (2001) sostiene che la metodologia può essere applicata per stimare le temperature dell'hot gas layer in ambienti di dimensioni in pianta fino a 30 m x 30 m e altezza inferiore a 6 m. Più recentemente Overholt (2014) in uno studio per la validazione di alcune equazioni analitiche comunemente impiegate nella fire safety engineering, ha confrontato le temperature dell'hot gas layer misurate in cinque serie di esperimenti con le temperature ottenute impiegando la metodologia MQH. Le dimensioni degli ambienti e le caratteristiche dei fuochi (diametro equivalente e HRR) considerati sono riassunti in Tabella 8.1.

Adottando la metodologia di analisi descritta in McGrattan et al. (2015b), Overholt (2014) ha ottenuto i risultati rappresentati in Figura 8.2, dove le temperature misurate sono rappresentate sull'asse orizzontale e quelle previste dall'equazione 6.16 sull'asse verticale. Se la previsione e la misurazione sono uguali, allora il punto risultante cade sulla linea bisettrice. Per fare un uso migliore di questi risultati, sono stati calcolati due parametri statistici adottando la metodologia di analisi descritta in McGrattan et al. (2015b).

Il primo parametro, δ , è il bias factor, che indica se la grandezza prevista, in media, sotto ($\delta < 1$) o sovra-stima ($\delta > 1$) le misurazioni di una data quantità. Si presume che le misure sperimentali siano caratterizzati da un bias factor pari a 1.

Il secondo parametro, σ_M , è la deviazione standard relativa del modello considerato (in questo caso la correlazione MQH), che descrive la sua variabilità e quindi quella della grandezza stimata. L'incertezza delle misure sperimentali è descritta attraverso la deviazione standard relativa, σ_E , determinata in base agli errori sistematici e casuali che caratterizzano le misure (maggiori dettagli sono contenuti in McGrattan et al. (2015b)). Se il modello presenta la stessa accuratezza delle misure sperimentali rispetto alle quali viene confrontato, le due grandezze σ_E e σ_M dovrebbero coincidere.

Le analisi effettuate da Overholt (2014) mostrano che la metodologia MQH tende a sovrastimare le temperature in media di un valore pari al 17%. La deviazione standard delle temperature previste (σ_M) è pari a 0.15.

Non sono stati individuati altri studi in cui le previsioni ottenute applicando la metodologia MQH sono confrontati con i risultati di prove o modelli di simulazione per ambienti con dimensioni maggiori rispetto a quelle riassunte in Tabella 8.1.

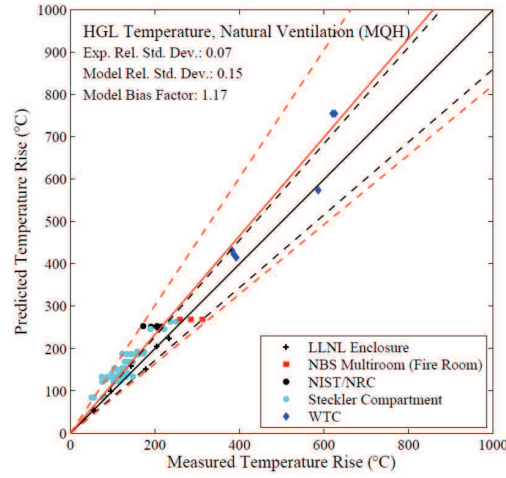


Figura 8.2: Confronto tra T_{HGL} stimato con la metodologia MQH e misurati sperimentalmente. Le linee nere tratteggiate, indicano l'incertezza delle misure sperimentali, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_E$, che corrisponde a un intervallo di confidenza al 95%. Le linee rosse tratteggiate, indicano l'incertezza delle temperature previste, la pendenza è pari a $\delta \pm 2\sigma_M$ (Tratto da Overholt (2014)).

8.2 Applicazione della metodologia MQH per la rapida valutazione delle avversità

Karlsson e Quintiere (2000) hanno suggerito che la temperatura dell'hot gas layer possa essere adottata come principale indicatore del livello di avversità indotto da un incendio in un ambiente confinato, consentendo di evidenziare l'insorgere di condizioni di pericolo per le persone, i beni e la stabilità strutturare.

Una analisi della letteratura ha consentito di individuare i valori di soglia della temperatura dell'hot gas layer indicativi dell'insorgere di condizioni potenzialmente critiche per i bersagli esposti (Tabella 8.2). È utile osservare che gli effetti avversi associati alle temperature indicate in Tabella 8.2 non si manifestano istantaneamente al raggiungimento delle temperature indicate, ma dopo un certo tempo di esposizione a tali condizioni avverse. Ai fini del presente metodo speditivo di valutazione delle avversità indotte dall'incendio tuttavia, si considera che gli effetti avversi si manifestino istantaneamente al raggiungimento della temperatura critica nella cella considerata, questa semplificazione è a favore di sicurezza.

A partire dalla considerazione che la metodologia MQH (equazione 6.16) consente di valutare il livello di avversità all'interno di una cella generica in termini di temperatura dell'hot gas layer a partire dall'HRR del fuoco e dalle caratteristiche della cella, è possibile effettuare una rapida stima del livello di avversità raggiungibile all'interno di una cella semplicemente confrontando l'HRR del fuel package presente al suo interno con l'HRR necessario a raggiungere una determinata temperatura critica.

Si è sviluppata una procedura che consente la rapida stima delle avversità (attraverso la temperatura dell'hot gas layer), tenendo conto dei limiti di applicabilità della metodologia MQH. La procedura può essere così riassunta:

8.2. Applicazione della metodologia MQH per la rapida valutazione delle avversità

Tabella 8.2: Impatto delle temperature dell'hot gas layer (T_{HGL}) sui bersagli esposti.

T_{HGL} (°C)	Descrizione e criticità
200	Questa temperatura rappresenta il limite di sostenibilità per le persone (ISO/TR 16738 2009). Il flusso termico radiante prodotto dai fumi caldi può arrivare a 3 kW/m^2 , questo valore non è sufficiente per la propagazione dell'incendio ad oggetti distanti dalla fiamma (Bukowski 2001; Clarke et al. 1990). I materiali da costruzione subiscono solo modifiche minori e trascurabili (Kodur e Harmathy 2002; Purkiss 2007).
350÷400	A queste temperature il flusso termico radiante dai fumi caldi può arrivare ai 10 kW/m^2 , può essere sufficiente per la propagazione dell'incendio ad oggetti facilmente infiammabili distanti dalla fiamma (Bukowski 2001; Clarke et al. 1990; Quintiere e McCaffrey 1980). Queste temperature non sono sufficienti per avviare al flashover e quindi alla propagazione dell'incendio a tutti gli oggetti presenti. Le proprietà meccaniche di molti materiali da costruzione (in particolare alluminio, acciaio e calcestruzzo) iniziano a modificarsi in modo significativo, peggiorandosi (Kodur e Harmathy 2002; Purkiss 2007).
500	L'incendio può raggiungere la condizione di flashover. L'irraggiamento dai fumi caldi arriva a valori prossimi ai 30 kW/m^2 , sufficienti ad accendere la maggior parte dei materiali combustibili presenti (Bukowski 2001; Clarke et al. 1990; Quintiere e McCaffrey 1980). L'incendio può quindi propagarsi a tutti gli oggetti all'interno della cella e può anche estendersi all'esterno della stessa. Le proprietà meccaniche di molti materiali da costruzione (alluminio, acciaio e calcestruzzo) peggiorano drasticamente e si possono avere collassi di elementi strutturali (Kodur e Harmathy 2002; Purkiss 2007).

- Poiché la metodologia MQH vale solo in condizioni di combustione controllata dal combustibile (fuel-controlled), in base alle aperture presenti nella cella è necessario calcolare l'HRR massimo in funzione delle condizioni di ventilazione (equazione 6.6):

$$HRR_{max_{vent}} = 1518 \cdot A_0 \sqrt{H_0}$$

- Si stima quindi l'HRR caratteristico del fuel package presente all'interno della cella esaminata con i metodi descritti nel Capitolo 7;
- Se l'HRR massimo del fuel package (HRR_p) è minore dell'HRR massimo in funzione delle condizioni di ventilazione ($HRR_{max_{vent}}$), allora la temperatura viene calcolata introducendo HRR_p nell'equazione 6.16;
- Se invece l'HRR massimo del fuel package (HRR_p) è maggiore dell'HRR massimo in funzione delle condizioni di ventilazione ($HRR_{max_{vent}}$) si utilizza quest'ultimo valore nell'equazione 6.16.

Poiché la metodologia MQH, per le sue caratteristiche di rapidità e semplicità di utilizzo, è particolarmente indicata per essere utilizzata nell'ambito di INSPECT, è stato condotto uno studio volto a confrontare le previsioni ottenute con l'equazione 6.16, applicando la procedura proposta a un set di scenari. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli derivati dalla modellazione degli stessi scenari con il modello di simulazione fluidodinamico Fire Dynamics Simulator (versione 5, McGrattan et al. (2015a)).

8.3 Confronto con i risultati di FDS

Allo scopo di valutare le capacità dell'equazione MQH per prevedere la temperatura dello strato di gas caldi, si è definito un set di dodici semplici celle, le cui caratteristiche geometriche sono riassunte in Tabella 8.3.

Sono stati considerati due fattori di ventilazione ($A_0\sqrt{H_0}$): il primo di $2.8 \text{ m}^{5/2}$, che corrisponde ad una apertura di 1 m di larghezza e 2 m di altezza, il secondo è $12.5 \text{ m}^{5/2}$, che corrisponde a due aperture di 1 m di larghezza e 2 m ed un'apertura 2.4 m di larghezza e 2 m di altezza. Il coefficiente di trasmissione del calore h_k dipende dalle proprietà termiche dei materiali di contorno della cella, nel presente studio si è ipotizzato che tutti gli elementi di contorno (pareti, soffitto e pavimento) siano realizzati in calcestruzzo con le seguenti proprietà: spessore di 0.2 m, densità 2.300 kg/m^3 , conducibilità termica 1.2 W/(m K) e calore specifico 0.88 kJ/(kg K) .

Per ciascuna delle celle individuate sono stati considerati tre fuel packages ideali, il cui l'HRR massimo (HRR_p) è stato ottenuto a partire dalla metodologia MQH (eq. 6.16), imponendo come temperatura dell'hot gas layer (T_{HGL}) i tre valori indicati in Tabella 8.2 dopo 15 minuti di durata dell'incendio. Questo tempo è rappresentativo del tempo medio di arrivo delle squadre dei Vigili del Fuoco per interventi in caso di incendio (Regione Veneto: 14.7 min, Regione Friuli Venezia Giulia 15.8 min (CNVVF 2014)). Per ogni cella è stato calcolato anche l'HRR massimo in funzione della ventilazione. I risultati sono riportati in Tabella 8.4.

Al fine di verificare le capacità della procedura proposta di valutare le temperature dell'hot gas layer anche nel caso di fuochi con HRR crescente con andamento parabolico (t-squared fire), sono stati considerati gli scenari in Tabella 8.5.

Questi scenari sono stati modellati attraverso il modello di simulazione FDS (Fire Dynamics Simulator) con lo scopo di verificare le capacità predittive dei livelli di avversità (T_{HGL}) stimati della metodologia MQH attraverso la procedura proposta.

Tabella 8.3: Geometrie delle celle considerate.

Enclosure ID	Enclosure geometry (m)	Ventilation factor ($\text{m}^{5/2}$)
A1	6.0 x 6.0 x 3.0	2.8
B1	12.0 x 12.0 x 3.0	2.8
C1	20.0 x 20.0 x 3.0	2.8
A2	6.0 x 6.0 x 3.0	12.5
B2	12.0 x 12.0 x 3.0	12.5
C2	20.0 x 20.0 x 3.0	12.5
A3	6.0 x 6.0 x 6.0	2.8
B3	12.0 x 12.0 x 6.0	2.8
C3	20.0 x 20.0 x 6.0	2.8
A4	6.0 x 6.0 x 6.0	12.5
B4	12.0 x 12.0 x 6.0	12.5
C4	20.0 x 20.0 x 6.0	12.5

8.3. Confronto con i risultati di FDS

Tabella 8.4: Definizione degli HRR caratteristici di ciascuna cella. Il simbolo * indica i casi in cui HRR_p è maggiore di $HRR_{max_{vent}}$.

Enclosure ID	HRR (kW) of the fuel package for ΔT			$HRR_{max_{vent}}$ (kW)
	200°C	350°C	500°C	
A1	686	1589	2714	4250
B1	1195	2765	4722*	4250
C1	1856	4297*	7336*	4250
A2	1442	3338	5700	19886
B2	2551	5906	10084	19886
C2	3982	9219	15741	19886
A3	843	1951	3331	4250
B3	1380	3195*	5495*	4250
C3	2059	4768*	8141*	4250
A4	1785	4132	7056	19886
B4	2953	6837	11674	19886
C4	4421	10236	17477	19886

Tabella 8.5: Definizione degli scenari considerati nel caso di t-squared fire.

Enclosure ID	Growth rate	Tempo massimo (s)	HRR finale (kW)
A1	S	950	2708
	M	500	3000
	F	300	4230
	UF	150	4275
B1	S	1200	4320
	M	650	5070
	F	350	5758
	UF	200	7600
C1	S	1470	6483
	M	800	7680
	F	450	9518
	UF	250	11875
A3	S	1050	3308
	M	560	3763
	F	300	4230
	UF	150	4275
B3	S	1300	5070
	M	700	5880
	F	400	7520
	UF	200	7600
C3	S	1500	6750
	M	900	9720
	F	500	11750
	UF	250	11875

8.3.1 Il modello di simulazione FDS

FDS (Fire Dynamics Simulator) è un modello di fluidodinamica computazionale (CFD) sviluppato dalla divisione di ricerca sugli incendi del Building and Fire Research Laboratory del NIST (National Institute of Standards and Technology) e dedicato all'analisi del moto dell'aria determinato da effetti termici (McGrattan et al. 2015a).

FDS risolve numericamente una forma approssimata delle equazioni di Navier-Stokes specifica per basse velocità (low Mach number) e per flussi generati da fenomeni termici, con particolare attenzione al trasporto di calore e fumi, tipici degli incendi. L'aspetto computazionale può essere affrontato sia con la simulazione LES (Large Eddy Simulation, usato come default dal programma) sia con la simulazione DNS (Direct Numerical Simulation). Il modello adotta una griglia rettilinea e quindi tutta la geometria deve essere descritta adottando una maglia rettangolare.

FDS può essere utilizzato in modo affidabile quando l'HRR rilasciato dall'incendio è impostato come input e il principale scopo delle simulazioni è l'analisi del trasporto di calore e dei prodotti della combustione.

Le precisioni di calcolo sono comunque influenzate dalla dimensione delle celle che compongono la mesh. Questa come detto deve essere rettilinea e ciò può rappresentare una limitazione nel caso di forme complesse e non approssimabili a composizioni di parallelepipedi. Inoltre, il numero di celle deve essere adeguato alla grandezza del fenomeno che si intende analizzare, infatti la risoluzione spaziale con cui vengono risolte le equazioni di Navier-Stokes è un elemento importante che influisce sui risultati della simulazione. La dimensione della mesh più appropriata per lo specifico problema da analizzare deve essere determinata a partire da una "analisi di sensitività della mesh" che consiste nel ripetere la simulazione più volte riducendo progressivamente la dimensione della griglia con cui viene suddiviso il dominio di calcolo e arrestandosi quando le variazioni dei dati di output rispetto a quelli ottenuti con mesh più grossolane non sono più significative. La decisione finale sulla risoluzione della mesh da utilizzare dipenderà quindi sia dal grado di precisione dei risultati della simulazione che si intendono ottenere, sia dai tempi di calcolo che aumentano notevolmente all'aumentare delle celle che compongono il dominio.

Una misura della bontà della risoluzione di una mesh, in relazione al campo di flusso a cui è applicata è data dalla grandezza adimensionale D^*/δ_x detta *plume resolution index*, dove D^* è il diametro caratteristico del fuoco espresso dalla seguente formula e δ_x la grandezza nominale di una cella della mesh:

$$D^* = \left(\frac{HRR}{\rho c_p T_a \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (8.17)$$

Questo rapporto rappresenta il numero di celle che coprono il diametro caratteristico del fuoco.

FDS implementa tre modelli di combustione caratterizzati da livelli crescenti di complessità. Nel presente lavoro si è fatto riferimento al modello più semplice, chiamato "simple chemistry approach", il quale prevede che la reazione di combustione sia infinitamente veloce e controllata esclusivamente dal mescolamento di combustibile a aria (*mixed is burnt*). Il limite principale di questo modello è che esso presuppone che combustibile e ossigeno reagiscano sempre tra loro, senza tenere in considerazione le condizioni locali in termini di temperatura e delle

8.3. Confronto con i risultati di FDS

relative concentrazioni. per superare i limiti del modello *mixed is burnt*, FDS utilizza dei criteri di natura empirica per controllare la reazione di combustione in funzione alle condizioni locali in termini di temperatura o della concentrazione di ossigeno che caratterizza una singola cella della griglia numerica.

I principali parametri di input richiesti da FDS sono le caratteristiche geometriche dello scenario da modellare e i riferimenti spaziali necessari per la creazione della griglia di calcolo da applicare al dominio. I materiali sono definiti con le loro grandezze fisiche e chimiche caratteristiche quali: densità, calore specifico, conduttività, spessore, reazione al fuoco, potere calorifico. I prodotti della combustione vengono calcolati a partire da: formula chimica del combustibile, le frazioni di massa di combustibile convertite in CO, particolato (soot) e H₂ e il potere calorifico del combustibile.

I principali parametri di output calcolati da FDS sono: temperatura della fase gas, velocità del gas, densità dei gas, concentrazione nel gas delle specie inquinanti (CO, CO₂ ed altre definite dall'utente), concentrazione di fumo e stima della visibilità, pressione. Il rilascio termico totale (HRR) e flussi di massa ed energia attraverso le aperture. Tempo di attivazione dei sistemi di protezione attiva (evacuatori di fumo, sprinkler), portata in massa delle gocce d'acqua provenienti da un sistema sprinkler. È anche possibile determinare grandezze tipiche dei modelli a zone come la temperatura dello strato libero da fumi (lower layer) e dello strato occupato dai fumi caldi (hot gas layer), altezza dell'interfaccia tra gli strati.

Validazione di FDS

In generale con il termine di validazione si intende definire il processo che porta a determinare quanto accuratamente un modello matematico descrive o predice un fenomeno reale di interesse (ASTM, 2011)

Secondo McGrattan et al. (2015b) dire che FDS è validato significa che l'utente ha verificato l'incertezza delle previsioni fornite dal modello per una data applicazione e ha deciso che il suo utilizzo sia appropriato. L'incertezza delle previsioni di FDS in relazione alle diverse quantità di output (ad esempio temperature dei fumi, altezza dello strato di fumi, flussi termici dalle fiamme, visibilità,...) è stata determinata attraverso il confronto con misure raccolte in numerose serie di esperimenti sia in scala reale che in scala ridotta. Le incertezze calcolate, i dati relativi agli esperimenti considerati e i principali parametri che descrivono la risoluzione numerica delle modellazioni effettuate, alle quali fanno riferimento le incertezze determinate, sono raccolti nella Validation Guide (McGrattan et al. 2015b). Deve essere cura dell'utilizzatore di FDS verificare se le incertezze del modello sono compatibili con l'obiettivo della modellazione.

8.3.2 Risultati e discussione

Studio di sensitività

Prima di effettuare il confronto tra le previsioni della correlazione MQH ed i risultati di FDS è stato effettuato uno studio di sensitività finalizzato a verificare in che misura i risultati di FDS dipendono dalle dimensioni della griglia. Si è assunto come riferimento lo scenario A1 riportato in tabella 8.3. Il fuoco è stato modellato come una superficie quadrata di lato 1 m, posta al centro del dominio

8. Temperatura dell'hot gas layer

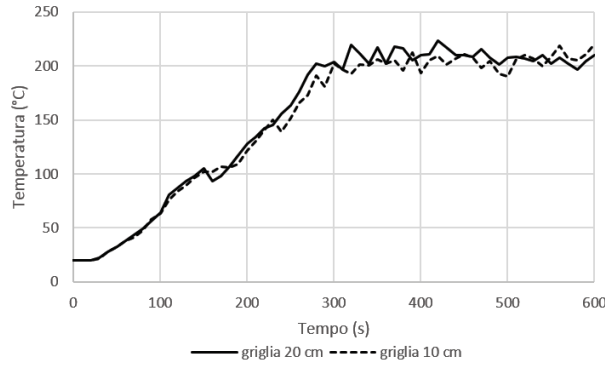


Figura 8.3: Andamento della temperatura dell'hot gas layer in funzione della risoluzione numerica.

di calcolo e l'HRR imposto in input è stato mantenuto costante per l'intera durata delle simulazioni (600 s). Ai fini del presente studio sono state misurate le temperature dell'hot gas layer T_{HGL} . Sono stati posizionati otto sensori per la misura della temperatura dello strato di fumi caldi.

Si sono considerate due dimensioni della griglia che suddivide il dominio di calcolo: 10 cm e 20 cm. I risultati ottenuti sono illustrati in figura 8.3. Il confronto tra i due casi ha mostrato differenze relative nella stima delle temperature dell'hot gas layer inferiori al 15 %. Queste differenze possono ritenersi non significative, di conseguenza per tutti gli scenari si è adottata la griglia da 20 cm, scelta che consente di ridurre i tempi di calcolo in particolare per gli scenari caratterizzati dai volumi maggiori.

HRR costanti

Gli scenari definiti in Tabella 8.4 sono stati modellati con FDS. Il fuoco è stato modellato come una superficie quadrata di lato variabile da 1 a 2 m, posta al centro del dominio di calcolo e l'HRR imposto in input è stato mantenuto costante per l'intera durata delle simulazioni (900 s).

Poiché gli output in FDS sono misurati in punti specificati dall'utente all'interno del dominio, in ogni scenario sono state definite le posizioni dei sensori per la misura delle quantità di interesse. I sensori sono stati distribuiti all'interno del dominio secondo una maglia regolare con passo pari a $1/6$ del lato della cella per un totale di 24 sensori. I dati ottenuti sono quindi stati mediati su tutti i sensori, avendo cura di escludere dall'analisi quelli eventualmente investiti direttamente dalle fiamme. Ai fini del presente studio sono state misurate le temperature dell'hot gas layer T_{HGL} .

Avendo definito la dimensione della griglia numerica in 20 cm per tutti i casi in tabella 8.4 è stato quindi calcolato il *plume resolution index* attraverso l'equazione 8.17. I valori così ottenuti sono stati confrontati con i valori di riferimento indicati nella guida di validazione di FDS (McGrattan et al. 2015b) per l'output di interesse (T_{HGL}). Nel caso specifico della temperatura dell'hot gas layer, l'incertezza delle previsioni di FDS è $\sigma_{FDS}=0.15$ con un fattore di tendenza pari a 0.97 (McGrattan et al. 2015b). Queste stime sono state ottenute per un *plume resolution index* variabile tra 1 e 12.

8.3. Confronto con i risultati di FDS

Negli scenari modellati in questo studio il *plume resolution index* varia tra 4 e 15, per cui la risoluzione numerica è comparabile con quella degli esperimenti di riferimento e si può ritenere che la precisione delle previsioni sia comparabile con quella definita in (McGrattan et al. 2015b).

In un primo step non si è applicata la limitazione dell'HRR che può effettivamente essere rilasciato nei volumi considerati in funzione della ventilazione ed è stato dato in input a FDS l'HRR di picco (HRR_p) del fuel package come definito in Tabella 8.4. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati confrontati con le previsioni ottenute attraverso l'applicazione della metodologia MQH per ciascuno degli scenari considerati (Figura 8.4 (a)).

Il regime di combustione che caratterizza uno scenario è stato determinato confrontando l'HRR dato in input al programma con l'HRR effettivamente riscontrato nella simulazione: nel caso di combustione controllata dalla ventilazione l'HRR in output devia sensibilmente da quello dato in input. Queste condizioni sono state riscontrate negli scenari con fattore di ventilazione pari a $2.8 \text{ m}^{5/2}$ in cui l'HRR in input è maggiore dell'HRR massimo in funzione della ventilazione (Tabella 8.4). In questi casi la metodologia MQH sovrastima le temperature fino al 100%, di conseguenza non è applicabile in questi casi.

L'applicazione integrale della procedura delineata invece, quindi con introduzione di un valore massimo per l'HRR in funzione delle caratteristiche di ventilazione, consente di evitare questo problema.

L'analisi dei risultati delle simulazioni ha inoltre evidenziato che quando l'HRR raggiunge un valore variabile tra lo 0.7 e lo 0.75 dell'HRR massimo in funzione della ventilazione ($HRR_{max_{vent}}$) inizia una transizione tra il regime di combustione governato dal combustibile e quello governato dalla ventilazione.

È stata quindi introdotta la seguente condizione per l'HRR massimo:

$$HRR_{max} = \min(HRR_p; \beta_{vent} \cdot HRR_{max_{vent}}) \quad (8.18)$$

Dove $\beta_{vent} = 0.7$ è il coefficiente osservato sperimentalmente dall'analisi delle simulazioni.

Il confronto tra le temperature ottenute con la metodologia MQH e dalle simulazioni con FDS introducendo in input l'HRR definito dall'equazione 8.18 è riportato in Figura 8.4 (c). In questo caso si osserva che le temperature ottenute attraverso la metodologia MQH rientrano nel campo di incertezza proprio di FDS, con una sovrastima massima del 40% e una sottostima massima del 10%.

Negli scenari con fattore di ventilazione $12.5 \text{ m}^{5/2}$ le temperature ottenute dalla applicazione della metodologia MQH rientrano nel campo di incertezza delle previsioni di FDS, in questo caso si osserva una sottostima massima inferiore al 30% rispetto ai risultati ottenuti da FDS.

HRR crescenti con andamento αt^2

I risultati ottenuti dal confronto tra le temperature stimate con la metodologia MQH e le temperature previste da FDS per i corrispondenti scenari sono riportate in Figura 8.5 per le diverse tipologie di ambienti considerati. Per il confronto si è proceduto individuando alcuni tempi e calcolando il corrispondente HRR in funzione dello specifico growth factor del caso considerato e quindi la temperatura corrispondente attraverso la metodologia MQH che è stata poi confrontata con le corrispondenti previsioni ottenute da FDS.

8. Temperatura dell'hot gas layer

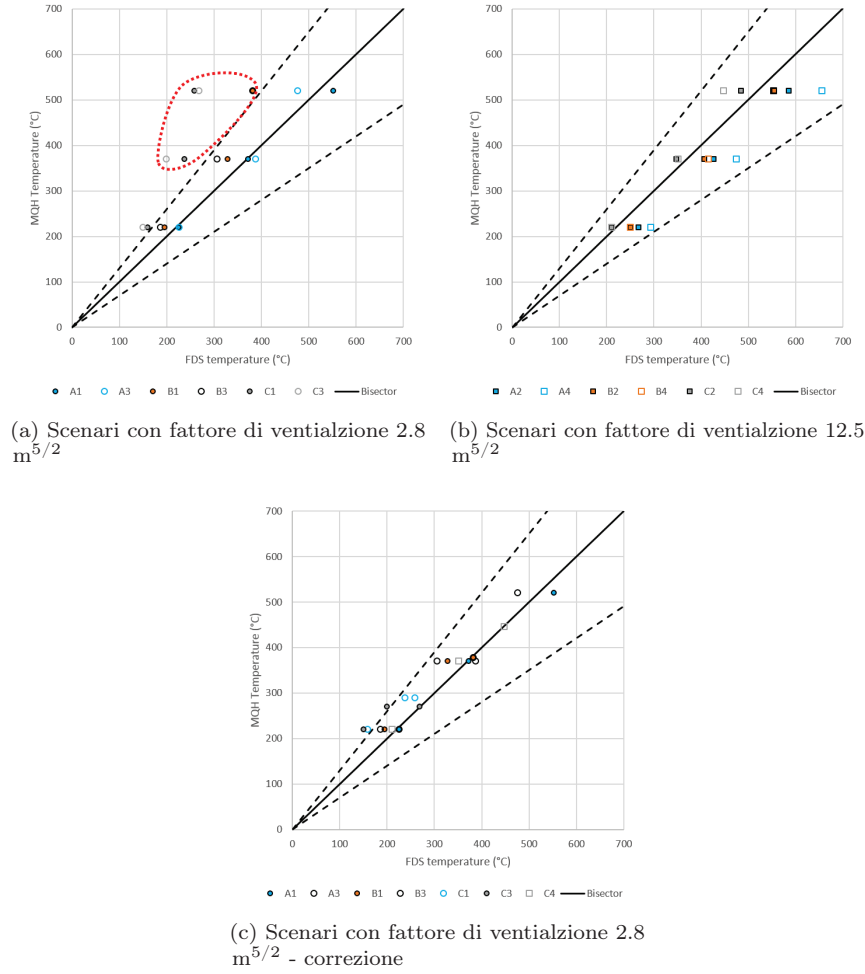


Figura 8.4: Confronto tra le temperature ottenute dalle simulazioni con FDS e le temperature ottenute attraverso la metodologia MQH: (a) scenari con fattore di ventilazione $2.8 \text{ m}^{5/2}$. L'area rossa identifica i casi in cui la combustione è controllata dalla ventilazione. (b) Scenari con fattore di ventilazione $12.5 \text{ m}^{5/2}$. (c) Scenari con fattore di ventilazione $2.8 \text{ m}^{5/2}$ e introduzione della correzione nella procedura. Le linee tratteggiate indicano l'incertezza delle previsioni FDS, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_{FDS}$

8.3. Confronto con i risultati di FDS

Si osserva in generale che le stime ottenute dalla metodologia MQH variano all'interno del campo di incertezza di FDS, i casi con superficie del pavimento 6x6 m, si nota una tendenza a sottostimare le temperature dell'hot gas layer (al massimo del 30%), indipendentemente dalla velocità di crescita del fuoco. Viceversa negli scenari con superficie del pavimento pari a 20x20 m, la metodologia MQH tende a sovrastimare le temperature rispetto a quelle ottenute con FDS, in particolare nel caso con altezza del soffitto pari a 6 m. In questo ultimo caso infatti la sovrastima delle temperature è sempre maggiore al 30%. Questa tendenza è indipendente dalla velocità di crescita del fuoco. Nei casi con superficie del pavimento pari a 12x12 m la metodologia consente una stima delle temperature in linea con le previsioni di FDS.

Le analisi effettuate, mostrano quindi che la correlazione MQH e la procedura delineata per definire l'HRR massimo che può svilupparsi all'interno di una cella sono affidabili e consentono di effettuare una stima della temperatura dell'hot gas layer comparabile con i risultati ottenibili attraverso il modello di simulazione FDS.

I casi esaminati, evidenziano tuttavia che l'applicabilità della metodologia MQH nel caso di celle con una superficie del pavimento circa pari a 20x20 m e altezza 6 m, deve essere valutata con cautela.

8. Temperatura dell'hot gas layer

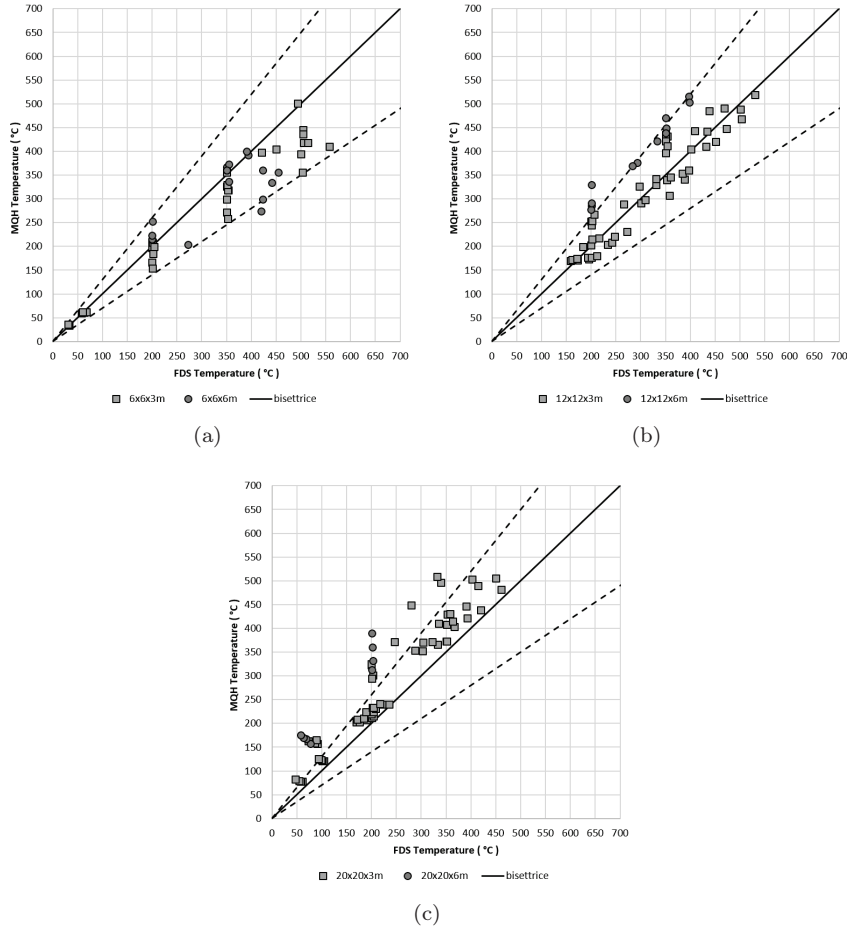


Figura 8.5: Confronto tra le temperature ottenute dalle simulazioni con FDS e le temperature ottenute attraverso la metodologia MQH: (a) Scenari con superficie del pavimento 6x6 m. (c) Scenari con superficie del pavimento 12x12 m. (c) Scenari con superficie del pavimento 20x20 m. Le linee tratteggiate indicano l'incertezza delle previsioni FDS, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_{FDS}$

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 9

Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti

Nel Capitolo 7 si è definito il concetto di fuel package. Uno degli elementi essenziali per l'identificazione dei fuel package è la posizione relativa tra gli oggetti combustibili, questa infatti può favorire la propagazione dell'incendio dall'uno all'altro. Si è evidenziata la necessità di metodi o strumenti analitici che consentano di valutare in modo rapido le distanze per le quali oggetti diversi possono coinvolgersi reciprocamente nell'incendio, tenendo conto delle caratteristiche dei materiali e delle posizioni reciproche.

Nel caso in cui gli oggetti combustibili bersaglio non siano posizionati a diretto contatto o al di sopra di un oggetto in fiamme, all'interno del plume, condizioni per le quali la trasmissione del calore per convezione diventa predominante (Drysdale 2011), queste distanze possono essere determinate a partire dal flusso termico radiativo emesso dalle fiamme e dallo strato di fumi caldi che si accumula all'interno di una cella.

In questo capitolo vengono presentati possibili approcci che consentono una rapida valutazione delle distanze di coinvolgimento dei materiali per effetto di un flusso termico radiativo.

9.1 Flusso termico radiativo emesso dalle fiamme

Le tre modalità fondamentali di trasmissione del calore, cioè la conduzione, convezione e irraggiamento, entrano in gioco in quasi tutti gli scenari di incendio ed hanno un ruolo importante nelle diverse fasi di sviluppo dell'incendio o con riferimento a specifiche problematiche. La propagazione dell'incendio tra gli oggetti presenti all'interno di una cella è dovuta principalmente all'irraggiamento termico emesso dalla fonte di incendio (Karlsson e Quintiere 2000). Un ulteriore contributo è dovuto all'irraggiamento dall'hot gas layer (Clarke et al. 1990).

Al fine di stimare se e quando un oggetto posto in posizione remota rispetto al fuoco può accendersi, è necessario quantificare il flusso termico radiativo ricevuto dall'oggetto o materiale target. Nel determinare il flusso termico trasmesso per

9.1. Flusso termico radiativo emesso dalle fiamme

irraggiamento, ai fini pratici si fa generalmente riferimento al flusso termico massimo ricevuto da un'area infinitesima da una data sorgente (Karlsson e Quintiere 2000). Esiste una varietà di metodi in letteratura che consentono di stimare l'irraggiamento termico in corrispondenza di un bersaglio, ciascuno basato su specifiche ipotesi e approssimazioni relative al fuoco. Tra i modelli più diffusi in letteratura, alcuni ipotizzano che il fuoco possa essere assimilato a una sorgente puntiforme (Modak 1977; NFPA 92b 2009), altri assumono che la fiamma sia un solido cilindrico (Shokri e Beyler 1989; Tien, Lee e Stretton 2002), altri ancora prevedono che la fiamma possa essere schematizzata come un piano verticale (Fleury 2010).

9.1.1 Irraggiamento

L'irraggiamento o radiazione termica è il modo dominante di trasferimento del calore per la propagazione del fuoco all'interno di una cella (Karlsson e Quintiere 2000), infatti è il meccanismo mediante il quale gli elementi posti a distanza da un oggetto in fiamme vengono riscaldati senza essere a contatto diretto con la fiamma.

L'irraggiamento è il trasferimento di energia per effetto delle onde elettromagnetiche. La radiazione termica viene rilevata come calore o luce e rappresenta una stretta finestra nello spettro elettromagnetico che include una piccola parte dei raggi ultravioletti, tutte le regioni della luce visibile e l'infrarosso, corrispondente a lunghezze d'onda comprese tra circa 0,4 e 1000 μm . Nel caso degli incendi, la radiazione termica viene emessa da minuscole particelle di fuliggine che sono presenti in quasi tutte le fiamme a diffusione (Drysdale 2011).

Emissività e potere emissivo

Il potere emissivo totale di una fiamma è una funzione della sua temperatura e della corrispondente lunghezza d'onda, come descritto dalla legge di Planck, facendo riferimento a un radiatore ideale, noto come corpo nero. Tuttavia, le superfici reali non sono radiatori ideali e quindi hanno un potere emissivo minore rispetto a un corpo nero. Il rapporto tra il potere emissivo di una generica superficie a una data temperatura ed il potere emissivo del corpo nero alla stessa temperatura, ossia la massima radiazione emessa possibile da una superficie, è chiamato emissività monocromatica (Karlsson e Quintiere 2000).

Al fine di semplificare i calcoli, viene introdotto il concetto di corpo grigio. Per questo corpo grigio, l'emissività si presume essere indipendente della lunghezza d'onda (Drysdale 2011), inoltre, la legge di Kirchhoff afferma che l'emissività per una superficie è uguale al suo assorbimento. Secondo Karlsson e Quintiere (2000) l'ipotesi corpo grigio è generalmente soddisfacente nel caso di incendi in ambienti confinati.

La radiazione totale emessa E (W/m^2), per unità di area di una superficie grigia è data dall'equazione:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (9.1)$$

Dove ε è l'emissività, σ è la costante di Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$) e T è la temperatura della superficie (K).

9. Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti

Fattori di vista

Per conoscere il flusso termico in corrispondenza di un oggetto vicino, deve essere calcolata la quantità di energia che viene irradiata in quella particolare direzione. Questo può essere fatto utilizzando l'equazione , che introduce il concetto di un fattore di configurazione o fattore di vista:

$$E = F_{12}\varepsilon\sigma T^4 \quad (9.2)$$

Dove F_{12} è il fattore di vista. Questo fattore tiene conto della relazione geometrica tra l'emettitore e il ricevitore e in particolare dipende da tre variabili:

- La geometria di emettitore e ricevitore;
- Se emettitore e ricevitore si possono essere vedere l'un l'altro;
- La "direzione" dello scambio di radiazione termica.

9.2 Modelli per la valutazione dell'irraggiamento

Lo scopo primario della modellazione dell'irraggiamento nell'ambito della fire safety engineering è, di solito, quello di calcolare le distanze di coinvolgimento tra la fonte del fuoco ed i bersagli che potrebbero essere danneggiati o innescati per effetto dell'irraggiamento dalle fiamme. In generale le tre fasi principali che caratterizzano la stima della radiazione termica da un incendio sono le seguenti (Beyler 2002):

1. Determinare le caratteristiche del fuoco, in particolare l'HRR e le dimensioni fisiche del fuoco.
2. Caratterizzare le proprietà radiative del fuoco, ossia determinare il potere emissivo medio delle fiamme.
3. Calcolare il flusso termico radiativo incidente in corrispondenza dell'oggetto bersaglio.

I diversi modelli di radiazione disponibili in letteratura utilizzano i tre steps sopra citati introducendo diversi livelli di semplificazione. Alcuni sono più appropriati per valutazioni speditive, mentre altri sono in grado di fornire previsioni più accurate, anche se è richiesto uno sforzo maggiore in termini di calcolo, in particolare per la definizione dei fattori di vista.

9.2.1 Point-source model

Tra i modelli a disposizione, uno dei più semplici, che consente una rapida stima delle distanze di coinvolgimento tra oggetti è quello proposto da Modak (1977), chiamato "Point-source model". Il modello è stato derivato a partire da osservazioni su pool fires e si basa sulle seguenti ipotesi (figura 9.1):

- L'energia viene emessa da un unico punto situato al centro della fiamma;
- L'energia viene emanata isotropicamente.

9.2. Modelli per la valutazione dell'irraggiamento

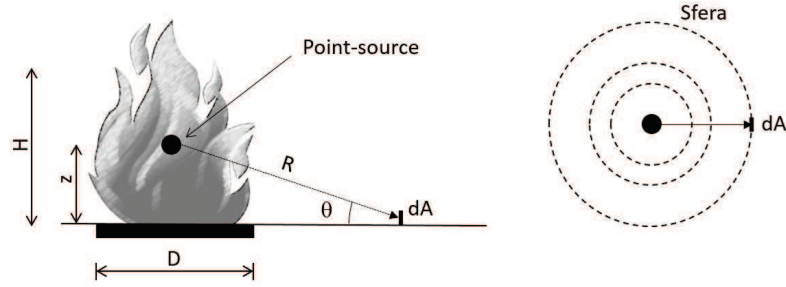


Figura 9.1: Schema di riferimento per il point-source model.

Il modello descrive il flusso termico trasmesso per irraggiamento in corrispondenza di un oggetto bersaglio caratterizzato da un'area infinitesima dA attraverso la seguente equazione 9.3:

$$\dot{q}_{t\ flame}'' = \frac{HRR_r}{4\pi R^2} \cos \theta \quad (9.3)$$

Dove HRR_r è la frazione dell'HRR che viene trasmesso per irraggiamento (kW), θ è l'angolo tra la direzione della normale alla superficie del target e la direzione da cui proviene l'energia e $\cos \theta$ rappresenta il fattore di vista tra la sorgente puntuale e un'area infinitesima, infine R è la distanza tra la sorgente puntiforme ed il target.

La posizione della sorgente si trova al centro del fuoco, in corrispondenza di metà altezza delle fiamme, la quale può essere determinata a partire dalla correlazione di Heskestad (2002):

$$H = 0.23HRR^{2/5} - 1.02D \quad (9.4)$$

La frazione di HRR che viene trasmessa per irraggiamento può essere stimata attraverso l'equazione:

$$HRR_r = \lambda_r \cdot HRR \quad (9.5)$$

Dove λ_r rappresenta la radiative fraction, che dipende dal tipo di combustibile e dalla dimensione della fiamma. Può variare da circa 0.15 per combustibili con bassa produzione di particolato (ad esempio alcool) fino a circa 0.6 per combustibili con alta produzione di particolato come gli idrocarburi. In assenza di determinazioni specifiche, nella pratica della fire safety engineering viene comunemente adottato un valore pari a $0.3 \div 0.35$ (Drysdale 2011).

In NFPA 92b (2009) è presentata una variante rispetto al modello descritto, viene infatti ipotizzato che la sorgente puntuale sia posta a livello della base del fuoco e viene assunto un fattore di vista unitario (superficie target perpendicolare alla direzione della radiazione), si ottiene quindi la seguente equazione:

$$\dot{q}_{t\ flame}'' = \frac{HRR_r}{4\pi R^2} \quad (9.6)$$

Da questa, una volta noto il flusso termico incidente sul target sufficiente a causarne l'accensione (Tabella 7.3), è possibile stimare la distanza di coinvolgimento tra due oggetti:

9. Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti

$$R = \sqrt{\frac{HRR_r}{4\pi\dot{q}''_{t\ flame}}} \quad (9.7)$$

Va osservato che quando il flusso termico in corrispondenza di un target raggiunge o supera il valore sufficiente per la sua accensione $\dot{q}''_{t\ flame}$, l'accensione non è istantanea, ma passa un certo periodo di tempo necessario affinché l'oggetto venga riscaldato e raggiunga la temperatura di accensione o autoaccensione. Esistono diversi modelli che consentono di stimare questi tempi (ad esempio Quintiere (1998)). La loro applicazione tuttavia non è semplice in quanto richiede la determinazione di alcuni parametri che dipendono dalle proprietà dei materiali coinvolti. L'approccio adottato a favore di sicurezza è che se il flusso termico in corrispondenza dell'oggetto bersaglio raggiunge o supera il flusso termico critico, si assume che l'oggetto partecipi all'incendio istantaneamente.

9.2.2 Limiti di applicabilità

Il point-source model è adatto per prevedere le radiazioni da fiamme in corrispondenza di un target quando non sono presenti ostacoli nè fumi tra le fiamme e il target.

L'equazione 9.3, vale nell'ipotesi di pozze circolari, tuttavia può essere applicata anche nel caso di pozze non circolari, calcolandone il diametro equivalente. Nonostante le forti semplificazioni adottate, questo modello viene spesso applicato per determinare le distanze di coinvolgimento o viceversa, di separazione, tra oggetti generici, costituiti da materiale solido come arredi o merci di altro tipo, il cui comportamento in caso di incendio è diverso da quello di un pool fire (si veda ad esempio NFPA 92b (2009)). Il vantaggio principale di questo modello è la semplicità del fattore di vista, che viceversa adottando modelli più raffinati, rappresenta l'ostacolo maggiore. Il modello si presta pertanto ad essere utilizzato per rapide valutazioni preliminari.

Fleury (2010), in uno studio volto a valutare diversi modelli di irraggiamento dalle fiamme, ha confrontato i risultati di sei diversi modelli (point-source model, (Modak 1977); quattro modelli che ipotizzano la fiamma come un solido cilindrico: correlazione e modello dettagliato di Shokri e Beyler (1989), modello di Mudan (1984), modello di Dayan e Tien (1974); modello che considera la fiamma come un piano Fleury (2010)) con un set di prove sperimentali, durante le quali sono state effettuate oltre 3000 misure di flusso termico radiativo, con sensori posizionati in diverse posizioni e con diversi orientamenti rispetto alla fiamma. Nello studio il fuoco era costituito da bruciatori (combustibile propano) con diverse forme, gli HRR considerati sono stati fatti variare tra 100 e 300 kW. I prodotti della combustione sono stati rimossi dall'ambiente al fine di valutare il solo irraggiamento dalle fiamme.

Il modello point-source (equazione 9.3) è stato quello tra i sei modelli considerati nello studio, che ha stimato meglio il flusso di calore radiativo, con un errore medio percentuale rispetto ai dati sperimentali del 29% (sovrastima). L'errore si riduce al 18% quando escludendo dal data set i risultati ottenuti per target orizzontali. Il modello point-source è stato il più robusto dei sei considerati, con nessuna differenza sostanziale negli errori percentuali al variare della forma della sorgente.

9.2. Modelli per la valutazione dell'irraggiamento

Tabella 9.1: Riassunto principali caratteristiche dei set di esperimenti considerati da Overholt (2014). D, diametro equivalente del fuoco; H, W, L altezza, larghezza e lunghezza della cella.

ID test	HRR (kW)	D (m)	H (m)	W (m)	L (m)
Fleury	100÷300	0.3÷0.6	open	open	open
NIST/NRC	350÷2200	1	3.8	7.2	21.7
WTC	1970÷3240	1.6	3.8	3.4	6.8

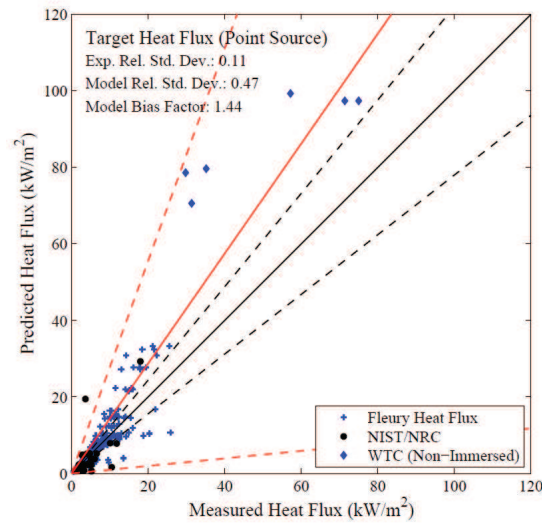


Figura 9.2: Confronto tra flusso termico radiativo stimato con il modello point-source e misurato sperimentalmente. Le linee nere tratteggiate, indicano l'incertezza delle misure sperimentali, la pendenza è pari a $1 \pm \sigma_E$, che corrisponde a un intervallo di confidenza al 95%. Le linee rosse tratteggiate, indicano l'incertezza delle temperature previste, la pendenza è pari a $\delta \pm \sigma_{FDS}$ (Tratto da Overholt (2014))

Più recentemente Overholt (2014) in uno studio per la validazione di alcune equazioni analitiche comunemente impiegate nella fire safety engineering, ha confrontato i flussi termici radiativi misurati in tre serie di esperimenti con le previsioni ottenute impiegando il point-source model. Le principali caratteristiche dei set sperimentali considerati (diametro equivalente e HRR del fuoco, dimensioni dell'ambiente) sono riassunti in Tabella 9.1.

Adottando la metodologia di analisi descritta in McGrattan e Toman (2011), Overholt (2014) ha ottenuto i risultati rappresentati in figura 9.2, dove i flussi termici radiativi misurati sono rappresentati sull'asse orizzontale e quelli previsti dall'equazione 9.3 sull'asse verticale. La rappresentazione e la descrizione delle capacità predittive del modello è analoga a quella già descritta nel Capitolo 8 per le temperature dell'hot gas layer.

Le analisi effettuate da Overholt (2014) mostrano che il point-source model tende a sovrastimare i flussi termici radiativi in media di un valore pari al 44%. La deviazione standard dei flussi termici previsti è pari a 0.47.

Poiché il modello della sorgente puntiforme, per le sue caratteristiche di rapidità e semplicità di utilizzo, sembra particolarmente indicato per essere

9. Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti

Tabella 9.2: Principali caratteristiche degli scenari considerati. D, diametro equivalente del fuoco; H, W, L altezza, larghezza e lunghezza della mesh.

ID test	HRR (kW)	D (m)	H (m)	W (m)	L (m)	D* (m)	D*/ δ_x
P1; P2	100; 400	0.45	3	3	3	0.4; 0.7	7.6; 13.3
P3; P4; P5	600; 800; 1000	0.56	4	3	3	0.8; 0.9; 1	15.6; 17.5; 19.2

utilizzato nell'ambito di INSPECT, è stato condotto uno studio preliminare volto a confrontare le previsioni ottenute con l'equazione 9.7 proposta in NFPA 92b (2009) con i risultati ottenuti attraverso la modellazione degli stessi scenari con il modello di simulazione fluidodinamico FDS (Fire Dynamics Simulator, McGrattan et al. (2015a)).

9.3 Confronto con i risultati di FDS

Per determinare le prestazioni del metodo selezionato (point-source model), le previsioni ottenute dalla sua applicazione a un set di casi di riferimento sono state confrontate con i risultati ottenuti attraverso il modello di simulazione FDS (McGrattan et al. 2015a) per gli stessi scenari.

Di default FDS tratta la miscela di prodotti di combustione come un corpo grigio. Utilizzando questa ipotesi, FDS risolve l'equazione del trasporto radiativo (RTE) utilizzando un algoritmo numerico ai volumi finiti. L'emissività del corpo grigio viene calcolata da FDS attraverso uno specifico modello in funzione della temperatura e delle concentrazioni dei prodotti di combustione (McGrattan et al. 2015a).

La risoluzione spaziale con cui viene risolta l'equazione discretizzata del trasporto radiativo è un elemento importante che influisce sui risultati della simulazione. FDS utilizza di default una discretizzazione di 100 angoli solidi con cui distribuire l'energia radiativa dalle fiamme e dai gas caldi. Di default inoltre il modello assume che il 35% dell'energia prodotta dalla combustione venga trasferita per irraggiamento. I valori di default possono essere modificati dall'utente (McGrattan et al. 2015a). Il flusso termico radiativo in un punto viene misurato inserendo nel modello specifici *devices* che possono essere orientati dall'utente.

9.3.1 Scenari considerati

In ciascuno degli scenari individuati, le cui caratteristiche principali sono riassunte in Tabella 9.2 è stata definita una serie di punti di controllo in cui è stato calcolato il flusso termico radiativo applicando il point-source model in entrambe le versioni (equazione 9.6 (NFPA 92b 2009) e equazione 9.3 (Modak 1977)).

In tutti i casi indicati in Tabella 9.2 sono stati considerati tre set di punti di controllo posti in un piano verticale passante per il centro del fuoco e distribuiti rispettivamente secondo tre altezze rispetto alla base del fuoco, pari rispettivamente a 0.0, 0.3 e 1.2 m. Ogni set è costituito da 6 punti di misura posti

9.3. Confronto con i risultati di FDS

rispettivamente a una distanza dal centro del fuoco di 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 e 1.4 m. La superficie piana infinitesima sulla quale viene calcolato il flusso termico radiativo è stata orientata in modo che la normale fosse orizzontale e diretta verso il fuoco. Il fuoco è stato definito su una superficie quadrata di lato 0.4 m per i casi P1 e P2 e di lato 0.5 m per i casi P3, P4, P5. L'HRR è stato fatto variare come indicato in Tabella 9.2.

Gli stessi scenari sono stati modellati con FDS utilizzando le impostazioni di default per la soluzione del trasporto radiativo e inserendo appositi *devices* per la misura del flusso termico radiativo in corrispondenza dei punti di controllo e orientandoli in modo che la normale al piano che contiene ciascun sensore fosse orizzontale e diretta verso il fuoco. Le condizioni al contorno per la mesh sono state definite come "OPEN", in modo da rappresentare un volume aperto, questo al fine di evitare l'accumulo di fumi ed il riscaldamento delle pareti che a loro volta possono contribuire all'irraggiamento verso il punto di misura. Questa scelta è giustificata dal fatto che il modello point-source non tiene in considerazione questi contributi.

Poiché i risultati delle simulazioni dipendono fortemente dalla dimensione della griglia con cui viene suddiviso il volume di interesse è necessario determinare la dimensione più appropriata per la griglia. Questo è stato effettuato attraverso un *grid sensitivity study* in cui sono state considerate due diverse dimensioni per la griglia: 5 cm, 7.5 cm e 10 cm. Il confronto ha evidenziato che i flussi termici radiativi misurati utilizzando una griglia da 10 cm sono maggiori rispetto a quelli determinati utilizzando una griglia da 5 cm (Un esempio è riportato in figura 9.3). Le differenze medie sono inferiori a 5 kW/m² e crescono in prossimità della fiamma, dove tuttavia è noto che le previsioni di FDS tendono ad essere meno accurate (Stroup e Linderman 2013). Ai fini del presente studio si è ritenuto di adottare una griglia numerica di 5 cm di lato, in quanto consente una discretizzazione delle fiamme in linea con le indicazioni contenute nella *FDS Validation Guide* (McGrattan et al. 2015b). Assumendo come riferimento per la dimensione della griglia un valore di 5 cm, si sono calcolati il *plume resolution index* dato dal rapporto tra il diametro caratteristico del fuoco (D^*) e la dimensione della griglia (δ_x) per tutti i casi esaminati. I valori così ottenuti sono stati confrontati con i valori di riferimento indicati nella guida di validazione di FDS (McGrattan et al. 2015b) per i casi di riferimento rispetto all'output di interesse, nel caso specifico il flusso termico radiativo. I casi per i quali FDS è stato validato in relazione ai flussi termici radiativi, sono gli stessi già riportati in Tabella 9.1. Per questi scenari il *plume resolution index* varia tra 8 e 12. Sulla base del confronto tra le modellazioni e le misure reali effettuate per gli scenari di riferimento, l'incertezza delle previsioni di FDS è $\sigma_M=0.25$ con un fattore di tendenza pari a 0.98 (McGrattan et al. 2015b).

Negli scenari modellati nel presente studio il *plume resolution index* varia tra 7 e 19, per cui la risoluzione numerica è compatibile con quella degli esperimenti di riferimento in McGrattan et al. (2015b).

9.3.2 Risultati e discussione

Assumendo come riferimento le previsioni di flusso termico ottenute attraverso le modellazioni con FDS, si sono confrontati i flussi termici ottenuti con il modello point-source sia nella versione di Modak (1977), sia nella versione proposta in

9. Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti

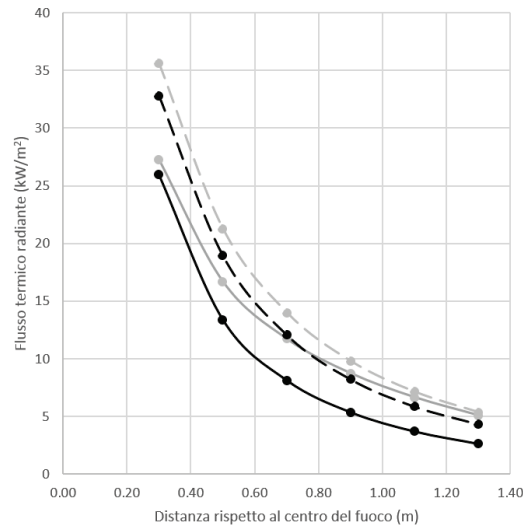


Figura 9.3: Confronto tra i flussi termici stimati da FDS al variare della mesh: 5 cm (linea continua) e 10 cm (linea tratteggiata) per un HRR di 200 kW (in nero) e 300 kW (in grigio).

NFPA 92b (2009), ipotizzando che il 35% dell'energia prodotta dalla combustione venga trasferita per irraggiamento, in linea con le ipotesi di FDS.

Analizzando statisticamente i dati applicando la metodologia descritta in McGrattan e Toman (2011) è stato possibile ottenere la deviazione standard ed il fattore di tendenza del modello point-source rispetto alle previsioni di FDS. I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 9.3 prendendo in considerazione diverse altezze della sorgente puntiforme ideale rispetto alla base del fuoco. I risultati di questa analisi mostrano come la posizione della sorgente puntuale ideale influenzi in modo significativo le previsioni ottenute con il point-source model, in entrambe le versioni.

I risultati ottenuti mostrano come ipotizzare la sorgente puntuale in corrispondenza della base delle fiamme, come si evince da NFPA 92b (2009), porta a ottenere una grande dispersione delle previsioni rispetto alle misure ottenute con FDS e una marcata tendenza a sovrastimare i flussi termici radiativi.

Posizionare la sorgente puntiforme a metà altezza delle fiamme come descritto anche in Drysdale (2011), porta a ottenere grandi dispersioni nelle previsioni dei flussi termici radiativi. Risultati simili sono stati evidenziati anche in NUREG-1824 (2007).

Spostando la sorgente puntiforme a una quota rispetto alla base del fuoco corrispondente a un terzo o un quarto rispetto alla lunghezza della fiamma consente di migliorare sensibilmente le previsioni del flusso termico radiativo riducendo la dispersione dei dati rispetto alle previsioni di FDS. Il modello proposto da Modak (1977) evidenzia una tendenza leggera a sottostimare i flussi termici, viceversa il modello proposto in NFPA 92b (2009) evidenzia una maggiore tendenza a sovrastimare i flussi termici in corrispondenza dei target. Questo è dovuto al fatto che quest'ultimo modello non tiene conto del fattore di vista tra sorgente e bersaglio.

9.4. Flusso termico radiativo emesso dai fumi

Tabella 9.3: Sintesi incertezza modello point-source rispetto alle previsioni ottenute da FDS per diverse altezze della sorgente puntiforme ideale rispetto alla base del fuoco.

Altezza sorgente puntiforme	Modello Modak (1977)		Modello NFPA 92b (2009)	
	Deviazione standard	Fattore di tendenza	Deviazione standard	Fattore di tendenza
H/2	1.16	1.06	0.46	0.89
H/3	0.27	0.80	0.25	1.05
H/4	0.25	0.95	0.25	1.17
0	0.78	1.44	0.60	1.50

Il confronto tra i dati ottenuti con FDS e il point-source model nell'ipotesi in cui la sorgente puntiforme si trovi ad una altezza pari ad un quarto dell'altezza della fiamma, sono stati riportati nella seguente figura 9.4 per gli scenari definiti in tabella 9.2.

L'impiego del modello point-source ai fini di una rapida valutazione delle distanze di coinvolgimento tra oggetti richiede quindi una certa cautela, tuttavia soprattutto la versione proposta in NFPA 92b (2009), considerando la sorgente puntuale posta a un terzo o un quarto dell'altezza della fiamma, porta a ottenere valutazioni generalmente a favore di sicurezza. Va comunque sottolineato che la validità dei risultati ottenuti è limitata ai casi studiati e la loro generalizzazione richiede uno studio più esteso.

È importante sottolineare infine, che esperienze riportate in NUREG-1824 (2007) hanno evidenziato come, in presenza di fumi che contribuiscono all'irraggiamento di un generico target, il modello point-source tende a sottostimare i flussi termici. È quindi necessario introdurre un modello specifico per la valutazione della radiazione termica dallo strato di fumi caldi.

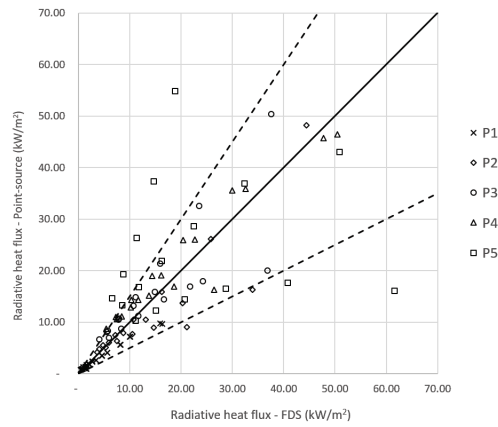
9.4 Flusso termico radiativo emesso dai fumi

Quando un incendio si sviluppa in un ambiente confinato i prodotti della combustione tendono ad accumularsi a soffitto e riscaldarsi progressivamente, come descritto nei Capitoli 5 e 8, di fatto quindi oltre all'irraggiamento diretto dalle fiamme vi è un ulteriore contributo dovuto alla presenza dei fumi caldi (figura 9.5). Studi sperimentali di Quintiere e McCaffrey (1980) hanno mostrato come temperature dell'hot gas layer dell'ordine di circa 400°C, sono sufficienti a causare un flusso termico radiativo in corrispondenza di un target posto a livello di pavimento di 10 kW/m², sufficiente a causare l'accensione di oggetti facilmente accendibili.

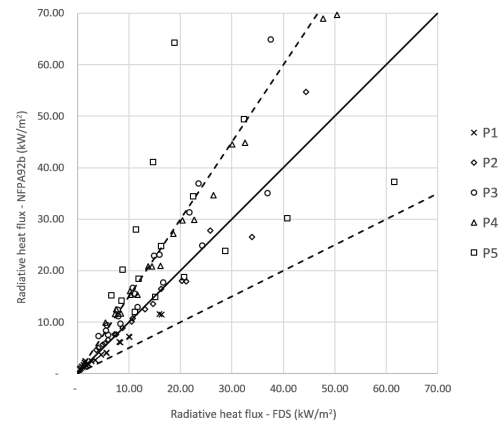
Il flusso termico radiativo emesso dall'hot gas layer è in diretta relazione con la possibilità di accensione di materiale posto in posizione remota rispetto alla sorgente dell'incendio (Clarke et al. 1990). I dati ottenuti da Clarke et al. (1990) derivano dall'analisi di scenari di incendio reali e possono essere sintetizzati come in Tabella 9.4.

Il flusso termico radiativo dallo strato di gas caldi verso un generico target, può essere stimato a partire dall'equazione 9.2, dove lo strato radiativo può essere modellato come un corpo nero ($\varepsilon = 1$) alla temperatura dello strato di gas caldo, T_{HGL} (NFPA 555 2009). Il fattore di configurazione tra la superficie radiativa e il bersaglio, F_{HGL-t} , può essere stimato assumendo che la superficie

9. Flusso termico radiativo e distanze di coinvolgimento tra oggetti



(a)



(b)

Figura 9.4: Confronto tra i flussi termici radiativi previsti da FDS e stimati attraverso il point-source model come proposto da Modak (1977) (a) e nella versione in NFPA92b (b). La posizione della sorgente puntiforme ideale è stata posta alla centro del fuoco ad una altezza pari ad un quarto dell'altezza della fiamma. Le linee tratteggiate indicano l'incertezza delle previsioni FDS, la pendenza è pari a $1 \pm 2\sigma_M$

Tabella 9.4: Relazione tra temperatura dell'hot gas layer, irraggiamento e propagazione dell'incendio (tratto da Clarke et al. (1990)).

T_{HGL} (°C)	Flusso termico radiativo (kW/m ²)	Estensione delle fiamme
100	1	Limitata al singolo oggetto.
200	3	Limitata a un'area attorno all'oggetto.
450	15	L'intero contenuto della cella può essere coinvolto.
600	20	L'intero contenuto della cella viene coinvolto. L'incendio si estende oltre la cella di origine.

9.4. Flusso termico radiativo emesso dai fumi

radiativo sia un piano posto in corrispondenza dell'interfaccia dell'hot gas layer. Il flusso termico radiativo incidente al livello al bersaglio, può quindi essere stimato attraverso l'espressione:

$$\dot{q}''_{t\ HGL} = F_{HGL-t}\sigma T_{HGL}^4 \quad (9.8)$$

L'equazione 9.8 assume che lo strato superiore possa essere assimilato a un corpo nero ideale. L'emissività è una funzione della concentrazione di particolato e gas combustibili, come monossido di carbonio, anidride carbonica e acqua. Si presume che, quando la temperatura dello strato superiore è alta abbastanza per contribuire in modo significativo alla trasmissione del calore per irraggiamento (indicativamente T_{HGL} superiori a $300\div 400^\circ\text{C}$), la concentrazione di particolato e gas combustibili nell'hot gas layer è sufficientemente elevata da renderlo otticamente spesso o opaco. In queste condizioni l'ipotesi che l'emissività sia pari a 1 è appropriata e consente di effettuare stime conservative per quanto riguarda il contributo dell'hot gas layer all'accensione di materiale in posizione remota rispetto alla fiamma (NFPA 555 2009). Una ulteriore semplificazione può essere introdotta considerando il fattore di vista pari a 1. Questo caso si verifica quando la superficie del target è rivolta verso la superficie che irradia e la distanza tra emettitore e target è piccola (nel caso di un ambiente con pianta quadrata, la distanza tra emettitore e target indicativamente minore di metà lunghezza del lato).

Approcci più completi prevedono di considerare lo strato di gas caldi come una superficie grigia ideale, quindi caratterizzata da un'emissività $\varepsilon < 1$ e di considerare il contributo dato dalle porzioni di pareti e soffitto immerse nello strato di gas caldi (Karlsson e Quintiere 2000; Tien, Lee e Stretton 2002). Un approccio di questo tipo, seppur più completo, richiede la determinazione dei fattori di vista tra le diverse superfici radiative e il target, inoltre poiché la posizione dell'interfaccia dell'hot gas layer si sposta nel corso del tempo, le superfici radiative si modificano e di conseguenza è necessario calcolare nuovamente i fattori di vista. Un tale approccio pertanto non è applicabile ai fini di una rapida valutazione delle avversità indotte da un incendio, per questi fini è preferibile riferirsi al modello descritto dall'equazione 9.8.

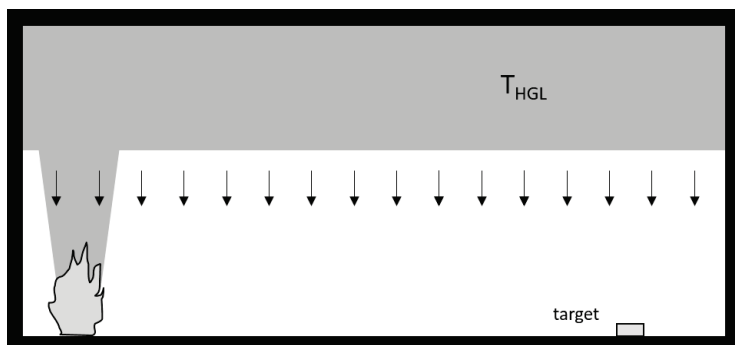


Figura 9.5: Flusso termico radiativo al pavimento in una cella causato dall'hot gas layer.

9.5 Flusso termico radiativo dai fumi e dalle fiamme

Al fine di considerare l'effetto combinato di fiamme e hot gas layer come sorgenti di radiazione termica è stata considerata la seguente relazione:

$$\dot{q}_t'' = \dot{q}_{t \text{ flame}}'' + \dot{q}_{t \text{ HGL}}'' \quad (9.9)$$

Dove $\dot{q}_t''$ è il flusso termico radiativo totale al target, $\dot{q}_{t \text{ flame}}''$ e $\dot{q}_{t \text{ HGL}}''$ sono rispettivamente la radiazione termica emessa dalla fiamma e dallo strato di fumi caldi in corrispondenza del target. Sostituendo a $\dot{q}_{t \text{ flame}}''$ e $\dot{q}_{t \text{ HGL}}''$ le corrispondenti espressioni 9.6 9.8 In questo caso si sono considerate le versioni semplificate delle espressioni per $\dot{q}_{t \text{ flame}}''$ e $\dot{q}_{t \text{ HGL}}''$, ma è possibile introdurre le versioni più complete dei due modelli), si ottiene quindi:

$$\dot{q}_t'' = \frac{HRR_r}{4\pi R^2} + F_{HGL-t} \sigma T_{HGL}^4 \quad (9.10)$$

(Introducendo l'ipotesi semplificativa $F_{HGL-t} = 1$ e risolvendo l'equazione rispetto a R e sostituendo a $\dot{q}_t''$ i valori soglia per l'innesco dei materiali (7.3) è possibile ottenere una espressione che fornisce la distanza di coinvolgimento nell'incendio tenendo conto del flusso termico radiativo complessivo:

$$R = \sqrt{\frac{HRR_r}{4\pi} \cdot \frac{1}{\dot{q}_t'' - \sigma T_{HGL}^4}} \quad (9.11)$$

La temperatura dell'hot gas layer può essere calcolata attraverso la metodologia MQH (equazione 6.16) a partire dall'HRR del fuel package considerato. Nel caso in cui la differenza al denominatore $\dot{q}_t'' - \sigma T_{HGL}^4$ risultasse negativa, l'equazione non è risolvibile, fisicamente questa condizione corrisponde al caso in cui all'interno dell'ambiente considerato le temperature dei fumi sono tali per cui il flusso termico radiativo dai fumi è maggiore della soglia di infiammabilità del target.

Il modello proposto (equazione 9.11) è stato confrontato con le misure di flusso termico radiativo ottenute da FDS per un set di scenari di riferimento. Negli scenari modellati con FDS sono stati introdotti sensori per la misura del flusso termico radiativo distribuiti all'interno del dominio di calcolo secondo una maglia uniforme con passo 1 m e posizionati alla quota del piano di calpestio. Negli scenari il fuoco è stato modellato come una superficie posta a livello del pavimento con HRR costante nel tempo. I dati di input sono riportati in Tabella 9.5.

I risultati ottenuti dalle simulazioni con FDS e dall'eq. 9.11 sono riportati nella seguente Tabella 9.6. Per le caratteristiche geometriche degli ambienti considerati si veda Tabella 8.4.

Il confronto ha evidenziato che, limitatamente ai casi considerati, l'equazione 9.11 consente di individuare correttamente le distanze rispetto al centro del fuoco in corrispondenza delle quali vengono raggiunte i flussi termici radiativi di soglia (10, 20, 40 kW/m²), rispetto alle previsioni di FDS la formula analitica tende mediamente a sottostimare le distanze di coinvolgimento. La sottostima è dell'ordine del 9% per il flusso termico di 10 kW/m² e del 20% per i rimanenti casi.

9.5. Flusso termico radiativo dai fumi e dalle fiamme

Tabella 9.5: Confronto tra distanze di coinvolgimento, basate su tre valori di flusso termico radiativo per l'innesco dei materiali, ottenute da FDS e stimate con l'equazione 9.11.

Enclosure ID	HRR	Lato fuoco	T _{HGL} (°C)
A1	686	0.6	200
A1	1590	0.8	350
A1	2715	1.0	500
A2	1440	0.8	200
A2	3340	1.2	350
A2	5700	1.4	500
A3	840	0.6	200
A3	1950	0.8	350
A3	3330	1.0	500
A4	1785	0.8	200
A4	4130	1.2	350
A4	7050	1.4	500

Tabella 9.6: Confronto tra distanze di coinvolgimento, basate su tre valori di flusso termico radiativo per l'innesco dei materiali, ottenute da FDS e stimate con l'eq. 9.11. Il simbolo - indica i casi in cui all'interno dell'ambiente considerato il flusso termico è maggiore rispetto al valore soglia considerato.

Enclosure ID	Distanza (m) rispetto al centro del fuoco per un flusso termico radiativo in corrispondenza del pavimento pari a:					
	10 kW/m ²		20 kW/m ²		40 kW/m ²	
	FDS	eq. 9.11	FDS	eq. 9.11	FDS	eq. 9.11
A1	1.8	1.7	1.3	1.1	1	0.7
A1	-	-	2.5	2.1	1.5	1.2
A1	-	-	-	3.0	-	1.7
A2	-	2.4	1.7	1.5	1.3	1.0
A2	-	-	-	-	1.8	2.1
A2	-	-	-	-	3	3.0
A3	2	1.8	1.3	1.2	1.3	0.8
A3	-	-	1.5	2	-	1.3
A3	-	-	-	-	-	2
A4	2.7	2.5	2	1.7	1.4	1.2
A4	-	-	-	2.9	1.9	1.9
A4	-	-	-	-	2.8	2.9

Capitolo 10

Gli scenari di esplosione potenziale

Nel Capitolo 6 si è introdotto lo strumento degli scenari di esplosione potenziale. Questi scenari consentono di descrivere in modo convenzionale e pre-codificato l'avversità potenziale rappresentativa della cella in esame, a partire da una ispezione e dal riconoscimento di alcuni elementi sostanziali che la caratterizzano.

La definizione degli scenari non è fine a se stessa, ma funzionale alla definizione delle contromisure, ovvero alle misure preventive e protettive che hanno lo scopo di ridurre il livello di rischio, pertanto due scenari sono diversi solo se richiedono contromisure sostanzialmente diverse. In quest'ottica la definizione degli scenari deve partire dagli effetti attesi per l'evento avverso, differenziando tra diversi livelli di avversità e da qui procedere a ritroso per individuare quali sono, o possono essere, le cause che portano ad un evento caratterizzato dal livello di avversità considerato. In questo modo è possibile pre-codificare un set di scenari entro i quali è possibile incasellare l'universo degli scenari reali.

10.1 Effetti delle esplosioni

Nelle attività civili si possono trovare quantità, generalmente piccole, di sostanze infiammabili suscettibili di formare un'atmosfera esplosiva se miscelate con l'ossigeno presente nell'aria. Questa atmosfera una volta attivata può di conseguenza portare al verificarsi di un'esplosione. L'innesco di un'atmosfera esplosiva porta infatti a una combustione estremamente rapida con violenta liberazione di energia. Gli effetti di un'esplosione sono molteplici e devono essere considerati in relazione al bersaglio considerato. Una grande quantità di studi e ricerche riguarda il pericolo di esplosione in ambienti industriali, mentre nel caso di attività civili (ad esempio laboratori scolastici, officine, garage e altri), vi è una carenza di studi specifici. Nel seguito si farà quindi riferimento a studi condotti su esplosioni su larga scala.

Effetti sugli edifici

Tra i molteplici effetti prodotti da una esplosione, le principali cause di danno alle costruzioni e in particolare agli edifici sono la sovrappressione che si genera

10.1. Effetti delle esplosioni

e si propaga in seguito alla rapida espansione dei prodotti di combustione e l'impatto con oggetti o frammenti proiettati (TNO 1992). Il numero e la dinamica dei frammenti proiettati sono difficilmente calcolabili, in letteratura non sono disponibili relazioni che consentano di definire, anche in modo approssimato, la relazione tra frammenti proiettati e danni agli edifici (TNO 1992). Vi sono invece numerosi studi in merito all'effetto delle sovrappressioni causate dalle esplosioni sulle costruzioni. La letteratura sul problema evidenzia come la sollecitazione imposta alla struttura è di tipo dinamico, di conseguenza essa è legata non solo all'entità della sovrappressione massima, ma anche alla sua evoluzione temporale.

Tradizionalmente i danni alle costruzioni causati dalle onde d'urto sono stati correlati con la massima sovrappressione generata da un'esplosione; questo approccio porta ad ottenere stime di danno più prossime ai danni riscontrati nel caso di pressioni applicate in regime quasi-statico, mentre nel caso di azioni impulsive porta generalmente a sovrastimarne i danni attesi (Mannan 2005). Esistono altri approcci proposti in letteratura, ad esempio i diagrammi P-I (pressione - impulso), che correlano il danno atteso con determinati domini di pressione e impulso, tuttavia la loro applicazione non è semplice. Nell'ottica di una analisi preliminare, l'approccio che correla la sovrappressione massima e il danno atteso appare il più indicato dato che da un lato fornisce risultati conservativi e dall'altro la difficoltà di stimare la durata effettiva della sovrappressione e la sua evoluzione nel tempo e quindi di fare riferimento ad approcci più articolati. A questo proposito è opportuno sottolineare che molti approcci in letteratura correlano le conseguenze di una esplosione solo alla sovrappressione statica massima (ad es. Baker et al. (1983) e Cozzani, Gubinelli e Salzano (2006)), secondo Cozzani, Tugnoli e Salzano (2007) e Mannan (2005) questo approccio, seppure semplificato, fornisce risultati conservativi.

In letteratura sono disponibili correlazioni tra la sovrappressione generata dall'esplosione ed il danno atteso sull'edificio. Va in ogni caso sottolineato come gran parte di questi dati derivino da test eseguiti esplosioni nucleari ed esplosivi allo stato solido (Mannan 2005). Di seguito si riporta un estratto di questi dati (Tabella 10.1).

Ai fini della presente analisi i dati riportati in Tabella 10.1 possono essere organizzati in tre domini:

- Sovrappressioni inferiori a circa 3 kPa: i danni sono limitati e leggeri e prevedono soprattutto rottura di superfici vetrate;
- Sovrappressioni comprese tra 3 e 7 kPa, per le quali possono manifestarsi danni limitati agli elementi strutturali;
- Sovrappressioni superiori a 7 kPa, per cui cominciano a manifestarsi significativi danni agli edifici, con compromissione degli elementi strutturali.

Questi domini possono essere utilizzati per la definizione dei discriminanti tra i diversi scenari di avversità in caso di esplosione, prima tuttavia è necessario verificare quali sono gli effetti delle sovrappressioni sulle persone e quindi se i valori sopra definiti possono essere compatibili.

Effetti sulle persone

Nel lavoro di Mannan (2005) sono raccolti i risultati ottenuti da diversi autori relativamente ai valori delle sovrappressioni correlati ai danni alle persone, questi

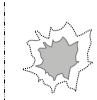
10. Gli scenari di esplosione potenziale

Tabella 10.1: Relazione tra sovrappressione generata da un'esplosione e danni sugli edifici.

Riferimento	Danno atteso	Sovrappressione (kPa)
Mannan (2005)	Limite per la rotture dei vetri	1
	"distanza di sicurezza", 95% di probabilità di assenza di danni seri al di sotto di questo valore	2
	Danni minori alle strutture delle abitazioni	3÷5
	Demolizione parziale di abitazioni	8
	Collasso parziale di pareti e tetto di edifici di abitazione	15
	Distruzione di pareti in blocchi di calcestruzzo	15÷20
	Limite inferiore per il quale si hanno gravi danni strutturali	18
	Distorsione di strutture a telaio in acciaio o estrazione dalle fondazioni	20
	Distruzione quasi totale di abitazioni	35÷50
	Ribaltamento di carrozze ferroviarie cariche	50
	Probabile distruzione totale di edifici	70
TNO (1992)	Danni a tetti, soffitti, formazione di fessure minori in intonaci; danni su oltre l'1% delle superfici vetrate	1÷1.5
	Danni minori alle strutture	3
	Edificio non abitabile senza importanti lavori di riparazione. Rottura parziale dei pavimenti, rottura del 25% delle pareti, seri danni al resto degli elementi portanti. Danni ai telai di porte e finestre	7÷15
	Danni non riparabili; danni da leggeri a pesanti su una quota variabile tra il 50% e il 75% delle pareti esterne	35
	Collasso di oltre il 75% delle pareti esterne	70

10.2. Definizione degli scenari di esplosione potenziale

Tabella 10.2: Definizione degli scenari di esplosione potenziale.

Pittogramma	Scenario di esplosione potenziale
	Sovrappressioni limitate (Limited Overpressure and Fire - LOF). Presenza di piccole quantità di sostanze pericolose che possono dar luogo a piccole esplosioni con sovrappressioni massime inferiori a 3 kPa, sia in near field sia in far field. La produzione di detriti o frammenti è trascurabile.
	Sovrappressioni significative - Effetti localizzati (Major Overpressure and Fire with Local effect - MOL). Presenza di rilevanti quantità di sostanze pericolose che possono dare luogo a fenomeni localizzati o generalizzati di esplosione, con lo sviluppo di sovrappressioni massime superiori a 3 kPa in near field, quindi con effetti limitati e localizzati. Possono essere prodotti frammenti o detriti.
	Sovrappressioni significative - Effetti estesi (Major Overpressure and fire with Extended effect - MOE). Presenza di rilevanti quantità di sostanze pericolose che possono dare luogo a fenomeni generalizzati di esplosione con lo sviluppo di calore e di sovrappressioni massime superiori a 7 kPa che possono interessare l'intero volume, indurre il collasso strutturale e potenzialmente estendere i relativi effetti al di fuori del sistema analizzato, a causa di onde d'urto, detriti e fiamme. Prodotti di combustione tossici possono essere generati in grande quantità.

ultimi generalmente sono di un'ordine di grandezza superiore rispetto a quelle necessarie a causare danni alle strutture. Tuttavia, le principali cause di infortuni alle persone o decessi in caso di esplosione in uno spazio confinato sono legate al crollo totale o parziale degli edifici stessi e alla presenza di polveri e prodotti della combustione asfissianti. Questi ultimi aspetti sono evidentemente connessi con la resistenza degli edifici alle sovrappressioni generate dalle esplosioni. In conclusione quindi sembra lecito assumere come parametro di riferimento per la descrizione delle avversità e la definizione degli scenari di esplosione potenziale i valori di sovrappressione correlati a determinate soglie di danno sugli edifici.

10.2 Definizione degli scenari di esplosione potenziale

Sono stati definiti gli scenari di esplosione potenziale descritti in Tabella 10.2. Qui i discriminanti tra gli scenari sono legati alle sovrappressioni massime attese in relazione alle quantità di sostanze pericolose presenti nella cella esaminata. Vi è quindi la necessità di definire una metodologia che consenta di stimare le sovrappressioni in funzione della tipologia di materiale presente e della quantità, tenendo conto anche delle modalità di conservazione o utilizzo che possono determinare una maggiore o minore propensione al rilascio delle sostanze pericolose.

La pressione massima generata da una esplosione di una miscela infiammabile in concentrazione stechiometrica a volume costante e in condizioni adiabatiche è di circa nove bar (Lautkaski 1997), che è circa 50 volte maggiore rispetto alla pressione che causa il collasso della maggior parte delle strutture. Poiché anche piccole sacche di miscele infiammabili, che occupano una piccola porzione

del volume totale della cella, sono in grado di produrre danni significativi ai dispositivi presenti e alle parti dell'edificio caratterizzate da bassa resistenza, si è adottato il modello proposto da Ogle (1999) che consente di determinare la sovrappressione indotta da una esplosione all'interno di un volume chiuso e adiabatico parzialmente riempito con una miscela esplosiva.

10.3 Il modello per il calcolo delle sovrappressioni

L'approccio proposto da Ogle (1999), chiamato adiabatic mixing model è assunto qui come riferimento. Si basa su una analisi termodinamica del sistema e può essere utilizzata per calcolare la quantità minima di sostanza infiammabile (gas o vapori) necessaria per produrre una specificata sovrappressione. Si è introdotta la semplificazione che l'intera quantità di sostanza infiammabile aerodispersibile formi con l'aria una miscela omogenea a concentrazione stechiometrica.

Questo rapporto in pratica descrive le dimensioni della sacca di miscela infiammabile come numero adimensionale.

L'idea alla base del modello è abbozzata in Figura 10.1. In un sistema chiuso e adiabatico, quando innescata, la miscela aria-combustibile brucia a volume costante V_f . Al termine della combustione, la temperatura e la pressione all'interno del volume di miscela aria-combustibile (T_{B1} e P_{B1} rispettivamente) assumono le proprietà dei gas di combustione a volume costante, mentre l'aria circostante mantiene le sue proprietà iniziali (T_{A1} , P_{A1}). Nella fase successiva i gas di combustione si espandono e occupano l'intero volume V_r mescolandosi con l'aria circostante senza cedere calore verso l'esterno del volume di riferimento. Al termine dell'espansione, all'equilibrio, la temperatura e la pressione finale (T_2 , P_2) sono uniformi all'interno del volume di riferimento.

Il punto di partenza è il bilancio energetico del sistema, assumendo come stato iniziale (stato 1) l'istante in cui la combustione a volume costante è completa e come stato finale (stato 2) l'istante in cui la miscelazione adiabatica tra il volume di gas bruciato e l'aria circostante è completa:

$$\Delta U_A + \Delta U_B = 0 \quad (10.1)$$

Dove ΔU rappresenta la differenza di energia interna del sistema. Il pedice A fa riferimento all'aria contenuta nel sistema, il pedice B ai prodotti della combustione. È possibile riscrivere l'eq.10.1 in termini di temperature:

$$n_{A1}C_V(T_2 - T_{A1}) = n_{B1}C_V(T_2 - T_{B1}) \quad (10.2)$$

Dove n è il numero di moli (mol), C_V il calore specifico a volume costante (kJ/mol K) e T la temperatura assoluta (K). Introducendo la legge ideale dei gas è possibile ottenere le seguenti espressioni:

$$n_{A1} = \frac{P_{A1}V_{A1}}{RT_{A1}} \quad n_{B1} = \frac{P_{B1}V_{B1}}{RT_{B1}} \quad (10.3)$$

Dove P è la pressione assoluta (Pa), V il volume (m^3) e R la costante universale dei gas (8.314 J/mol K). Sostituendo l'eq.10.3 nell'eq.10.2 e riconoscendo che:

10.3. Il modello per il calcolo delle sovrappressioni

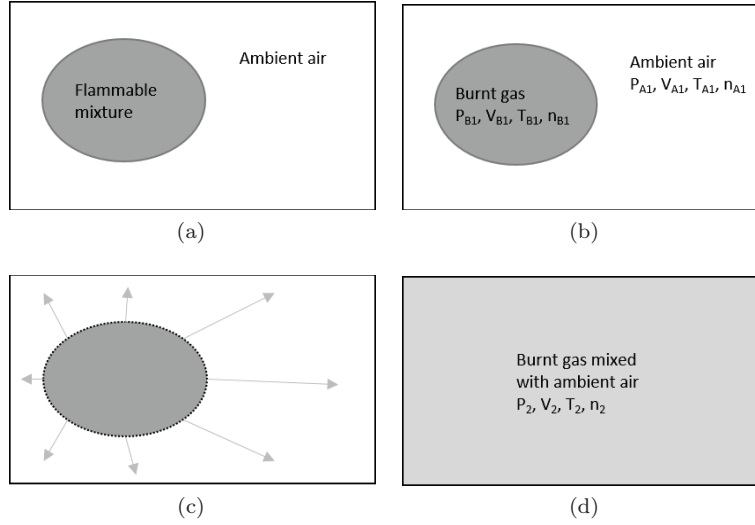


Figura 10.1: Schema concettuale alla base del modello di Ogle (1999). (a) Si forma una miscela infiammabile all'interno di un volume di riferimento; (b) La miscela infiammabile brucia a volume costante; (c) Terminata la combustione i prodotti di combustione si espandono; (d) I prodotti di combustione espandendosi si mescolano con l'aria circostante, senza cedere calore all'esterno del volume di riferimento.

$$P_2 = \frac{(n_{A1} + n_{B1}) RT_2}{(V_{A1} + V_{B1})} \quad (10.4)$$

È possibile ottenere la seguente espressione per la pressione finale P_2 :

$$P_2 = \frac{1}{V_r} \cdot (P_{A1} V_{A1} + P_{B1} V_{B1}) \quad (10.5)$$

Questa espressione consente di calcolare la pressione finale all'interno del volume V_r noti il volume di miscela infiammabile V_{B1} , la pressione di esplosione a volume costante P_{B1} e la pressione iniziale P_{A1} . L'eq.10.5 può essere riscritta nella forma equivalente:

$$P_2 = \frac{P_{A1}}{V_r} \cdot \left(V_{A1} + \frac{P_{B1}}{P_{A1}} V_{B1} \right) \quad (10.6)$$

Dove il rapporto P_{B1}/P_{A1} è il rapporto di espansione, che per molti idrocarburi varia tra 8 e 9 (Lautkaski 1997).

Il parametro determinante è quindi il volume della miscela infiammabile V_{B1} .

In questo studio si propone la seguente relazione per il calcolo del volume della miscela infiammabile V_{B1} :

$$V_{B1} = \beta_d \cdot V_{fuel} \frac{100}{X_{st}} \quad (10.7)$$

Qui V_{fuel} è il volume complessivo di sostanza infiammabile, X_{st} è il rapporto stechiometrico (in percentuale) per la specifica sostanza considerata, infine β_d è un coefficiente introdotto per prendere in considerazione le modalità di

10. Gli scenari di esplosione potenziale

Tabella 10.3: Definizione del coefficiente di dispersione convenzionale in relazione alle modalità di conservazione delle sostanze pericolose.

Modalità di gestione e utilizzo	Livello di predisposizione a dar luogo a dispersioni	β_d
Tubi senza giunzioni, valvole, ecc. Nel caso queste siano presenti devono essere propriamente mantenuti. Bombole propriamente mantenute e utilizzate.	1	0
Sostanze conservate in contenitori ermetici o armadi di sicurezza, mantenuti chiusi.	2	0.2
Sostanza in contenitori o armadi non combustibili.	3	0.7
Sostanza in contenitori combustibili o non infrangibili. Sostanze in tubazioni o bombole non propriamente mantenute.	4	1

gestione e utilizzo della sostanza pericolosa. Queste sono state classificate in relazione alla diversa predisposizione a generare dispersioni e alla quantità di materiale potenzialmente disperdibile adottando i criteri di valutazione proposti in S. Grimaz e Pini (1999). A ciascuna condizione individuata corrisponde un coefficiente di dispersione convenzionale β_d (Tabella 10.3).

Nella definizione degli scenari in Tabella 10.2 si è introdotto il concetto di effetti nel near e far field, questi sono definiti in relazione allo schema in Figura 10.2. Gli effetti di far field fanno riferimento alle sovrappressioni stimate applicando l'adiabatic mixing model al volume effettivo della cella esaminata. Gli effetti near field sono invece stimati con riferimento a un ideale volume cubico di 27 m³ centrato in corrispondenza della sorgente da cui può avvenire il rilascio di sostanze infiammabili aerodisperdibili. Lo scopo è quello di considerare il caso in cui il materiale infiammabile che può formare una miscela esplosiva si trova all'interno di una cella con volume molto grande, per cui dalla applicazione del modello si otterrebbero sovrappressioni trascurabili. L'introduzione del volume convenzionale invece consente di considerare gli effetti locali, che possono comunque manifestarsi ad esempio per effetto di ostruzioni o ostacoli che rappresentano un confinamento.

10.3.1 Limiti di applicabilità

L'adiabatic mixing model assume come riferimento per l'analisi un volume chiuso, che non permette lo sfogo delle sovrappressioni, le previsioni fornite da questo modello possono essere sensibilmente maggiori rispetto a quelle che effettivamente potrebbero verificarsi a seguito dello sfogo verso l'esterno per effetto della rottura di alcuni elementi (ad es. vetri). D'altro canto le correlazioni esistenti in letteratura che prendono in considerazione la presenza di superfici di sfogo (ad esempio NFPA 68 (2007)), partono dall'ipotesi che il volume sia completamente riempito di miscela esplosiva in condizioni stechiometriche (Lautkaski 1997). Ne consegue che le sovrappressioni ottenute all'interno di un volume nell'ipotesi di riempimento completo e presenza di superfici di sfogo sono spesso maggiori di quelle che si ottengono attraverso l'applicazione del modello di Ogle (1999) per lo stesso volume riempito parzialmente con la stessa miscela esplosiva, in base alla quantità di sostanza pericolosa effettivamente presente.

Poiché nel quadro generale di INSPECT l'obiettivo è di valutare il livello di avversità in funzione delle condizioni effettivamente riscontrate all'interno

10.3. Il modello per il calcolo delle sovrappressioni

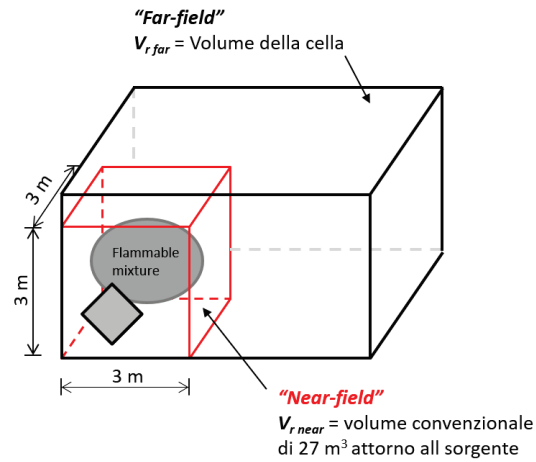


Figura 10.2: Schema di riferimento adottato per la definizione degli scenari di esplosione potenziale e la valutazione delle sovrappressioni.

dell'ambiente esaminato si è optato per il modello di Ogle (1999) in quanto consente di stimare le sovrappressioni in relazione alla tipologia e quantità di sostanze effettivamente riscontrate negli ambienti esaminati. Inoltre poiché lo scopo non è quello di modellare gli effetti di una esplosione, ma di individuare situazioni caratterizzate da diversi livelli di avversità potenziale, le sovrappressioni ottenute da questo modello possono essere utilizzate per definire diversi livelli di avversità convenzionale come proposto in Tabella 10.2.

Parte III

Analisi e gestione dell'evacuazione

Capitolo 11

L'evacuazione in caso di incendio

Il documento interpretativo relativo al Requisito Essenziale numero 2 - Sicurezza in caso di incendio, con riferimento all'obiettivo 4 - "Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti", afferma che è necessario prevedere dei sistemi che permettano agli occupanti di evacuare l'attività e consentano alle squadre di soccorso di potervi accedere per due fini:

1. consentire agli occupanti che si trovano in un punto qualsiasi dell'edificio di mettersi in salvo;
2. permettere alle squadre di soccorso di accedere all'edificio, esplorarne l'interno ed uscire.

L'evacuazione è quindi una delle possibili azioni di riposta a una situazione di pericolo che le persone attuano per allontanarsi dalla zona coinvolta dall'evento incidentale e raggiungere una zona sicura.

In caso di incendio, la sicurezza delle persone coinvolte nell'evacuazione è ottenuta se questa si conclude prima del raggiungimento delle condizioni di insostenibilità a causa degli effetti avversi generati dall'incendio (mancanza di visibilità, gas tossici, calore, carenza di ossigeno), le quali sono raggiunte nell'istante in cui la capacità delle persone di muoversi o reagire viene compromessa (R. Gann 2004). Tale istante varia in funzione delle caratteristiche dell'incendio, dell'ambiente e delle stesse persone. L'esodo è quindi attuato da persone che, consapevoli o meno della presenza di un incendio, si muovono utilizzando un sistema d'esodo.

Per sistema d'esodo qui si intende l'insieme di percorsi orizzontali e/o verticali che connettono le diverse zone di un edificio con zone sicure. L'esito del processo di evacuazione dipende dalla prestazione che tale sistema è in grado di garantire durante l'emergenza.

Per valutare la prestazione di un sistema d'esodo è però fondamentale considerare la complessità del processo d'evacuazione (Nilsson e Uhr 2009), dovuta al fatto che esso non dipende solamente dalle caratteristiche fisico-geometriche dello spazio in cui le persone si muovono, ma anche dalle caratteristiche delle persone, dalla presenza dell'incendio e dei suoi effetti avversi, e soprattutto dalle

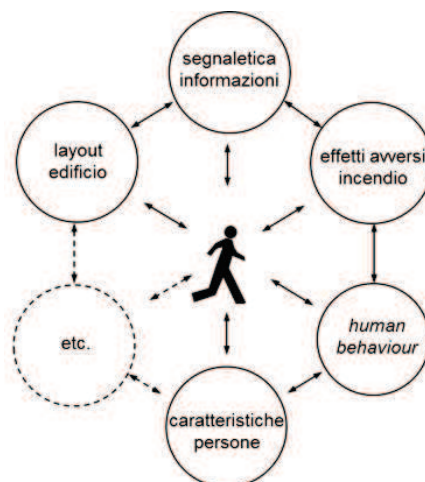


Figura 11.1: Processo d'esodo e le interazioni che lo caratterizzano (Immagine tratta da Bryan (2002), modificata).

interazioni tra persone, spazio fisico, e condizioni ambientali (Proulx 2002; SFPE 2003).

Il concetto di interazione fu proposto inizialmente da Sime (1991), il quale superò la concezione che assimilava il movimento delle persone durante l'evacuazione a quello di un fluido e quindi dipendente solamente dalle caratteristiche geometriche del sistema d'esodo, proponendo una valutazione più completa del processo d'esodo. Sime infatti, assegnò un ruolo determinate al comportamento umano (o *human behaviour*) e alle interazioni persona-persona e persona-sistema d'esodo (11.1).

Questo concetto è attualmente ben consolidato nell'ambito dell'approccio prestazionale alla sicurezza in caso d'incendio (Fire Safety Engineering) e l'importanza del comportamento umano e delle interazioni è considerata anche in diversi standard (ad esempio ISO/TR 13387-8 (1999)) e in contributi di molti ricercatori (ad esempio Gwynne, Galea et al. (1999), Kobes et al. (2009), E. Kuligowski (2013) e Lovreglio, Ronchi e Nilsson (2015)).

Nell'ottica di sviluppare un test che consenta di valutare il raggiungimento dell'obiettivo di sicurezza 4 è stato adottato come riferimento il metodo PASS (Preliminary Assessment of the egress-System Safety) (S. Grimaz e Tosolini 2013; S. Grimaz, Tosolini e Dolcetti 2010; Tosolini, S. Grimaz e Salzano 2013).

In questo lavoro il metodo PASS è stato ulteriormente analizzato e alcuni suoi elementi sono stati verificati con dati ottenuti dall'analisi di sperimentazioni effettuate nel LabCUBE_{egress} (S. Grimaz, Dusso et al. 2014; Tosolini, Pecile e S. Grimaz 2012).

Il test di vulnerabilità ricavato dal metodo PASS è stato applicato a un caso studio. Gli esiti ottenuti sono stati confrontati con i risultati di una evacuazione non preannunciata, organizzata in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, tenutasi presso il Teatro Verdi di Pordenone il 10 febbraio 2015 che ha coinvolto oltre 300 persone.

11.1 Gli strumenti utilizzabili per l'analisi di un sistema d'esodo

Gli attuali strumenti a disposizione per l'analisi di un sistema d'esodo possono essere classificati in due gruppi, in funzione dell'approccio adottato per la progettazione o valutazione della sicurezza. L'approccio più semplice e immediato è quello prescrittivo, che si basa sulla conformità delle caratteristiche geometriche del sistema d'esodo rispetto a valori che sono precodificati dal normatore. Gli elementi da valutare riguardano fondamentalmente il dimensionamento e la geometria del sistema, i sistemi di protezione attiva e passiva, i sistemi di identificazione delle vie d'uscita (illuminazione, segnaletica, ecc.).

Nonostante il suo semplice e rapido utilizzo, l'approccio prescrittivo non consente una comprensione completa del processo d'esodo (utile ad esempio per individuare criticità specifiche) e non chiarisce il processo logico utilizzato per la progettazione della sicurezza. Inoltre, le norme prescrittive sono generalmente poco flessibili quando applicate per progettare o valutare la sicurezza del sistema d'esodo in spazi complessi e innovativi (Frantzich 1998; Tavares 2009a); oppure in edifici storici.

L'approccio prestazionale proposto dalla Fire Safety Engineering supera queste limitazioni, poiché permette di progettare la sicurezza di un sistema d'esodo in modo flessibile e valutando il sistema persone-edificio-ambiente nella sua completezza considerando le interazioni tra questi tre elementi (ISO/TR 13387-8 1999). Nell'approccio prestazionale, la prestazione del sistema d'esodo è valutata attraverso la stima del tempo di raggiungimento delle condizioni di insostenibilità nel sistema analizzato (*ASET*, *Available Safe Egress Time*) e il tempo impiegato dalle persone per raggiungere un luogo sicuro (*RSET*, *Required Safe Egress Time*). Il buon esito di una evacuazione dipende dal fatto che il RSET sia inferiore all'ASET con un determinato margine di sicurezza (Cooper 1983; ISO/TR 13387-8 1999; SFPE 2003).

L'intero processo di evacuazione può essere schematizzato come una successione temporale di diverse fasi (Figura 11.2).

In seguito all'ignizione dell'incendio, un primo ritardo è causato dal tempo impiegato dal sistema di rivelazione e/o dagli stessi occupanti a rivelare l'incendio (tempo di rivelazione). Il tempo di allarme è il tempo che trascorre tra il momento in cui il sistema rivela l'incendio a quando viene attivato il sistema di allarme. Questi intervalli di tempo sono strettamente legati alla tipologia di sistema di rivelazione e allarme installati nell'edificio.

In seguito all'attivazione dell'allarme trascorre un certo lasso di tempo prima che inizi l'evacuazione vera e propria, ossia il movimento delle persone attraverso il sistema d'esodo per il raggiungimento di una zona sicura. Questo intervallo di tempo è detto tempo di pre-movimento. Durante il tempo di pre-movimento gli occupanti attuano una serie di comportamenti volti a ricevere, riconoscere e interpretare i segnali di allarme come quelli caratteristici di un incendio. Questa fase è fondamentale per decidere le azioni da intraprendere in risposta alla situazione avversa. Per la sua dipendenza dalle caratteristiche degli occupanti e da quelle dell'edificio, il tempo di pre-movimento varia significativamente per diverse persone o gruppi di persone e può variare significativamente anche all'interno di uno stesso edificio. Di fatto quindi il tempo di pre-movimento rappresenta una componente determinante per il buon esito di una evacuazione.

11.1. Gli strumenti utilizzabili per l'analisi di un sistema d'esodo

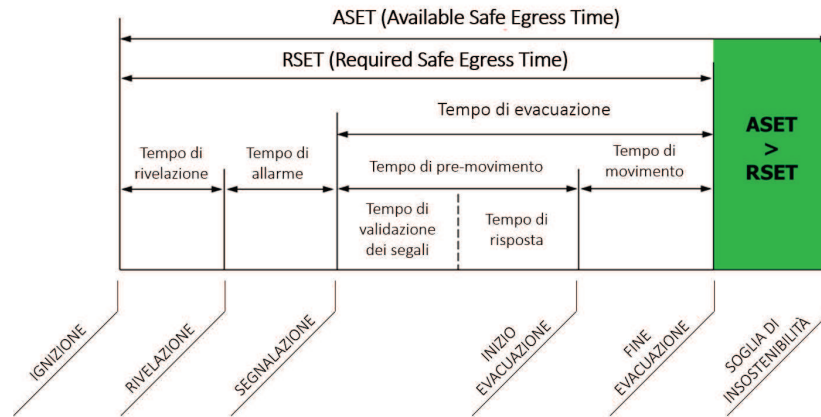


Figura 11.2: Schematizzazione temporale del processo d'esodo: riferimenti per la valutazione della prestazione del sistema d'esodo.

Il tempo di movimento rappresenta il tempo impiegato dagli occupanti a muoversi attraverso il sistema di vie d'uscita per raggiungere una zona sicura. Dipende essenzialmente dalla lunghezza del percorso e dalla velocità con cui le persone si spostano, la quale dipende dalle caratteristiche delle persone (in particolare dal grado di mobilità).

La sommatoria di tutti questi tempi determina RSET.

La Fire Safety Engineering fornisce diversi strumenti utilizzabili per il calcolo del RSET. Metodi analitici, come quello proposto da Nelson e Mowrer (2002) possono essere applicati a semplici scenari, mentre l'utilizzo dei modelli di simulazione dell'esodo è utile per la valutazione di scenari complessi (Tavares 2009b). Questi modelli permettono di simulare e studiare l'esodo in diverse tipologie di attività o strutture (edifici, spazi ad elevato affollamento, tunnel, navi, treni, ecc.) e di stimare in modo flessibile il tempo totale d'esodo. Per contro questi modelli richiedono un certo livello di confidenza nel loro utilizzo e la disponibilità di dati corretti e rappresentativi dello scenario utilizzato (Gwynne e E. Kuligowski 2010; Shi et al. 2009).

Nell'ambito della Fire Safety Engineering, viene proposto un approccio alternativo ai precedenti per la valutazione della prestazione di un sistema d'esodo: l'analisi di vulnerabilità (Barry 2002). La vulnerabilità di un generico sistema che contiene dei valori da proteggere può essere ricondotta alla sua capacità di risposta a fronte di un evento avverso (ad esempio un incendio all'interno di un edificio con persone). Il grado di risposta del sistema dipende chiaramente dai suoi punti di forza e debolezza (criticità): l'identificazione delle criticità del sistema consente di valutarne la prestazione rispetto ad uno scenario di riferimento (S. Grimaz e Tosolini 2013).

L'analisi di vulnerabilità applicata ai sistemi d'esodo permette di identificare i punti critici del sistema e i fattori che migliorano la sua risposta a condizioni avverse senza simulare il processo d'esodo. Uno strumento che si rifà alla logica della valutazione della vulnerabilità del sistema d'esodo è il metodo PASS: Preliminary Assessment of the Egress System Safety (S. Grimaz e Tosolini 2013).

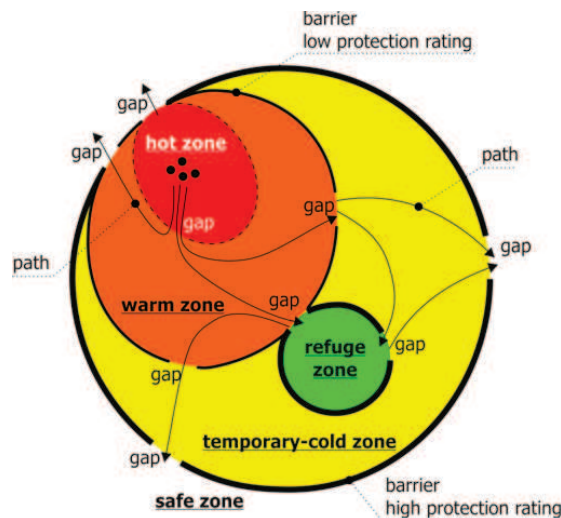


Figura 11.3: Il processo d'esodo concettualizzato nel modello delle frontiere d'esodo. La *hot zone* rappresenta la cella in cui si manifesta l'evento avverso. La *warm zone* rappresenta il compartimento in cui si sviluppa l'evento avverso. La *temporary-cold zone* è la zona oltre la compartimentazione che racchiude la *warm zone*. Infine la *refuge zone* e la *safe zone* rappresentano luoghi che non risentono degli effetti avversi dell'evento (Immagine da S. Grimaz e Tosolini (2013)).

11.2 Il metodo PASS: principi e principali caratteristiche

PASS è uno strumento che permette un rapido check della vulnerabilità di un sistema d'esodo.

L'analisi del sistema d'esodo non è realizzata ricorrendo a simulazioni numeriche, bensì attraverso sette test che sono stati sviluppati empiricamente riferendosi al modello concettuale delle frontiere d'esodo (Figura 11.3).

In questo lavoro verranno presentate solo le caratteristiche principali del metodo, funzionali alla trattazione che segue. Per una descrizione esaustiva del metodo si rimanda a S. Grimaz e Tosolini (2013) e Tosolini, S. Grimaz e Salzano (2013).

Questo modello concettualizza l'evacuazione come il movimento delle persone da una zona ad elevate pericolosità (concettualizzata come *hot zone* in Figura 11.3) a una zona sicura (concettualizzata come *refuge zone* o *safe zone* in Figura 11.3), intesa come una zona che non risente degli effetti avversi dell'evento. Questa definizione consente di capire come tale zona possa essere diversa a seconda del tipo di evento avverso.

In riferimento alla Figura 11.3, le persone possono raggiungere la zona sicura sia direttamente, sia attraversando zone a criticità decrescente (ad esempio attraversando diverse compartimentazioni). Le diverse zone sono separate da barriere che offrono diversi gradi di protezione contro gli effetti avversi di un incendio. Il passaggio tra una zona e l'altra attraverso le barriere è assicurato dalla presenza di varchi e i collegamenti tra i vari varchi sono realizzati con tratte d'esodo orizzontali o verticali.

11.2. Il metodo PASS: principi e principali caratteristiche

Il livello di prestazione minimo richiesto al sistema è stabilito in PASS grazie all'adozione di tempi massimi consentiti per l'allontanamento da ogni zona. Questi tempi sono dipendenti dallo scenario analizzato e vengono determinati in funzione delle caratteristiche geometriche della zona e dei materiali in essa contenuti che ne determinano il profilo di pericolosità (S. Grimaz e Tosolini 2013; Tosolini, S. Grimaz e Salzano 2013).

Questa impostazione si integra con la caratterizzazione delle avversità effettuata attraverso gli scenari di avversità potenziale, questi infatti, consentendo di mettere in evidenza sia la velocità di crescita dell'incendio sia la presenza di pericolosità speciali, fornisce quindi tutti gli elementi per il calcolo dei tempi massimi consentiti per l'allontanamento.

I test utilizzati in PASS sono stati concepiti per valutare la vulnerabilità del sistema secondo una logica multi-livello. Vengono considerati tre diversi livelli di analisi:

1. Livello 1, o globale - intero edificio;
2. Livello 2 o intermedio - compartimento;
3. Livello 3 o locale - singola cella.

I test fanno riferimento a tre indicatori prestazionali:

1. Raggiungibilità dei varchi;
2. Sfollabilità dei varchi;
3. Presenza di varchi o tratte d'esodo alternative e praticabili.

In Figura 11.4 è rappresentata schematicamente l'analisi multi-livello adottata in PASS. La prima analisi del sistema è realizzata a livello macroscopico per verificare se le persone possono abbandonare in sicurezza la struttura analizzata. L'analisi viene quindi focalizzata progressivamente, valutando prima le possibilità che le persone hanno di abbandonare le singole zone ed infine, valutando le possibilità d'esodo dalle singole celle.

In PASS sono stati individuati diversi fattori con lo scopo di introdurre nell'analisi le principali interazioni tra persone - edificio - condizioni ambientali. I fattori sono suddivisi in diverse categorie in funzione della particolare categoria di interazione considerata (Tabella). Questi fattori vengono utilizzati come elementi di penalità quando lo scenario analizzato presenta elementi in termini di layout, caratteristiche delle persone e materiali presenti che possono influenzare negativamente il processo d'esodo e permettono di ricondurre il quanto più possibile a situazioni reali l'analisi sviluppata con il modello concettuale delle frontiere d'esodo (Figura 11.5).

Ciascuno dei sette test di cui si compone PASS considera gli specifici fattori che influenzano lo specifico indicatore di performance considerato.

Poiché l'attendibilità di un'analisi dipende strettamente dalla qualità degli strumenti impiegati, i fattori utilizzati in PASS sono stati sottoposti ad uno studio finalizzato alla loro calibrazione. I fattori geometrici e di movimento sono stati calibrati sia attraverso l'utilizzo di modelli di simulazione (Tosolini 2008), sia ricorrendo ad un approccio sperimentale (S. Grimaz, Dusso et al. 2014; Tosolini, Pecile e S. Grimaz 2012).

11. L'evacuazione in caso di incendio

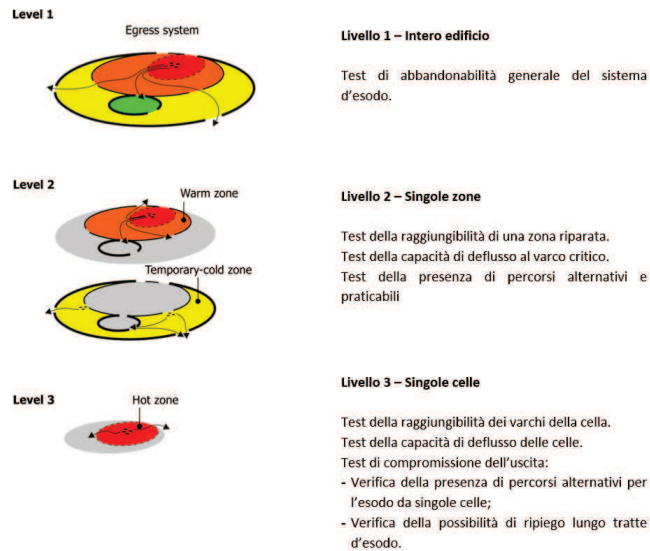


Figura 11.4: Analisi multilivello della vulnerabilità del sistema d'esodo e test eseguiti con il metodo PASS. (Immagine tratta da S. Grimaz e Tosolini (2013), modificata)

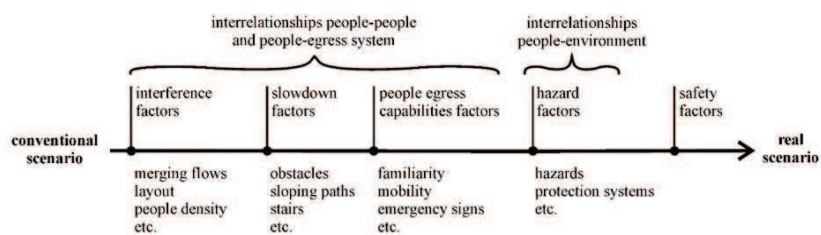


Figura 11.5: Fattori utilizzati nell'analisi per considerare le interazioni tra persone - edificio - condizioni ambientali. (Immagine tratta da S. Grimaz e Tosolini (2013)).

11.2. Il metodo PASS: principi e principali caratteristiche

Tabella 11.1: Descrizione di fattori introdotti in PASS per considerare le diverse interazioni tra persone - edificio - ambiente.

Fattori	Elementi considerati
Fattori d'interferenza	Interazioni causate dalla presenza di flussi convergenti, dal layout del sistema d'esodo e dall'affollamento.
Fattori di rallentamento	Caratteristiche intrinseche del sistema d'esodo che rallentano il movimento delle persone, come ad esempio la presenza di ostacoli, di tratte irregolari (sia in riferimento alla larghezza che alla pendenza), di scale.
Fattori di autogestione	Caratteristiche delle persone in termini di familiarità con gli ambienti, mobilità e presenza della segnaletica d'emergenza.
Fattori di pericolosità	Eventuale presenza di materiali pericolosi e sistemi di protezione che possono rispettivamente diminuire o aumentare il tempo massimo a disposizione per l'allontanamento da una zona.
Fattori di sicurezza	Incertezza nell'analisi dovuta alla variabilità degli scenari e alle caratteristiche non deterministiche del comportamento umano.

Quest'ultimo approccio ha inoltre consentito lo studio dei fattori relativi agli aspetti comportamentali.

Lo studio sperimentale è stato realizzato utilizzando il laboratorio LabCUBE_{egress} (Tosolini, Pecile e S. Grimaz 2012) ed ha consentito anche di ricavare alcune indicazioni utili per la gestione delle emergenze o la progettazione della sicurezza dei sistemi d'esodo.

Nel seguito verranno presentati i principali risultati ottenuti dalle sperimentazioni effettuate con il laboratorio LabCUBE_{egress}.

Capitolo 12

Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

Il buon esito di una evacuazione dipende dal fatto che il tempo richiesto per l'evacuazione (RSET) sia minore del tempo di raggiungimento delle condizioni di insostenibilità (ASET) (Figura 11.2), come delineato nel paragrafo 11.1.

Il tempo di movimento è il tempo impiegato dagli occupanti a muoversi attraverso il sistema di vie d'esodo e a raggiungere una zona sicura, rappresenta quindi una delle componenti che concorrono a determinare RSET (Required Safe Evacuation Time) e dipende essenzialmente dalla distanza percorsa e dalla velocità con cui le persone si muovono. Tuttavia, mentre la distanza dipende del percorso d'esodo scelto, la velocità di movimento è di più complessa determinazione, essendo legata sia alle caratteristiche geometriche del sistema d'esodo, sia alle caratteristiche delle persone, come messo in luce da vari studi in letteratura, ad esempio nella SFPE Engineering Guide to Human Behaviour in Fire (SFPE 2003).

Tralasciando l'effetto delle dinamiche comportamentali sulle dinamiche di movimento ed inserendosi pertanto nell'ambito dei cosiddetti modelli idraulici dell'evacuazione, ossia quei modelli che assimilano il movimento delle persone al movimento di un fluido (Gwynne e Rosenbaum 2016; Nelson e Mowrer 2002), è possibile sviluppare delle correlazioni tra la velocità di movimento e la densità di persone lungo una tratta d'esodo. Le relazioni sviluppate nell'ambito dei modelli idraulici dell'evacuazione sono di natura empirica, basate sui dati acquisiti da numerosi esperimenti ed osservazioni.

Queste correlazioni consentono la stima di un valore di riferimento del tempo di movimento. In generale, nel caso di un'evacuazione reale il tempo di movimento effettivo potrebbe essere più lungo di quello stimato a causa delle dinamiche comportamentali e di altri fattori di disturbo o interferenza, come indicato in Tabella 11.1.

Lo studio che verrà presentato nel seguito si focalizza sul movimento delle persone in percorsi che consentono il passaggio in fila indiana e caratterizzati dalla presenza di curve. La necessità di studiare il movimento in questo tipo di percorsi nasce dalla considerazione che in particolare in ambito industriale o

12.1. Il laboratorio LabCUBE_{egress}

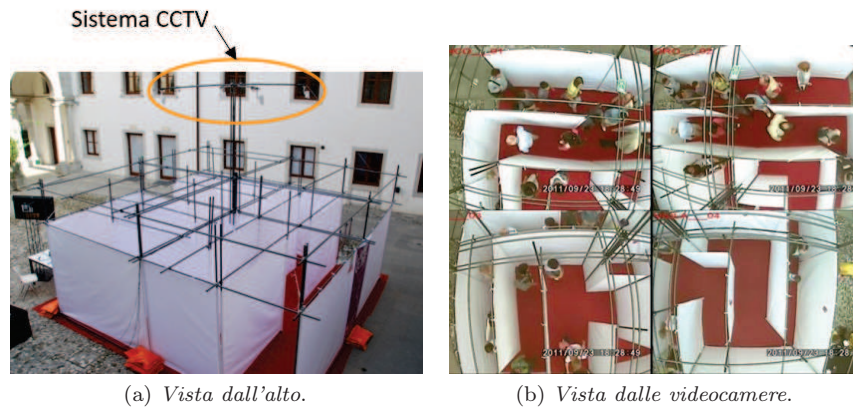


Figura 12.1: Immagini del LabCUBE_{egress}.

nelle attività che hanno sede in edifici storici, le persone possono essere obbligate a muoversi attraverso percorsi complessi, caratterizzati appunto dalla presenza di curve e da larghezze che consentono il passaggio di una unica fila di persone. Le sperimentazioni condotte nel laboratorio LabCUBE_{egress} hanno consentito di investigare alcuni fattori che influenzano il tempo di movimento, una delle componenti del RSET (Figura 11.2).

12.1 Il laboratorio LabCUBE_{egress}

Il laboratorio sperimentale LabCUBE_{egress} è stato sviluppato dal Gruppo di Ricerca SPRINT (Università degli Studi di Udine) nell'ambito del progetto di ricerca "Emergenza e Sicurezza nelle Attività Complesse" finanziato dall'INAIL - Direzione Regionale Friuli Venezia Giulia, per studiare il movimento e il comportamento delle persone durante l'esodo.

Grazie a diverse sperimentazioni è stato possibile raccogliere numerosi dati comportamentali e di movimento che sono stati sia integrati in PASS, sia tradotti in indicazioni per la progettazione dei sistemi d'esodo e per la gestione del processo d'esodo.

LabCUBE_{egress} consente di focalizzare l'analisi sui fattori che caratterizzano le interazioni persona-persona e persona-sistema d'esodo.

Il laboratorio ha una struttura modulare e permette di creare una molteplicità di configurazioni geometriche grazie all'utilizzo di un numero variabile di elementi cubici (Figura 12.1).

È così possibile riprodurre diverse configurazioni di un sistema d'esodo caratterizzate da diversi gradi di complessità e dalla presenza di criticità che influenzano il movimento e comportamento delle persone, come ad esempio flussi contrapposti alle uscite, ostacoli, bivi, etc..

Grazie alla sua modularità, il laboratorio si presta allo studio di diverse tipologie di scenari e fattori anche durante un singolo esperimento, ottimizzando così la raccolta degli importanti dati sperimentali. Inoltre, grazie alla sua struttura smontabile e riposizionabile, il laboratorio può essere collocato in luoghi in cui un grande numero di persone, sia singoli partecipanti che gruppi, possono partecipare agli esperimenti.

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

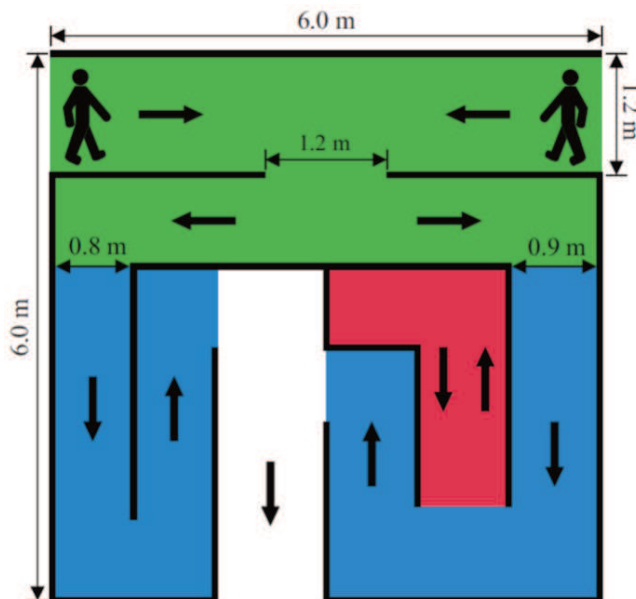


Figura 12.2: Layout del LabCUBE_{egress}. (Immagine tratta da Tosolini, S. Grimaz e Salzano (2013))

In questo modo è possibile studiare le varie configurazioni geometriche e valutare l'efficacia delle soluzioni proposte per gestire al meglio il movimento delle persone che, grazie all'utilizzo di un sistema di videocamere, può essere registrato per una sua analisi a posteriori.

I fattori che governano le interazioni studiate sono così valutati sia in modo qualitativo che quantitativo. LabCUBE_{egress} permette quindi di unire i vantaggi degli esperimenti in laboratorio (sistematicità e controllo dell'ambiente) con le osservazioni condotte durante il normale movimento delle persone (raccolta di dati relativi a persone eterogenee e non formate). Inoltre, poiché le persone partecipano attivamente agli esperimenti, possono sperimentare in prima persona e in un ambiente sicuro un'esperienza che replica alcune criticità che potrebbero ritrovare durante il movimento in spazi non familiari.

12.1.1 Il layout del LabCUBE_{egress}

Grazie alla sua flessibilità, il layout del LabCUBE_{egress} può variare da sperimentazione a sperimentazione, o anche durante uno stesso esperimento, in base alle esigenze dettate dalla ricerca.

A titolo esemplificativo in Figura 12.2 è riportato il layout utilizzato in diverse sperimentazioni realizzate durante la Notte dei Ricercatori (Palazzo Morpurgo, Udine, 23.09.2011) e il Festival della Sicurezza tra la Gente (Palazzo Morpurgo, Udine, 19.05.2012). Come emerge da Figura 12.2, all'interno del LabCUBE_{egress} possono essere identificate tre diverse sezioni e durante ogni esperimento in ogni sezione può essere studiato un determinato fattore che caratterizza le interazioni persona - persona e persona - sistema d'esodo.

Nella sezione verde, è ad esempio possibile studiare gli effetti che i flussi convergenti a un varco hanno sulla capacità di sfollamento e quelli della segnaletica

12.2. Studi sulle dinamiche di movimento

d'emergenza ad un bivio sui processi decisionali delle persone. Le variazioni di velocità delle persone in percorsi di diversa larghezza e sviluppo orizzontale sono invece analizzate nella sezione blu. Infine, la sezione rossa è dedicata allo studio del comportamento delle persone in presenza di percorsi ciechi.

Queste analisi sono di fondamentale importanza per acquisire dati sperimentali da utilizzare nei modelli ingegneristici (ad esempio valori di velocità e capacità di sfollamento richiesti dei modelli di simulazione d'esodo) o per la gestione dei sistemi d'esodo (posizionamento della segnaletica d'emergenza nei punti critici dal punto di vista decisionale). L'osservazione del comportamento delle persone in condizioni di criticità è anche utile per individuare sperimentalmente le strategie di miglioramento da utilizzare anche in sistemi d'esodo esistenti o in fase di progettazione.

Parte dei risultati ottenuti da una serie di sperimentazioni realizzate con il LabCUBE_{egress} sono stati analizzati da Tosolini, Pecile e S. Grimaz (2012) con lo scopo di quantificare l'influenza della segnaletica d'emergenza sui processi decisionali delle persone ad un bivio (area verde in Figura 12.2).

Nel seguito sono invece riportati i risultati dello studio finalizzato ad analizzare le dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza (area blu in Figura 12.2).

I risultati ottenuti hanno consentito di verificare uno dei fattori di rallentamento (Tabella 11.1) introdotti nel metodo PASS.

12.2 Studi sulle dinamiche di movimento

La velocità di movimento delle persone è stata riconosciuta avere un'influenza molto importante sul tempo di movimento e quindi sull'esito di una evacuazione. La ricerca ha analizzato le velocità di movimento in scenari e situazioni diverse, ad esempio Predtechenskii e Milinskii (1978) hanno considerato il movimento delle persone in edifici pubblici, Hankin e Wright (1958) hanno considerato il movimento lungo le banchine delle metropolitane, Mori e Tsukaguchi (1987) e Older (1968) lungo i marciapiedi di centri urbani o all'interno di tunnel (ad esempio Fridolf et al. (2013)). Numerosi studi si sono focalizzati sul movimento lungo le scale (ad esempio Hoskins (2013), R. Kuligowski E. P. et al. (2015) e Pauls, Fruin e Zupan (2007)), che rivestono un ruolo di primaria importanza nell'evacuazione di edifici alti.

Altri studi hanno studiato il movimento delle persone attraverso sperimentazioni in laboratorio considerando diverse configurazioni sperimentali: Seyfried et al. (2005) hanno considerato il movimento in fila indiana lungo un percorso circolare, Daamen e Hoogendoorn (2005) hanno studiato diverse tipologie di flussi in corridoi ampi, mentre Kady (2012) ha analizzato il movimento a "quattro zampe" (*crawling*), per studiare le dinamiche di movimento nel caso in cui i fumi riempiano la parte superiore delle vie di fuga.

L'analisi della letteratura ha mostrato come vi sia in generale una mancanza di dati relativi all'evacuazione lungo percorsi stretti e complessi.

Boundary layer clearance

Una prima importante osservazione emersa dagli studi sulle dinamiche di movimento, si vedano ad esempio Pauls (1980) è che le persone nel loro movimento

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

Tabella 12.1: Larghezze del boundary layer per diverse tipologie di percorsi (tratta da Nelson e Mowrer (2002)).

Tipo di tratta d'esodo, varco o ostacolo	Boundary layer (cm)
Ringhiere e corrimano	9
Ostacoli vari	10
Scale	15
Pareti di corridoi o rampe	20
Atri e passaggi ampi	46
Varchi e porte	15

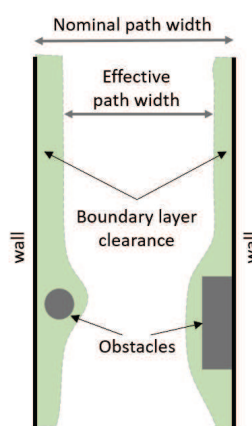


Figura 12.3: Rappresentazione schematica della larghezza efficace in un corridoio.

lungo una tratta d'esodo si mantengono a una certa distanza dalle pareti o da altri ostacoli presenti (corrimano, ostacoli fissi, ecc.). Questa distanza è nota in letteratura con il termine di *boundary layer clearance* ed è necessaria per consentire le oscillazioni laterali che caratterizzano il movimento delle persone.

La larghezza del boundary layer è stata quantificata in funzione del tipo di percorso o di ostacoli presenti (Tabella 12.1), pertanto qualsiasi tratta d'esodo è caratterizzata oltre che dalla larghezza nominale, anche dalla cosiddetta larghezza efficace (Figura 12.3), ottenuta depurando la larghezza nominale dal boundary layer clearance.

Velocità di movimento

L'analisi degli esperimenti condotti da diversi autori nel corso degli anni ha consentito di evidenziare una relazione tra densità di affollamento lungo una tratta d'esodo e la velocità di movimento delle persone. Tale relazione, nota in letteratura con il termine di "curva standard", è stata presentata nell'Handbook of Fire Protection Engineering da Nelson e Mowrer (2002) e derivata dagli esperimenti di Fruin (1987), Pauls (1980) e Predtechenskii e Milinskii (1978).

Secondo Nelson e Mowrer (2002), quando la densità di affollamento è inferiore a 0.54 persone/m^2 , gli individui si muovono con il proprio passo e non sono rallentati nel loro movimento dalle altre persone. Al contrario quando la densità di affollamento supera il valore di 3.8 persone/m^2 , il percorso è talmente

12.2. Studi sulle dinamiche di movimento

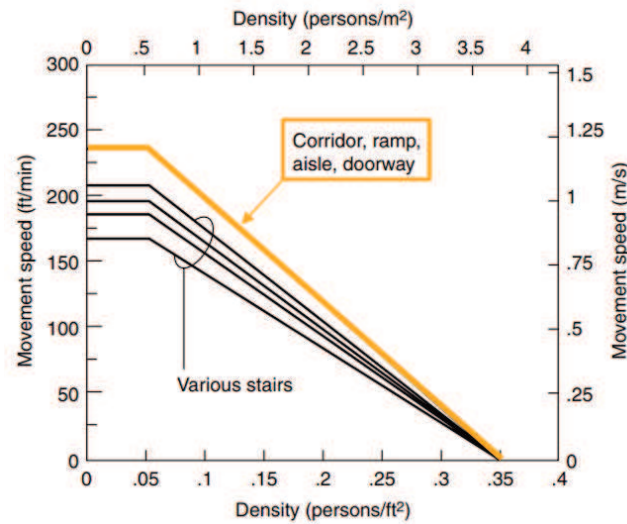


Figura 12.4: Velocità di movimento in funzione della densità di affollamento per diverse tipologie di percorsi (Immagine tratta da Nelson e Mowrer (2002), modificata).

Tabella 12.2: Larghezze del boundary layer per diverse tipologie di percorsi (tratta da Nelson e Mowrer (2002)).

Tipo di tratta d'esodo			Costante k
Corridoi, pianerottoli, rampe			1.40
Scale	Alzata (m)	Pedata (m)	
	0.191	0.254	1.00
	0.178	0.279	1.08
	0.165	0.305	1.16
	0.165	0.330	1.23

congestionato da impedire il movimento. Per valori intermedi della densità, la velocità diminuisce progressivamente secondo la seguente relazione:

$$S = k - a \cdot k \cdot D \quad (12.1)$$

Dove S è la velocità lungo la direzione di movimento (in m/s); D è la densità espressa in persone/m²; k è una costante che dipende dal tipo di percorso (Tabella 12.2); a è una costante sperimentale il cui valore è 0.266. L'equazione è rappresentata in Figura 12.4, dove si può osservare l'effetto della densità sulla velocità di movimento.

S. Grimaz e Pini (1999) sulla base di osservazioni sperimentali, hanno notato come il deflusso attraverso una tratta d'esodo o un varco è influenzato oltre che dalla densità di affollamento, anche dal fatto che il movimento delle persone avvenga secondo file.

Le osservazioni dei due autori hanno evidenziato come il deflusso in file sia influenzato dalla larghezza del *franco*, inteso come la differenza tra la larghezza nominale del passaggio e la larghezza complessiva di ingombro delle file: se la larghezza del franco è tale da lasciare uno spazio libero di almeno 0.10 m

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

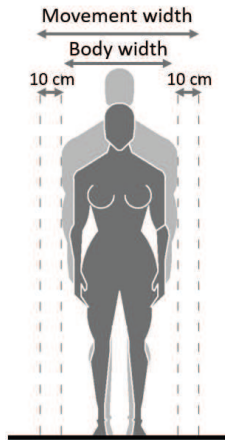


Figura 12.5: Definizione della larghezza di ingombro e dello spazio necessario per il libero movimento delle persone.

su entrambi i lati di ogni fila (Figura 12.5) non si verificano rallentamenti nel deflusso. Fruin (1987) e Pauls, Fruin e Zupan (2007), basandosi su osservazioni sperimentali, riportano che è necessario uno spazio di circa 0.10 m su ciascun lato del corpo per consentire le oscillazioni laterali che caratterizzano il movimento delle persone.

Se il franco non è tale da soddisfare questo requisito si possono verificare rallentamenti nel movimento a causa delle interazioni tra le file o della mancanza di uno spazio sufficiente alle oscillazioni laterali che caratterizzano il movimento delle persone.

12.3 Esperimenti LabCUBE_{egress} e metodologia di analisi

Gli esperimenti si sono tenuti in due occasioni, durante la Notte dei Ricercatori (Palazzo Morpurgo, Udine, 23.09.2011) e il Festival della Sicurezza tra la Gente (Palazzo Morpurgo, Udine, 19.05.2012) e hanno coinvolto un totale di oltre 400 persone.

Le caratteristiche delle persone coinvolte negli esperimenti erano eterogenee sia per quanto riguarda l'età che il genere e l'estrazione sociale, in questo modo si possono ritenere rappresentative di una vasta porzione della società.

Le persone non erano state precedentemente formate sui comportamenti da tenere all'interno del LabCUBE_{egress}, prima di accedere al laboratorio è stato chiesto ai partecipanti di muoversi come se dovessero allontanarsi da una situazione di pericolo e raggiungere una zona sicura. Per ragioni di sicurezza è stato chiesto di non correre.

Le sperimentazioni sono state registrate attraverso un sistema CCTV e i dati raccolti successivamente analizzati.

Il layout del LabCUBE_{egress} è stato settato per studiare le dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi che consentono il movimento in una unica fila.

12.3. Esperimenti LabCUBE_{egress} e metodologia di analisi

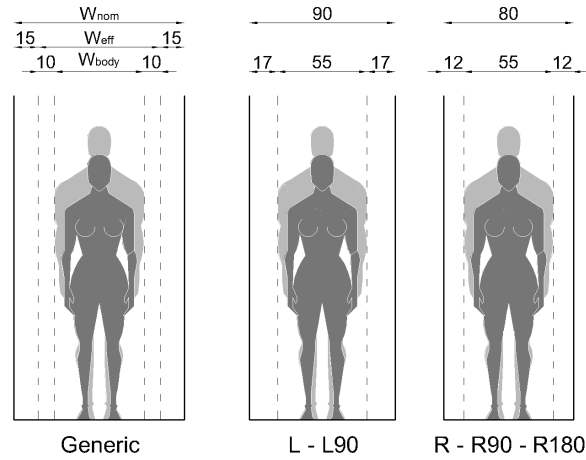


Figura 12.6: Caratteristiche geometriche dei corridoi studiati. A sinistra un percorso caratterizzato da un franco (definito come differenza tra larghezza nominale e larghezza di ingombro delle persone) sufficiente a garantire il libero movimento delle persone. Al centro e a destra i corridoi studiati nelle sperimentazioni LabCUBE_{egress}.

Tabella 12.3: Caratteristiche dei percorsi studiati nel LabCUBE_{egress}.

Case ID	Persone coinvolte	Tipo di percorso	Larghezza del percorso (m)	Lunghezza del percorso (m)
R	150	Dritto	0.80	2.50
L	295	Dritto	0.90	2.40
R90	149	Curva 90°	0.80	4.50
L90	293	Curva 90°	0.90	4.30
R180	150	Curva 180°	0.80	5.50

Sono stati così creati due percorsi caratterizzati da larghezze nominali di 0.90 m e 0.80 m. Entrambi i percorsi sono caratterizzati da larghezza nominale maggiore della larghezza di ingombro standard di una persona, che può essere assunta pari a 0.55 m (S. Grimaz e Pini 1999; Pauls, Fruin e Zupan 2007), ma da una larghezza efficace inferiore allo spazio minimo per il movimento libero (Figura 12.6).

Complessivamente sono stati considerati i cinque scenari indicati in Figura 12.7. Le caratteristiche di ciascuno scenario sono riassunte in Tabella 12.3.

Partendo dall'analisi delle registrazioni delle sperimentazioni, con riferimento a ciascuno degli scenari in Figura 12.7, la velocità di movimento è stata calcolata semplicemente dividendo la lunghezza del percorso considerato per il tempo impiegato da ciascuna persona a percorrerlo. Le velocità così ottenute sono state poi messe in relazione con la densità di persone presenti lungo il percorso considerato. La densità di persone può essere interpretata come una misura di come lo spazio viene occupato durante il movimento, tuttavia in letteratura non esiste accordo sulle modalità per calcolarla, con diverse equazioni proposte da vari autori, come evidenziato da Hoskins (2013).

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

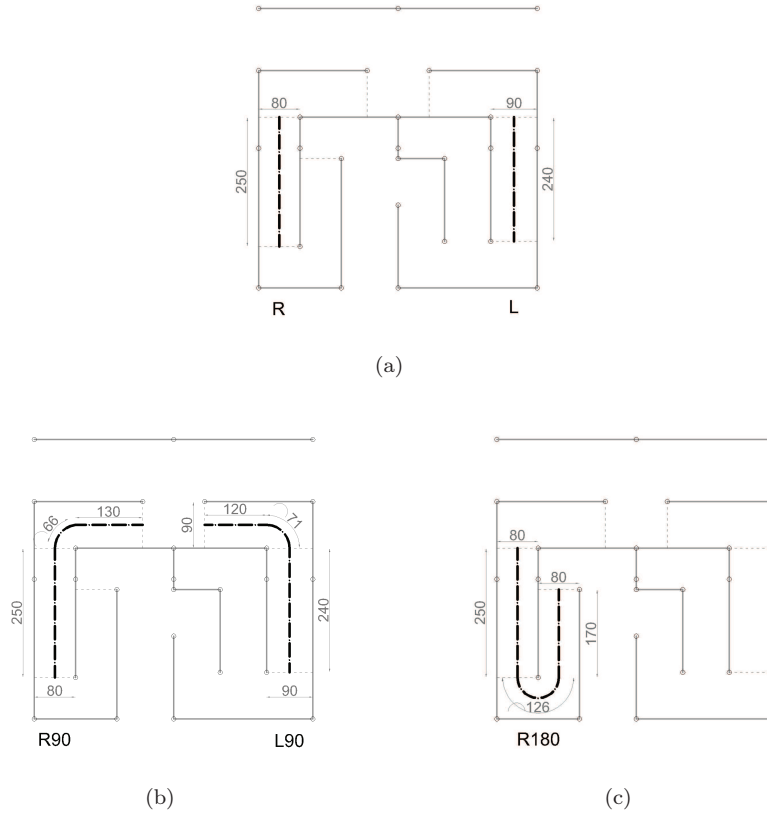


Figura 12.7: Tipologie di percorsi studiati nel LabCUBE_{egress}: (a) percorsi dritti; (b) percorsi con curve a 90°; (c) percorso con curva a 180°.

Nel presente studio la densità è stata calcolata dividendo il numero di persone presenti sul percorso considerato per la sua superficie. Per tener conto del fatto che le persone si muovono in fila indiana e quindi la densità aumenta man mano che nuove persone entrano nel percorso, il numero di persone (e quindi la densità) è stato aggiornato nel momento in cui una nuova persona entra nel percorso. In questo modo è stato possibile associare la velocità di movimento al numero di persone e quindi alla densità effettivamente riscontrata nel momento in cui ogni persona entrava nel percorso (Figura 12.8).

12.3.1 Analisi dei risultati

L'analisi delle misure effettuate a partire dagli esperimenti ha consentito di acquisire dati sulle velocità di movimento in fila indiana e correlarli con le densità di affollamento sui percorsi. I risultati sono riportati in Figura .

Una prima osservazione di carattere generale è che un numero di persone maggiore è passata attraverso i percorsi individuati con la sigla L e L90, questo giustifica la maggiore dispersione delle velocità ottenute rispetto agli altri casi.

A una prima analisi i dati suggeriscono due osservazioni:

12.3. Esperimenti LabCUBE_{egress} e metodologia di analisi

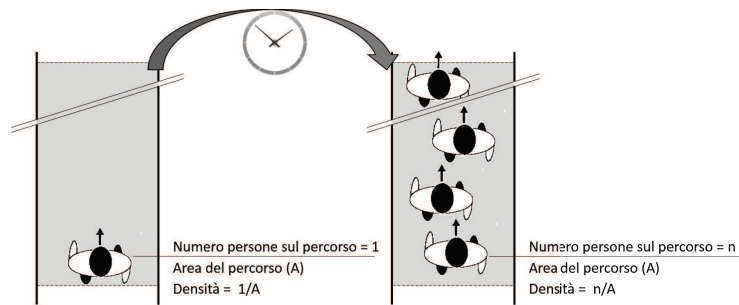


Figura 12.8: Calcolo della densità sui percorsi all'interno del LabCUBE_{egress}.

1. Esiste una chiara relazione tra la velocità di movimento e la densità di persone presenti, con la velocità che diminuisce progressivamente all'aumentare della densità. Questo conferma le osservazioni fatte in altri studi (ad esempio Nelson e Mowrer (2002)). Va comunque sottolineato che le sperimentazioni effettuate presentano una carenza di dati per densità superiori a circa 2 persone/m².
2. Fissato un range di valori per la densità di affollamento, non si osservano differenze di velocità evidenti dovute alla presenza di curve a 90° o a 180° rispetto alle velocità di movimento misurate sui percorsi rettilinei.
3. Fissato un range di valori per la densità di affollamento, non si osservano differenze di velocità evidenti dovute alle diverse larghezze dei percorsi (0.90 m e 0.80 m).

I dati ottenuti sono stati quindi analizzati statisticamente con lo scopo di valutare in modo più approfondito l'eventuale influenza della presenza di curve e della diversa larghezza dei percorsi. I risultati dell'analisi sono riportati in Tabella 12.4 sotto forma di *five-number summary*, includendo anche la media e la deviazione standard in accordo con ISO/TR 16738 (2009).

I dati relative alle velocità di movimento sono stati raggruppati in funzione di cinque classi di densità: $0 \div 0.55$; $0.55 \div 1.05$; $1.05 \div 1.55$; $1.55 \div 2.05$; $2.05 \div 2.55$. Solo per lo scenario L è stata introdotta una ulteriore classe di densità > 2.55 . I precedenti valori di densità sono espressi in persone/m². Si evidenzia comunque che vi è una carenza di dati per densità maggiori a circa 2 persone/m².

A una prima analisi i dati riportati in Tabella 12.4 confermano le osservazioni effettuate, non evidenziando differenze significative tra velocità di movimento in presenza di curve a 90° o a 180° rispetto alle velocità sui percorsi diritti. Analogamente la riduzione della larghezza del percorso da 0.90 m a 0.80 m, non comporta riduzioni di velocità significative.

Il test *t* o test di Student è stato applicato per verificare tali osservazioni.

I dati di velocità in riferimento a ogni classe di densità nelle diverse configurazioni studiate sono distribuiti secondo una distribuzione approssimativamente normale. Si è inoltre verificato che i campioni considerati fossero indipendenti e si sono esclusi dall'analisi gli outliers è stato quindi possibile applicare il test *t* per la differenza tra le medie di due popolazioni con varianza non nota.

L'ipotesi nulla che si è voluto verificare è la seguente: la differenza tra le velocità medie relative alla stessa classe di densità di persone ma a percorsi con

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

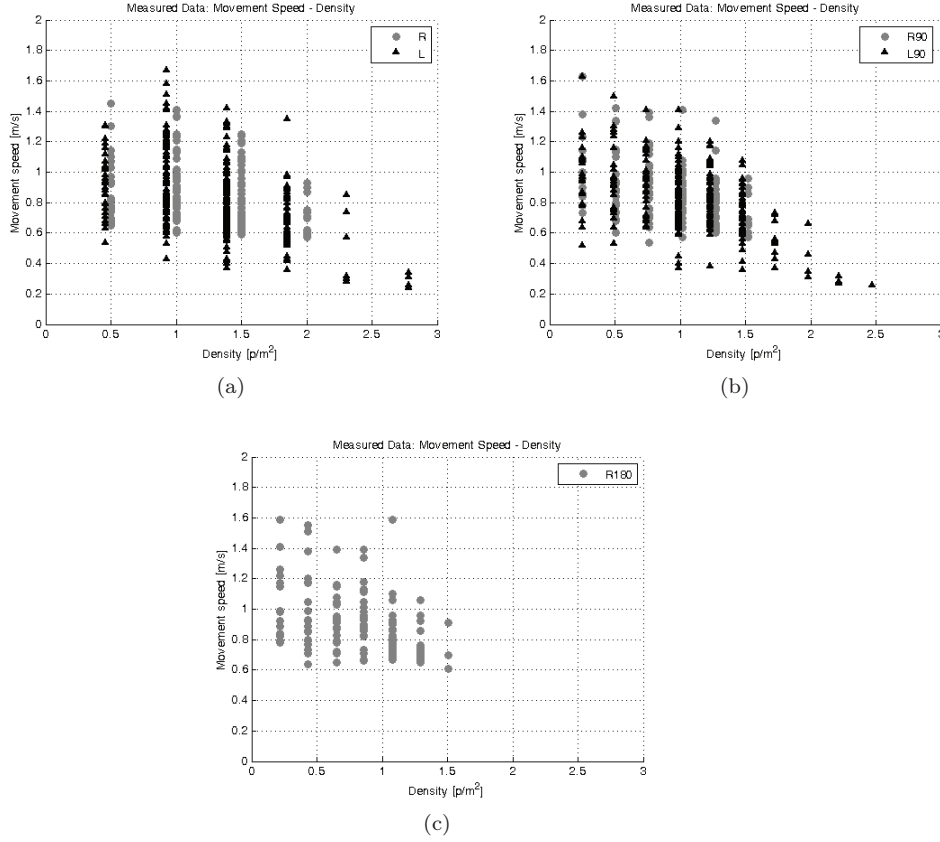


Figura 12.9: Velocità di movimento misurate nel LabCUBE_{egress} (a) lungo percorsi dritti di larghezza 0.8 m (scenario R) e 0.9 m (scenario L); (b) lungo percorsi con curve a 90° di larghezza 0.8 m (scenario R90) e 0.9 m (scenario L90); (c) lungo percorsi con curva a 180° e larghezza 0.8 m (scenario R180).

caratteristiche diverse (presenza/assenza di curve oppure stesso tipo di percorso ma larghezze nominali diverse, 0.8 m contro 0.90 m) non è significativa, ma dovuta a variabili casuali.

Il test di Student consente di calcolare la probabilità che l'ipotesi nulla non sia vera, il test viene considerato come significativo e l'ipotesi nulla viene rifiutata se $P(T \leq t)$ è inferiore al 5% (0.05). Il parametro $P(T \leq t)$ rappresenta la probabilità della ipotesi nulla, ovvero dell'ipotesi "le medie sono uguali". I risultati ottenuti dal test t sono riassunti in Tabella 12.5 per i diversi casi esaminati.

Per tutti i casi considerati in Tabella 12.5, i risultati ottenuti attraverso il test di Student portano a considerare le differenze tra le velocità medie come non significative e l'ipotesi nulla è quindi confermata. Questo significa che le differenze dipendono da fattori casuali e non è dimostrabile che dipendano dalle diverse configurazioni dei percorsi in termini di presenza di curve o di larghezze diverse.

Fa eccezione il confronto tra i casi L e L90 quando la densità di affollamento

12.3. Esperimenti LabCUBE_{egress} e metodologia di analisi

Tabella 12.4: Velocità di movimento misurate durante le sperimentazioni nel LabCUBE_{egress} per i diversi tipi di percorsi.

Case ID	Densità (persone/m ²)	Velocità di movimento (m/s)						
		min	1° quart.	mediana	3° quart.	max	media	sqm
R	< 0.55	0.7	0.8	0.9	1.1	1.5	0.9	0.2
	0.551.05	0.6	0.8	0.8	1.0	1.4	0.9	0.2
	1.051.55	0.6	0.7	0.7	0.9	1.3	0.9	0.2
	1.552.05	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.7	0.1
L	< 0.55	0.5	0.8	0.9	1.1	1.9	0.8	0.3
	0.551.05	0.4	0.8	0.9	1.2	1.7	0.8	0.3
	1.051.55	0.4	0.7	0.8	0.9	1.4	0.8	0.2
	1.552.05	0.4	0.6	0.7	0.8	1.4	0.7	0.2
	2.052.55	0.3	0.3	0.4	0.7	0.9	0.5	0.2
	> 2.55	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
R90	< 0.55	0.6	0.8	0.9	1.1	1.6	1.0	0.2
	0.551.05	0.5	0.8	0.9	1.0	1.4	0.9	0.2
	1.051.55	0.6	0.6	0.7	0.9	1.3	0.8	0.2
L90	< 0.55	0.5	0.8	0.9	1.1	1.6	0.9	0.2
	0.551.05	0.4	0.7	0.9	1.0	1.4	0.9	0.2
	1.051.55	0.4	0.7	0.8	0.9	1.2	0.8	0.2
	1.552.05	0.3	0.4	0.5	0.7	0.7	0.5	0.1
	2.052.55	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
R180	< 0.55	0.6	0.8	0.9	1.2	1.6	1.1	0.2
	0.551.05	0.7	0.8	0.9	1.0	1.4	0.9	0.2
	1.051.55	0.6	0.7	0.8	0.9	1.6	0.8	0.2

Tabella 12.5: Risultati del test t. $P(T \leq t)$ è la probabilità della ipotesi nulla, ovvero dell'ipotesi "le medie sono uguali".

Case ID		Classi di densità (persone/m ²)			
		< 0.55	0.551.05	1.051.55	1.552.05
L	Velocità media (m/s)	0.8	0.8	0.8	0.7
L90	Velocità media (m/s)	0.9	0.9	0.8	0.5
	Esito test t: $P(T \leq t)$	0.08	0.13	0.57	0.002
R	Velocità media (m/s)	0.9	0.9	0.7	-
R90	Velocità media (m/s)	1.0	0.9	0.8	-
	Esito test t: $P(T \leq t)$	0.74	0.82	0.53	-
R	Velocità media (m/s)	0.9	0.9	0.7	-
R180	Velocità media (m/s)	1.1	1.0	0.8	-
	Esito test t: $P(T \leq t)$	0.31	0.23	0.11	-
R	Velocità media (m/s)	0.9	0.9	0.7	-
L	Velocità media (m/s)	0.8	0.8	0.8	-
	Esito test t: $P(T \leq t)$	0.35	0.57	0.44	-
R90	Velocità media (m/s)	1.0	0.9	0.8	-
L90	Velocità media (m/s)	0.9	0.9	0.8	-
	Esito test t: $P(T \leq t)$	0.77	0.69	0.27	-

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

è compresa tra 1.55 e 2.05 persone/m² in cui il risultato del test ($P(T \leq t)=0.002$) suggerisce che la differenza tra le medie sia significativa, questo porta a supporre che la presenza di curve, quando la densità di persone che si muovono in fila indiana è superiore a 1.55 persone/m² può effettivamente causare un rallentamento nel movimento.

Non è stato possibile estendere l'analisi considerando densità di affollamento maggiori a causa della mancanza di dati sperimentali.

12.4 Confronto dei risultati sperimentali con la curva standard e verifica del fattore di rallentamento incluso in PASS

Le velocità derivate dalle sperimentazioni LabCUBE_{egress} sono state confrontate con le velocità di movimento derivate attraverso il modello della curva standard proposto da Nelson e Mowrer (2002).

Il confronto (Figura 12.10) ha mostrato come la relazione tra velocità e densità misurate nelle sperimentazioni LabCUBE_{egress} segua effettivamente l'andamento definito dalla curva standard, tuttavia le caratteristiche dei percorsi studiati sembrano causare una riduzione della velocità di movimento rispetto alla velocità che si avrebbe in un ideale percorso "largo" ossia la cui larghezza efficace è maggiore dello spazio minimo per il movimento.

Si è osservato come questa riduzione sia sostanzialmente indipendente dalla densità di affollamento: considerando il primo quartile delle velocità misurate la riduzione di velocità rispetto alla curva standard è nell'ordine del 30%, considerando la mediana, la riduzione è del 20% circa, mentre considerando il terzo quartile la riduzione scende al 5%.

Queste riduzioni nelle velocità di movimento sono state riscontrate in tutti gli scenari considerati, pertanto possono essere assunte come rappresentative dell'effetto di un percorso "stretto", ossia caratterizzato da una larghezza efficace inferiore allo spazio minimo necessario per il movimento, rispetto a un ideale percorso largo. In Tabella 12.6 sono riportati più in dettaglio i valori di riduzione della velocità di movimento rispetto al valore stimato con il modello della curva standard.

Il metodo PASS introduce un fattore di rallentamento nel caso in cui la larghezza della via d'esodo non lasci un franco sufficiente al libero movimento delle persone. Il fattore di riduzione dipende dal numero di file di persone che percorrono la tratta d'esodo.

La riduzione di velocità prevista in PASS nel caso dei percorsi considerati nel LabCUBE_{egress} è pari al 13%, si può quindi osservare che il metodo PASS prevede correttamente una riduzione di velocità, tuttavia per una stima più cautelativa di tale effetto, gli esperimenti condotti suggeriscono di incrementare ulteriormente tale fattore al 20%.

Considerazioni finali

Le informazioni ottenute attraverso le sperimentazioni LabCUBE_{egress} risultano essere di utilità pratica, infatti da un lato evidenziano come la presenza di percorsi stretti possa determinare un rallentamento nell'uscita, costituendo così

12.4. Confronto dei risultati sperimentali con la curva standard e verifica del fattore di rallentamento incluso in PASS

Tabella 12.6: Riduzione della velocità di movimento rilevata lungo i percorsi nel LabCUBE_{egress} rispetto alle velocità dedotte dalla curva standard per un ideale corridoio largo e confronto con previsione PASS.

Case ID	Larghezza nominale (m)	Riduzione dalle misure sperimentali			Previsione PASS
		1° quart.	Mediana	3° quart.	
R - R90 - R180	0.8	28%	20%	4%	13%
L - L90	0.9	28%	18%	0%	13%

un fattore di interferenza nel processo di esodo e causando un incremento del tempo di movimento, contribuendo così a determinare un aumento del valore di RSET.

D'altro canto l'osservazione delle dinamiche di movimento nelle sperimentazioni LabCUBE_{egress} ha consentito di evidenziare come, anche attraverso percorsi stretti, l'esodo possa avvenire in modo fluido se avviene organizzato in file. Questo aspetto risulta di fondamentale importanza anche per la formazione delle persone ai comportamenti da tenere in caso di emergenza.

I dati ottenuti sono stati confrontati con il fattore di rallentamento presente in PASS per considerare l'interferenza dei percorsi con larghezza non sufficiente a consentire il libero movimento delle persone. Il confronto ha mostrato come in PASS venga correttamente previsto un rallentamento nella velocità di movimento, per una più conservativa valutazione, i risultati sperimentali mostrano che sarebbe opportuno incrementare ulteriormente questo fattore dal 13% al 20%.

Va comunque sottolineato che l'analisi è stata effettuata considerando una popolazione eterogenea, costituita da sole persone adulte senza problemi di mobilità e in condizioni di non emergenza, pertanto i dati ottenuti potrebbero non essere rappresentativi di una reale condizione di emergenza.

I test di vulnerabilità per l'obiettivo di sicurezza 4 - "Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti", implementati attraverso il metodo PASS, sono stati applicati per valutare la performance di una parte del sistema d'esodo del Teatro Verdi di Pordenone. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i risultati di una evacuazione non preannunciata, organizzata in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, tenutasi il 10 febbraio 2015 che ha coinvolto oltre 300 persone.

I risultati ottenuti saranno presentati nel prossimo capitolo.

12. Dinamiche di movimento delle persone attraverso percorsi di diversa larghezza

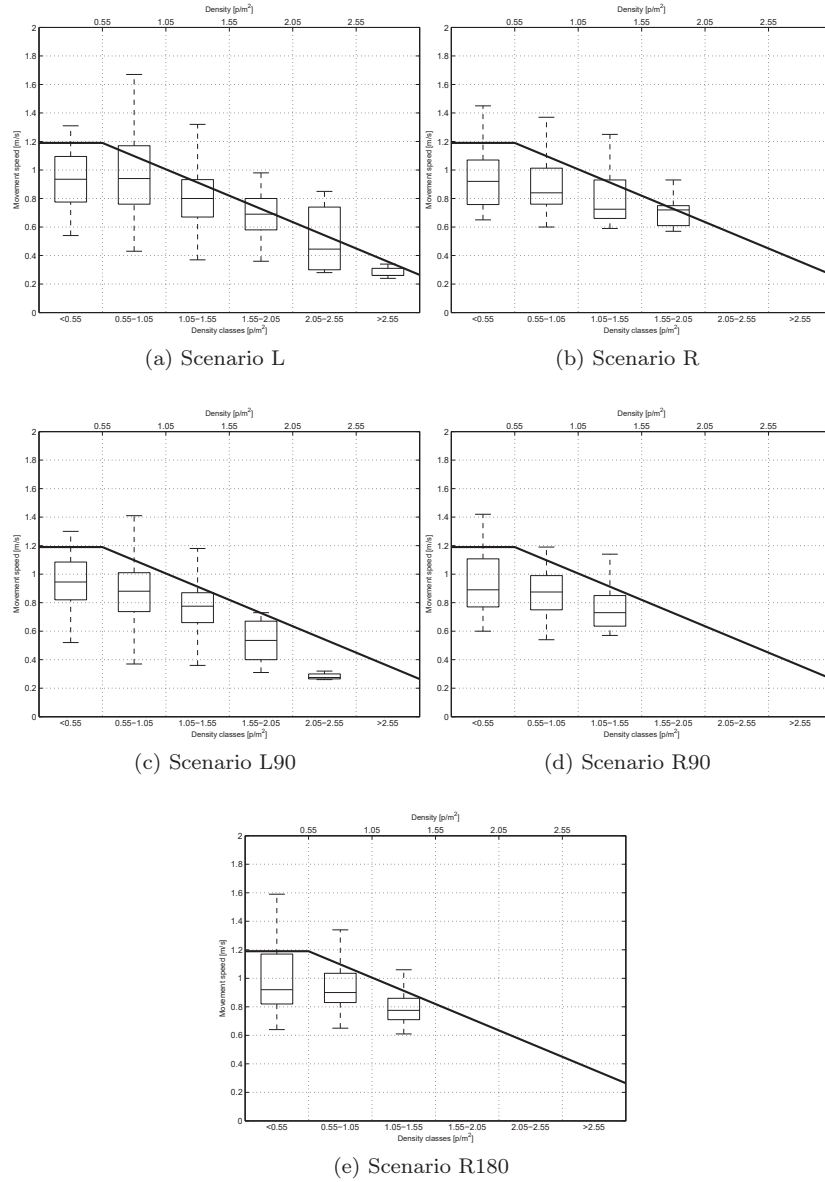


Figura 12.10: Confronto tra le velocità di movimento misurate nel LabCUBE_{egress}, rappresentate con boxplot per ogni classe di densità e la curva standard (Nelson e Mowrer 2002): (a) percorso diretto di larghezza 0.9 m (scenario L); (b) percorso diretto di larghezza 0.8 m (scenario R); (c) percorso con curva a 90° di larghezza 0.9 m (scenario L90); (d) percorso con curva a 90° di larghezza 0.8 m (scenario R90); (e) percorso con curva a 180° di larghezza 0.8 m (scenario R180).

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 13

Applicazione dei test di vulnerabilità a un caso studio

I test di vulnerabilità per l'obiettivo di sicurezza 4 - "Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti" sono stati implementati a partire dal metodo PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013). In studi precedenti PASS è stato applicato a un caso studio e i risultati ottenuti confrontati con i risultati di simulazioni numeriche e di una prova di evacuazione (S. Grimaz e Tosolini 2013).

In questo lavoro i test di vulnerabilità (riportati in appendice) sono stati applicati a un nuovo caso studio con lo scopo di verificarne le capacità come strumento che consente una rapida individuazione delle criticità del sistema d'esodo. I risultati ottenuti dall'applicazione dei test sono stati confrontati con i risultati di una prova di evacuazione non preannunciata, organizzata in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, tenutasi il 10 febbraio 2015 presso il Teatro Verdi di Pordenone che ha coinvolto oltre 300 persone. I risultati del confronto verranno presentati nel Capitolo 14.

13.1 Caratteristiche dello scenario studiato

Lo scenario studiato è una parte del sistema d'esodo del Teatro Verdi di Pordenone (Italia) composto dai seguenti elementi (Figura 13.1):

- Platea;
- Cinque uscite di emergenza che collegano la platea direttamente con l'esterno (uscita A in Figura 13.1) o con il foyer (uscite B, C, D, E in Figura 13.1);
- Foyer;
- uscite di emergenza che collegano il foyer con l'esterno (uscite 1, 2, 3 in Figura 13.1).

La platea essendo leggermente inclinata presenta dei percorsi al suo interno caratterizzati dalla presenza di rampe e gradini per accedere alle uscite. I percorsi lungo il foyer invece sono orizzontali.

13.1. Caratteristiche dello scenario studiato

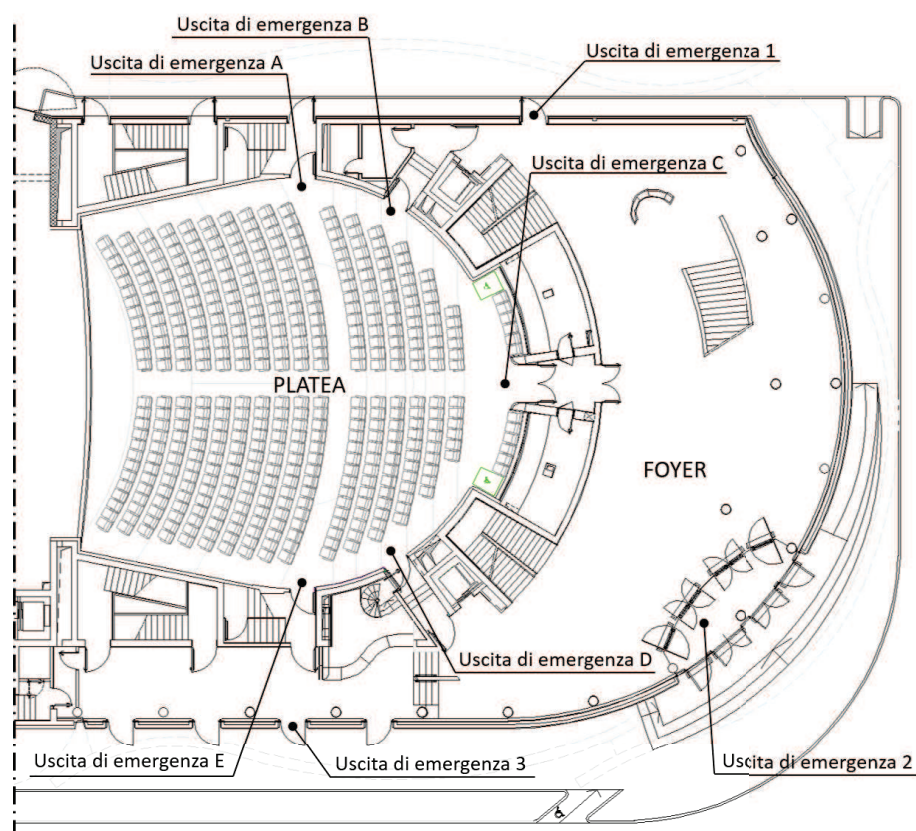


Figura 13.1: Schema dello scenario considerato.

13. Applicazione dei test di vulnerabilità a un caso studio

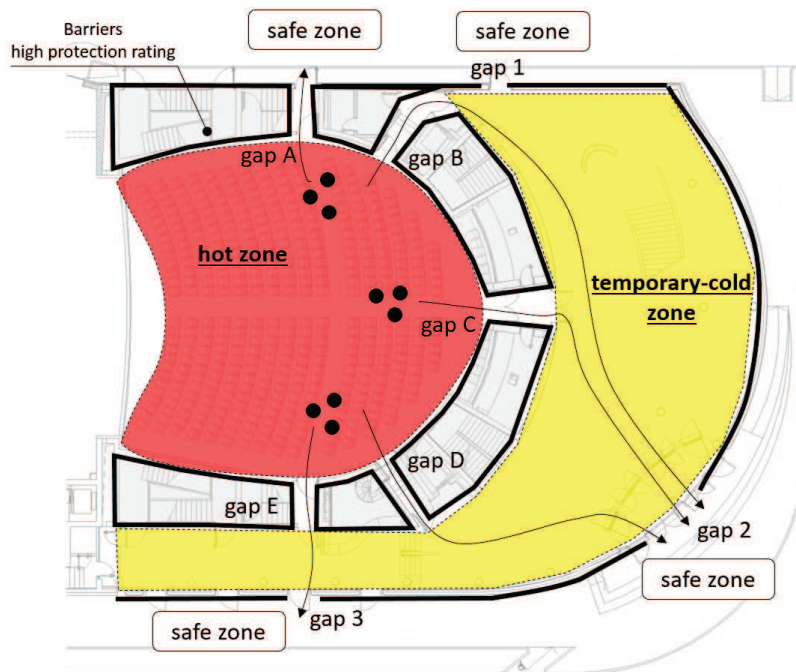


Figura 13.2: Schematizzazione dello scenario considerato secondo il modello concettuale delle frontiere d'esodo.

Facendo riferimento alla schematizzazione introdotta nel test di vulnerabilità e basta sul modello concettuale delle frontiere d'esodo, lo scenario considerato è stato schematizzato come in Figura 13.2. Il sistema d'esodo è quindi costituito da 2 celle C1 e C2 che rappresentano rispettivamente la platea e il foyer, 8 gaps (A, B, C, D, E, 1, 2, 3), 4 percorsi orizzontali che attraversano il foyer e 1 percorso orizzontale che collega direttamente la platea (cella C1) con l'esterno.

La cella costituita dalla platea viene schematizzata come hot zone a causa della presenza di materiale combustibile (poltrone, rivestimenti, materiale scenico), il foyer viene considerato come temporary-cold zone poichè è separato dalla platea da barriere con alto livello di protezione (pareti tagliafuoco e aperture con caratteristiche di filtri a prova di fumo). Le safe zones si trovano all'esterno dell'edificio, oltre le uscite gap A, gap 1, gap 2 e gap 3.

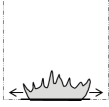
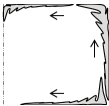
13.1.1 Definizione del livello di pericolosità

Ai fini dell'evacuazione il livello di pericolosità della cella viene determinato in relazione dei materiali combustibili presenti. Nel caso specifico lo scenario di incendio potenziale può essere descritto attraverso i due pittogrammi di seguito riportati. La velocità di crescita del fuoco è di tipo Slow in quanto si tratta di materiali non propaganti la fiamma.

La classe di pericolosità della platea è "b" bassa

13.2. Analisi del sistema d'esodo

Tabella 13.1: Definizione degli scenari potenziali di incendio in funzione delle caratteristiche dei fuel packages.

Scenario di incendio potenziale	Caratteristiche del fuel package
	Incendio a propagazione orizzontale prevalente. Oggetti combustibili (poltrone imbottite) adiacenti uno all'altro prevalentemente in orizzontale e distribuiti in file, su tutta la superficie della platea. Gli oggetti sono posti a livello del piano di calpestio.
	Incendio di rivestimenti. Materiali combustibili (legno, non propagante la fiamma) distribuiti con continuità lungo pareti, soffitto e pavimenti. Superficie rivestita > 50% della superficie interna totale della cella.

13.1.2 Caratteristiche dell'esposizione

Nel caso in esame l'esposizione è rappresentata dalle persone che occupano la platea. La capienza della platea è di 400 posti. Gli occupanti possono essere considerati come persone con mobilità e capacità di autogesione standard e nessuna familiarità con i luoghi.

13.2 Analisi del sistema d'esodo

13.2.1 Analisi di primo livello: Test di abbandonabilità generale del sistema d'esodo

Il test ha l'obiettivo di valutare se tutti gli occupanti presenti nell'edificio sono in grado di raggiungere un luogo sicuro entro il tempo di massimo convenzionale definito in funzione del livello di avversità riscontrato nell'edificio.

$$t_{max} = \max \left\{ \frac{L_T}{v_{rif}} \cdot CS; \left(\frac{P_T \cdot 350 \cdot f_d}{d_T} \cdot CS \right)^{\frac{1}{1.37}} \right\}$$

Per il caso specifico: L_T è la lunghezza del percorso più lungo necessario per raggiungere un luogo sicuro, in questo caso 62 m. La velocità di riferimento v_{rif} è assunta pari a 0.7 m/s. P_T è il numero totale delle persone presenti all'interno della hot zone che devono evacuare, in questo caso si assume pari alla capienza massima, ossia 400 persone. Il sistema d'esodo è a maglia con uscite multiple e f_d è il fattore di disturbo del deflusso che dipende dalla configurazione del sistema d'esodo, il fattore di disturbo del deflusso f_d assume valore 1. La somma delle larghezze effettive di tutte le aperture verso un luogo sicuro utilizzabili dal pubblico presente in platea d_T è pari a 1020 cm. CS è un coefficiente di sicurezza che dipende dalla presenza di un piano di evacuazione e dalla tipologia di persone presenti, nel caso specifico il piano è presente e vi è presenza di pubblico, il coefficiente CS pertanto vale 2.

Il test prevede un tempo t_{max} per l'abbandono generale del sistema d'esodo pari a 177 s, minore rispetto al tempo di riferimento stimato in funzione del

13. Applicazione dei test di vulnerabilità a un caso studio

livello di avversità in 480s. Pertanto il test non evidenzia potenziali criticità al primo livello di analisi (livello globale).

13.2.2 Analisi di secondo livello: la temporary-cold zone

Al secondo livello vengono eseguiti tre test per verificare se le persone possono abbandonare la warm zone e la temporary-cold zone e porre in evidenza eventuali criticità. Nel caso specifico, per le caratteristiche delle barriere che separano la platea (hot zone) dal foyer, non vi è la presenza di una warm zone. Pertanto il test viene eseguito solo con riferimento alla temporary-cold zone.

Test di raggiungibilità di una zona riparata o di una zona sicura

Il test ha lo scopo di verificare se il percorso d'esodo consente di raggiungere i varchi verso una zona riparata o una zona sicura entro un tempo di riferimento fissato in funzione del livello di avversità.

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{L \cdot f_e}{f_{dc} \cdot f_c} \right)_k \leq \frac{t_{rif} \cdot v_{rif} \cdot f_m}{CS}$$

Nel caso in esame la temporary-cold zone è caratterizzata da condizioni uniformi e vi sono solo percorsi orizzontali, pertanto $n = 1$ e il test viene eseguito con riferimento al percorso più lungo per raggiungere un varco verso una zona sicura. In particolare, la lunghezza L del percorso più lungo è pari a 23 m; il fattore di esposizione f_e in questo caso è uguale a 0 perchè la classe di avversità è trascurabile (assenza di materiale combustibile); lungo la tratta ci possono essere interferenze tra flussi di persone e il fattore di disturbo f_{dc} è pari a 0.9. Il fattore di criticità iniziale che caratterizza il percorso è uguale a 1.33 (livello di criticità iniziale trascurabile, assenza di impianti di spegnimento automatico e di evacuatori di fumo e calore, percorsi con possibilità di ripiego).

Il tempo di riferimento t_{rif} è uguale a 240 s, la velocità di riferimento v_{rif} è assunta 0.7 m/s e il fattore di mobilità f_m è uguale a 0.95 (non familiarità dei luoghi, sistemi di facilitazione all'esodo, mobilità standard), il coefficiente CS è uguale a 1.5 (presenza di piano di evacuazione).

Si ottiene quindi: $0 \leq 106$ il test è superato e non si evidenziano criticità relative alla raggiungibilità del varco verso una zona sicura.

Test della capacità di deflusso al varco critico

Con questo test viene verificato il numero massimo di persone che i varchi della tratta d'esodo considerata sono in grado di far defluire entro il tempo di riferimento. Analogamente al test precedente, anche questo viene condotto con riferimento alla sola temporary-cold zone.

$$P \leq P_{TEST} = \frac{d_{eff} \cdot t_{rif}^{1.37} \cdot f_{rd} \cdot f_{dd}}{350 \cdot f_{ci} \cdot CS}$$

Nel caso in esame la temporary-cold zone è caratterizzata da tre varchi verso una zona sicura, il gap 1 ha larghezza effettiva d_{eff} di 90 cm, il gap 2 di 480 cm e il gap 3 di 360 cm.

Il fattore f_{rd} è il fattore di rallentamento nel deflusso e dipende dalle caratteristiche della tratta considerata, nel caso in esame i varchi hanno altezza

13.2. Analisi del sistema d'esodo

Tabella 13.2: Risultati del test della capacità di deflusso al varco critico.

Varco	Larghezza effettiva totale (m)	P_{TEST}
Gap 1	0.9	332
Gap 2	4.8	2084
Gap 3	3.6	1563

superiore ai 2 m e larghezza efficace maggiore tale da consentire il libero movimento delle persone, le porte sono apribili nel verso dell'esodo e i percorsi sono in piano ($f_{rd} = 1$). Il fattore di disturbo nel deflusso f_{dd} dipende dalla confluenza di flussi in corrispondenza del varco; è uguale a 1 per il gap 2 e 3 (fila singola o file multiple che confluiscono senza interazioni reciproche), mentre vale 0.85 per il gap 1 (confluenza e interazioni tra flussi primari, ossia flussi che provengono da percorsi d'esodo principali). Il livello di criticità caratteristico della temporary-cold zone è trascurabile, t_{rif} è uguale a 240 s e il fattore di criticità iniziale f_{ci} è uguale a 0.8. Il coefficiente CS è uguale a 1.5 (presenza di piano di evacuazione).

I risultati ottenuti per i singoli varchi o gap sono riportati in Tabella 13.2. Si può osservare che il test evidenzia una potenziale criticità con riferimento al gap 1 ($P_{TEST} = 332$), tuttavia risulta piuttosto improbabile che tutte le persone presenti in platea (massimo 400) defluiscano attraverso il gap 1.

Test della possibilità di ripiego lungo tratte d'esodo

Tutte le tratte d'esodo all'interno della temporary-cold zone sono tali per cui invertendo il senso di marcia lungo la tratta è in ogni caso possibile raggiungere una zona sicura senza dover attraversare la zona critica, rappresentata in questo dalla platea (hot zone). Il test è superato.

13.2.3 Analisi di terzo livello: la hot zone

Al terzo livello vengono eseguiti tre test per verificare se le persone possono abbandonare la hot zone e porre in evidenza eventuali criticità.

Test di raggiungibilità dei varchi della cella

Con questo test viene verificata la raggiungibilità dei varchi di uscita della cella entro il tempo di riferimento t_{rif} uguale a 60 s.

$$L \leq L_{TEST} = \frac{t_{rif} \cdot v_{rif} \cdot f_m}{f_{ci} \cdot CS}$$

Il più lungo percorso all'interno della platea L misura 31 m. Il fattore di mobilità f_m dipende dalla familiarità che le persone coinvolte hanno con i luoghi, dalla presenza di sistemi di facilitazione e dal grado di mobilità, dalla densità di affollamento lungo i percorsi e dalla presenza di ostacoli. Nel caso specifico è uguale a 1.19. Il fattore di criticità iniziale f_{ci} in relazione alle caratteristiche di pericolosità della cella è uguale a 1.0. La velocità di riferimento è convenzionalmente assunta pari a 0.7 m/s. Il coefficiente di sicurezza CS è

13. Applicazione dei test di vulnerabilità a un caso studio

uguale a 1.4 (Percorsi multipli bilanciati e presenza di varchi che immettono direttamente verso una zona sicura).

Si ottiene quindi $31 \leq 35$ m e il test è superato.

Test della capacità di deflusso dalla cella

Il test verifica la capacità di sfollamento dei varchi della cella che immettono su un percorso d'esodo o direttamente in una zona sicura.

$$P \leq P_{TEST} = \frac{\sum_{k=1}^{n.varchi} (\phi \cdot n_{file} \cdot f_{rd})_k \cdot t_{rif}}{f_{ci} \cdot CS}$$

La platea è caratterizzata da 5 varchi: il varco o gap A immette direttamente verso l'esterno, mentre i varchi B, C, D, E immettono su un percorso d'esodo. I varchi A, B, D, E hanno larghezza nominale 1.2 m (larghezza effettiva 0.9 m) mentre il varco C ha larghezza nominale 1.8 m (larghezza effettiva 1.5 m). Assumendo come larghezza di ingombro delle persone 0.55 m si ottiene che il numero di file $n_{file} = \text{int}(L_{nominale}/L_{ingombro})$ che possono attraversare i varchi è uguale a 1 per i varchi A, B, D, E e 2 per il varco C. ϕ rappresenta il flusso di persone di riferimento in grado di defluire attraverso il varco considerato è assunto pari a 1.4 persone/s. Il fattore di rallentamento nel deflusso f_{rd} è legato alle interazioni tra le file in corrispondenza del varco e alle caratteristiche del varco stesso. Per i varchi A, B, D, E f_{rd} è uguale a 0.5 e 0.67 per il varco C. Il fattore di criticità iniziale f_{ci} in relazione alle caratteristiche di pericolosità della cella è uguale a 1.0. Il coefficiente di sicurezza CS è uguale a 1.6 (Percorsi multipli bilanciati e presenza di varchi che immettono direttamente verso una zona sicura).

Il tempo di riferimento t_{rif} è pari a 60 s.

Il test fornisce $400 > 262$, quindi sono presenti potenziali criticità per quanto riguarda il deflusso attraverso i varchi della hot zone.

Verifica della presenza di percorsi alternativi per l'esodo da singole celle

Il test vuole valutare la presenza di una via d'esodo alternativa e praticabile nel caso in cui un focolaio si sviluppi in prossimità di un varco. In base alle caratteristiche di pericolosità specifiche della hot zone (platea) si assume un'area di interdizione con raggio pari a 5 m centrata di volta in volta su un varco, la configurazione delle vie d'esodo all'interno della platea consente sempre di raggiungere un varco alternativo. Il test è quindi superato.

I test di vulnerabilità applicati al sistema d'esodo del complesso platea-foyer del Teatro Verdi di Pordenone hanno fatto emergere due criticità potenziali. Queste sono relative rispettivamente al deflusso attraverso i varchi che consentono l'uscita dalla platea e al varco identificato come gap 1 che consente il deflusso dal foyer verso l'esterno. Tuttavia, come osservato, l'ipotesi che tutte le 400 persone che possono occupare la platea escano attraverso il gap 1 è piuttosto remota.

I risultati dell'analisi effettuata sono stati confrontati con i dati ottenuti da una prova di evacuazione che ha interessato il Teatro Verdi.

Pagina intenzionalmente vuota.

Capitolo 14

La prova di evacuazione

In questo capitolo verranno presentati i risultati di una prova di evacuazione non preannunciata, organizzata in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, tenutasi il 10 febbraio 2015 presso il Teatro Verdi di Pordenone che ha coinvolto oltre 300 persone. Durante la prova infatti, erano presenti in totale 329 persone: 304 bambini di età compresa tra gli 8 e gli 11 anni e 25 adulti (insegnanti).

La scelta di eseguire una prova di evacuazione non preannunciata ha il pregio di fornire indicazioni riguardanti i comportamenti e i tempi di reazione e di movimento degli occupanti in presenza di un'evacuazione teoricamente di emergenza. Queste informazioni possono essere ritenute rappresentative di una reale situazione di emergenza poiché le persone coinvolte non sono state preventivamente messe a conoscenza della prova.

14.1 Obiettivi dello studio

Gli obiettivi della prova di evacuazione hanno interessato due diversi aspetti che influenzano il processo dell'evacuazione, da un lato lo studio dello *human behaviour* durante l'esodo e dall'altro lo studio delle dinamiche di movimento.

Con riferimento al particolare contesto nel quale si è svolta la prova (presenza di scolaresche) gli elementi di analisi relativi allo human behaviour sono stati i seguenti:

- Verificare l'influenza delle figure di riferimento sulle dinamiche di evacuazione. *I bambini si rivolgono alle maestre? Come incide la presenza del personale di sala? Come incidono questi aspetti sui tempi di pre-movimento?*
- Verificare la presenza di effetti legati all'appartenenza a un gruppo.
- Verificare la scelta dei percorsi d'esodo. *Vengono privilegiati i percorsi fatti per entrare in platea o vengono scelte le vie di fuga più vicine?*

Per quanto riguarda le dinamiche di movimento gli elementi considerati per l'analisi sono stati i seguenti:

- Verificare se il movimento avviene per file. *Si formano confluenze tra flussi in corrispondenza dei varchi? che tipo di interazioni si osservano?*

14.2. Metodologia di rilievo

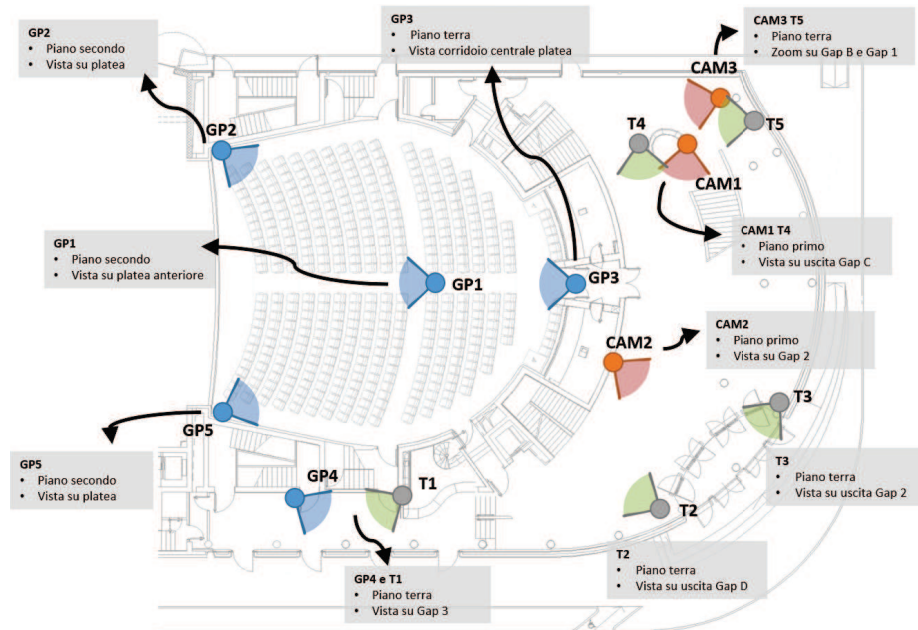


Figura 14.1: Posizione dei punti di osservazione e delle videocamere all'interno del teatro.

- Misurare il tempo di uscita dalla cella e del tempo di percorrenza delle tratte. Durata complessiva dell'evacuazione.
- Misurare i flussi ai varchi. Verificare la presenza di effetti di rallentamento dovuti a diverse tipologie di varchi.

L'analisi dei dati di movimento ha anche l'obiettivo di fornire un confronto per le stime ottenute attraverso l'applicazione dei test di vulnerabilità e quindi di validarli con dati misurati su esperienze reali.

14.2 Metodologia di rilievo

Per conseguire gli obiettivi è stato necessario elaborare una metodologia di rilievo dei dati di interesse. Sono stati individuati 10 punti di osservazione in posizioni strategiche: 4 all'interno della platea e 6 all'interno del foyer. Complessivamente, in corrispondenza dei punti di osservazione definiti sono state posizionate 13 videocamere che hanno consentito di acquisire i dati (Figura 14.1).

L'inizio della prova è stato dato attivando il sistema di allarme antincendio prima dell'inizio dello spettacolo, in condizioni di completa oscurità della platea. Le condizioni simulate sono quelle di un incendio all'interno del teatro e le procedure seguite dagli operatori di sala e dal personale del teatro sono state quelle previste dal piano di emergenza del Teatro Verdi, in modo da simulare quanto più fedelmente possibile le condizioni che possono caratterizzare una reale emergenza.

Il segnale di allarme prevede un segnale acustico e un messaggio vocale registrato, quest'ultimo si ripete alternativamente in italiano ed inglese che

segnala la presenza di un incendio e invita ad uscire dal teatro. Contestualmente all'attivazione dell'allarme si è attivato il sistema di illuminazione della platea ed il personale di sala, posizionato in corrispondenza di ciascuna uscita di emergenza ha provveduto a mantenere aperte le porte durante il deflusso delle persone. Dopo aver verificato che non fossero più presenti persone all'interno, il personale di sala ha abbandonato la platea.

Infine, conclusa la prova le persone sono state fatte rientrare in sala e prima dell'inizio dello spettacolo il Comandante del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Porenone ha spiegato la finalità della prova appena eseguita.

Le registrazioni effettuate attraverso le videocamere sono quindi state analizzate a posteriori ed hanno fornito numerosi elementi in relazione agli obiettivi dello studio.

14.3 Risultati della prova di evacuazione

L'analisi delle registrazioni della prova ha portato a ottenere informazioni di tipo qualitativo sui comportamenti tenuti dalle persone coinvolte nella prova e informazioni di tipo quantitativo per quanto riguarda il loro movimento. Le osservazioni principali sono riassunte di seguito.

14.3.1 Figure di riferimento e tempo di pre-movimento

SFPE (2003) evidenzia come il processo decisionale che porta alla decisione di evacuare sia molto complesso, tuttavia questo può essere schematizzato in tre fasi principali: ricezione dei segnali (siano essi segnali di allarme o indizi della presenza di un incendio come la presenza di fumo) - riconoscimento - interpretazione. Solo a questo punto viene presa la decisione sulle azioni da intraprendere.

Le registrazioni mostrano come quando l'allarme inizia a suonare i soggetti coinvolti nella prova cerchino conferma all'informazione fornita dal segnale di allarme.

In particolare si osserva come tutti i soggetti coinvolti tendono a guardarsi intorno, nel dettaglio si è notato come i docenti presenti rivolgano innanzitutto lo sguardo al personale di sala.

Il piano di emergenza del Teatro Verdi prevede che in questi casi il personale di sala apra immediatamente le porte di emergenza e si posizioni in modo da mantenerle aperte consentendo il deflusso delle persone. Questo allo scopo di rafforzare il messaggio trasmesso dal segnale di allarme e consentire di ridurre i tempi necessari per l'interpretazione e quindi per prendere la decisione di evacuare.

Va segnalato che nella prova eseguita il personale di sala ha tenuto un comportamento diverso rispetto a quanto appena descritto, infatti al suono dell'allarme il personale di sala non ha dato feedback adottando le azioni rafforzative del segnale sopra descritte, ma è rimasto in corrispondenza delle uscite senza aprire le porte attendendo la reazione delle persone.

Questo mancato feedback ha probabilmente dilatato i tempi necessari per l'interpretazione del segnale di allarme. Le registrazioni mostrano come dall'inizio del segnale di allarme al momento in cui la prima persona (una insegnante) ha manifestato la decisione di evacuare passi un intervallo di tempo pari a 22 s.

14.3. Risultati della prova di evacuazione

Questo rappresenta il tempo di pre-movimento. Proulx (2002), sottolineando che è estremamente difficile fornire indicazioni generali sui tempi di pre-movimento, riporta che nel caso di edifici in cui gli occupanti non sono familiari con i luoghi né con le procedure di evacuazione e il segnale di allarme è di tipo pre-registrato, i tempi di pre-movimento possono essere nell'ordine dei 3 minuti.

Le registrazioni mostrano come quando la prima persona si alza e inizia a muoversi in pochi secondi tutte le altre persone, siano esse adulti o bambini, intraprendono lo stesso comportamento.

A questo punto il personale di sala ha provveduto ad aprire le porte e mantenerle aperte per tutta la durata dell'esodo dalla sala.

Si è infine osservato che, una volta iniziato il processo di movimento, l'insegnante o le insegnati diventano figure di riferimento per le rispettive classi, radunando i bambini e dando indicazioni sul percorso da seguire prima di iniziare il movimento verso le uscite di emergenza e mantenendo il controllo durante il movimento lungo le tratte d'esodo fino al raggiungimento di una zona sicura.

14.3.2 Effetti dell'appartenenza a un gruppo sulla scelta dei percorsi d'esodo

il coinvolgimento di scolaresche nella prova di evacuazione ha reso particolarmente evidente l'effetto dei gruppi. L'effetto dell'appartenenza a si osserva a due livelli:

- a un primo livello, definito con il termine di *gruppo-classe*, l'insieme degli studenti e degli insegnanti appartenenti a una stessa classe si è comportato come un gruppo. Questo comportamento noto in letteratura come *social affiliation* (si veda ad esempio SFPE (2003)) è determinato dalla natura dei rapporti di tipo affettivo o di responsabilità di un soggetto verso altri soggetti. Le registrazioni hanno evidenziato solo un caso in cui tre studenti si sono mossi autonomamente, in modo indipendente dalla classe di appartenenza: nello specifico si è osservato come i tre soggetti sono usciti dalla platea, raggiunto il foyer hanno poi deciso di rientrare per riaggregarsi al gruppo di appartenenza, comportamento noto in letteratura come *reentry behaviour* (Bryan 2002);
- a un secondo livello, definito con il termine *gruppo-scuola*), le classi appartenenti a uno stesso istituto scolastico, probabilmente per lo stesso tipo di comportamento (*social affiliation*), hanno scelto di prendere la stessa uscita di emergenza e seguire quindi lo stesso percorso per raggiungere una zona sicura. Questo ha determinato un allungamento dei tempi necessari per abbandonare la platea in quanto ha direzionato i flussi di questi gruppi di classi verso un numero limitato di uscite, sovraccaricandole. Altre uscite e percorsi, in alcuni casi più prossimi o più facilmente raggiungibili dalla posizione da cui il singolo gruppo-classe ha iniziato a muoversi, non sono state considerate. Nel caso specifico sono state privilegiate le uscite laterali identificate come gap A, D, E in Figura 13.2, mentre le uscite identificate con gap B e gap C sono state utilizzate solo da un numero limitato di gruppi. Di particolare rilievo è il fatto che il varco identificato come gap C, utilizzato per l'accesso in sala da tutte le persone, sia stata poco utilizzato per l'uscita. Infatti, un comportamento spesso osservato nel caso di evacuazioni da edifici pubblici (si veda ad esempio SFPE (2003)), nei quali gli

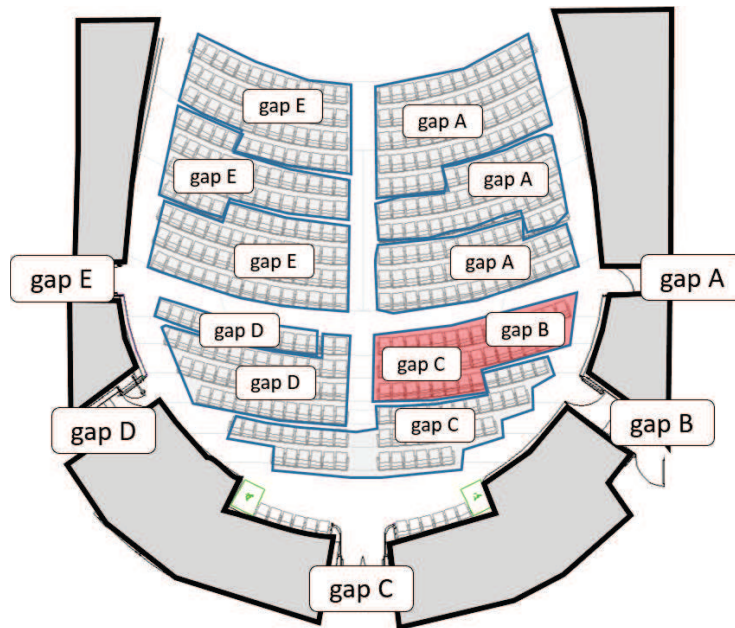


Figura 14.2: Gruppi di classi appartenenti alle stesse scuole e scelta delle uscite. l'area evidenziata in rosso indica l'unico caso in cui gruppi-classe appartenenti alla stessa scuola hanno scelt percorsi di uscita diversi.

Tabella 14.1: Persone defluite attraverso i varchi.

Varco	Numero di persone
A	110
B	15
C	28
D	63
E	123

occupanti non hanno familiarità dei luoghi, è la tendenza ad utilizzare i percorsi noti, in particolare quello utilizzato per accedere nell'edificio.

In Tabella 14.1 e Figura 14.2 sono riassunti i dati relativi alla scelta dei percorsi effettuati dai gruppi di classi.

14.3.3 Dinamiche di movimento

Nel paragrafo 14.3.2 si è evidenziato come il movimento delle persone durante l'evacuazione sia avvenuto per gruppi, dove ogni gruppo è composto da persone (studenti e insegnanti) appartenenti alla stessa classe.

Le osservazioni hanno mostrato come il movimento delle persone appartenenti a uno stesso gruppo-classe sia avvenuto in genere in fila per due e in alcuni casi in fila indiana. Questo ha consentito un deflusso ordinato e con interazioni limitate tra gruppi-classe diversi durante il movimento lungo le tratte d'esodo.

14.3. Risultati della prova di evacuazione



Figura 14.3: Ingresso principale del teatro (gap 2). Il gruppo di 63 persone uscito dalla platea attraverso il gap D per raggiungere l'esterno ha utilizzato solo l'uscita posta a destra.

In corrispondenza delle uscite indicate con gap A e gap E, dove si è concentrato il deflusso delle persone, non si è formato un cosiddetto meccanismo ad arco, in cui vi è una interazione disordinata tra le persone che tende a strozzare ed ostacolare il passaggio attraverso il varco stesso, piuttosto si sono osservati i seguenti due meccanismi:

- Nel caso in cui più gruppi-classe raggiungono il varco dallo stesso percorso, si è osservato un meccanismo di *arresto e accumulo* nel quale ogni gruppo-classe si accoda ad altri gruppi-classe già in attesa di attraversare il varco.
- Nel caso in cui più gruppi-classe giungono al varco da percorsi opposti o perpendicolari, non si è riscontrato mescolamento tra i gruppi, ma piuttosto un meccanismo di *arresto - dare precedenza* in cui ogni gruppo-classe attende che il gruppo-classe che sta attraversando il varco termini l'attraversamento, quindi si mette in movimento ed attraversa il varco a sua volta. Apparentemente l'ordine con cui i diversi gruppi-classe si fermano e lasciano passare gli altri gruppi è casuale e non direttamente legato all'appartenenza allo stesso gruppo-scuola.

La tendenza a muoversi in gruppo si è osservata anche durante il deflusso attraverso il foyer (la temporary-cold zone secondo il modello concettuale delle frontiere d'esodo), qui infatti i gruppi-classe usciti dalla platea attraverso lo stesso varco hanno continuato a muoversi in gruppo, un gruppo-classe dopo l'altro ed hanno raggiunto la zona sicura all'esterno del teatro attraversando la stessa uscita.

Di particolare interesse risulta il comportamento tenuto dal gruppo di classi (in totale 63 persone) che ha abbandonato la platea attraverso il varco identificato con gap D. Una volta raggiunto il foyer, infatti, questo gruppo ha continuato a muoversi un gruppo-classe dietro all'altro ed ha raggiunto la zona sicura all'esterno del teatro utilizzando una sola delle quattro uscite di emergenza che caratterizzano il varco indicato come gap 2 e lasciando le altre inutilizzate, pur essendo le uscite adiacenti l'una all'altra e tutte mantenute con le porte aperte (Figura 14.3).

Queste dinamiche di movimento hanno influenzato il tempo complessivo necessario per abbandonare la platea che è stato di 122 s (di cui 22 s sono il tempo di pre-movimento), ottenuto come differenza tra l'istante in cui l'ultima persona abbandona la platea e l'istante in cui l'allarme inizia a suonare. Il tempo

di evacuazione, ossia il tempo necessario per il completo abbandono dell'edificio è stato di 140 s, ottenuto come differenza tra l'istante in cui l'ultima persona esce dall'edificio e l'istante in cui è stato dato l'allarme.

Ulteriori osservazioni ottenute dall'analisi dell'evacuazione sono riportate nel prossimo paragrafo.

14.4 Confronto con i risultati dei test di vulnerabilità

I risultati dell'analisi effettuata applicando i test di vulnerabilità presentati nel Capitolo 13, sono stati confrontati con i dati ottenuti dalla prova di evacuazione che ha interessato il Teatro Verdi. Di seguito vengono presentati i risultati del confronto che ha avuto per oggetto i deflussi attraverso i varchi.

14.4.1 Flusso attraverso i varchi

In SFPE (2003) il flusso di persone che attraversa un varco o una generica tratta d'esodo rappresenta il numero di persone che lo superano nell'unità di tempo. Può essere espresso in termini di flusso specifico F_s , definito dal prodotto tra la densità di persone D e la velocità di movimento S che può essere stimata con l'equazione 12.1:

$$F_s = S \cdot D \quad (14.1)$$

F_s in pratica rappresenta il numero di persone che attraversa il punto del percorso d'esodo considerato per unità di tempo e per unità di larghezza efficace (si misura in *persone/s/m di larghezza efficace*). Il flusso di persone F_s che attraversano un determinato punto del sistema d'esodo caratterizzato da una larghezza efficace W_e si ottiene con l'equazione (in *persone/s*):

$$F_c = F_s \cdot W_e \quad (14.2)$$

Con riferimento al superamento di una generica porta SFPE (2003), sulla base di prove sperimentali prevede che il flusso specifico massimo sia pari a 1.3 persone/s/m di larghezza efficace. Similmente, in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) e di conseguenza nei test di vulnerabilità per la verifica dell'obiettivo di sicurezza numero 4, viene assunto un flusso convenzionale massimo pari a 1.4 persone/s da moltiplicare per il numero di file di persone che possono attraversare il varco.

In Tabella 14.2 sono riportati i flussi di calcolo relativi ai varchi che consentono il deflusso dalla platea e i corrispondenti flussi misurati.

A margine dei dati riportati in Tabella 14.2, devono essere fatte alcune considerazioni. In generale si nota come il test di vulnerabilità proposto in PASS fornisca stime dei flussi attraverso i varchi molto cautelative, questo in parte è dovuto al fatto che i dati da cui sono stati derivati i valori del flusso specifico massimo sia in SFPE (2003) sia in S. Grimaz e Tosolini (2013), fanno riferimento a una popolazione adulta coinvolta in prove di evacuazione e altre situazioni di non emergenza.

Nella prova di evacuazione studiata, la popolazione coinvolta era essenzialmente costituita da bambini di età compresa tra gli 8 e gli 11 anni, di conseguenza

14.4. Confronto con i risultati dei test di vulnerabilità

Tabella 14.2: Confronto tra i flussi ai varchi (in *persone/s*) stimati con l'approccio proposto in SFPE (2003) e in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) e misurati durante la prova di evacuazione.

Varco	Larghezza nominale (m)	Larghezza effettiva (m)	SFPE (2003)	PASS	Flusso misurato
A	1.2	0.9	1.2	0.7	1.3
B	1.2	0.9	1.2	0.7	0.8
C	1.8	1.5	2.0	1.4	2.1
D	1.2	0.9	1.2	0.7	1.1
E	1.2	0.9	1.2	0.7	1.4

Tabella 14.3: Flussi ai varchi (in *persone/s*) stimati con l'approccio proposto in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) introducendo la larghezza di ingombro propria dei bambini e flussi misurati durante la prova di evacuazione.

Varco	Larghezza nominale (m)	Larghezza effettiva (m)	PASS	Flusso misurato
A	1.2	0.9	1.4	1.3
B	1.2	0.9	1.4	0.8
C	1.8	1.5	2.8	2.1
D	1.2	0.9	1.4	1.1
E	1.2	0.9	1.4	1.4

sono diverse le caratteristiche di ingombro dei singoli soggetti, così come le caratteristiche del movimento in termini di velocità, lunghezza del passo ed entità delle oscillazioni laterali. Ripetendo il test di vulnerabilità assumendo come larghezza di ingombro delle persone quella propria dei bambini, pari a 0.4 m come proposto da Korhonen e Hostikka (2010), si ottengono i risultati sintetizzati in Tabella 14.3. Si osserva che in questo modo il test fornisce risultati più prossimi a quelli ottenuti durante la prova.

Un ulteriore elemento osservato è il fatto che la presenza del meccanismo di auto-chiusura delle uscite di emergenza durante il deflusso delle persone costituisca un elemento di disturbo: infatti, il fatto di dover mantenere aperta la porta causa un rallentamento nel movimento, determinando quindi una riduzione del flusso attraverso di essa.

Un secondo aspetto osservato, anch'esso legato alla presenza del meccanismo di auto-chiusura che tende a chiudere le porte, è che la larghezza del varco varia in modo dinamico deviando il flusso delle persone e riducendo il numero di file che lo possono attraversare.

Si è inoltre osservato che nel caso di varco chiuso da una porta a due ante (gap D) che non sono mantenute entrambe aperte, le persone uscendo dalla platea non le hanno aperte entrambe, ma hanno aperto solo quella di destra (rispetto al verso dell'esodo), mentre l'altra è rimasta chiusa. Ciò ha causato una riduzione della larghezza efficace del varco consentendo il deflusso di una sola fila di persone, quindi riducendo il deflusso attraverso il varco. In Tabella 14.4 sono riportati i flussi stimati considerando la situazione appena descritta. Si osserva come introducendo in PASS le caratteristiche effettivamente riscontrate durante

14. La prova di evacuazione

Tabella 14.4: Confronto tra i flussi al varco D stimati con l'approccio proposto in SFPE (2003) e in PASS (S. Grimaz e Tosolini 2013) e misurati durante la prova di evacuazione per effetto dell'utilizzo di metà larghezza del varco.

Larghezza nominale (m)	1.2
Larghezza utilizzata (m)	0.6
Larghezza efficace (m)	0.3
Larghezza di ingombro (m)	0.4
SFPE (persone/s)	0.4
PASS (persone/s)	1.1
Flusso misurato (persone/s)	1.1

la prova sia possibile stimare correttamente il flusso di persone attraverso il varco, viceversa il metodo proposto in SFPE (2003), tende a fornire risultati eccessivamente cautelativi.

Considerazioni finali

La prova di evacuazione ha consentito di osservare i comportamenti e le dinamiche di movimento degli occupanti in una situazione teoricamente di emergenza. La prova oltre a costituire una esperienza formativa per le persone che in qualche modo la hanno subita, è stata di particolare interesse e significato anche per chi l'ha organizzata, consentendo di osservare in tempo reale l'evoluzione del processo di esodo e a posteriori, attraverso l'analisi delle registrazioni, di riconoscere diversi comportamenti descritti anche in altri studi in letteratura (ad esempio in Gwynne e Rosenbaum 2016).

I dati raccolti ed analizzati fino ad ora hanno infatti consentito di individuare sia alcuni elementi attinenti alla sfera dello *human behaviour* sia le interazioni tra il sistema d'esodo (qui inteso non solo come il sistema fisico di percorsi, ma anche come sistema gestionale) e gli occupanti che possono rallentare o disturbare il processo di evacuazione.

Queste informazioni da un lato consentono di ampliare il bagaglio di conoscenze sulle dinamiche d'esodo, dall'altro diventano uno strumento di particolare utilità pratica ai fini del miglioramento dei sistemi d'esodo.

Infine i dati raccolti hanno consentito di validare ulteriormente il metodo PASS. Questo ha dimostrato essere uno strumento valido per la rapida individuazione delle vulnerabilità dei sistemi d'esodo.

Pagina intenzionalmente vuota.

Conclusioni

Lo sviluppo di un incendio determina condizioni ambientali ostili e spesso incompatibili con la sopravvivenza delle persone, con la tutela di beni, il business-continuity e, più in generale, con la salvaguardia dei valori esposti. La prevenzione e la gestione delle emergenze in caso di incendio può tuttavia presentare difficoltà operative e organizzative soprattutto in mancanza di una preventiva conoscenza delle potenziali situazioni da affrontare.

L'attività di ricerca si è inserita nel quadro di INSPECT - Inspection and Study of Potential Emergency-scenarios for Countermeasure Tailoring (S. Grimaz, Dattilo e Maiolo 2014), una metodologia che, a partire da una ispezione dell'attività e il riconoscimento di alcuni elementi sostanziali che la caratterizzano, consente di identificare preventivamente la potenziale situazione emergenziale da affrontare.

L'aspetto peculiare della metodologia INSPECT è l'impiego dello strumento concettuale degli scenari emergenziali che consentono di descrivere in modo convenzionale e pre-codificato la situazione emergenziale. Lo scenario emergenziale prende in considerazione tre elementi: lo scenario incidentale associato all'interazione tra effetti avversi dell'incendio e i valori esposti, l'interdipendenza con il contesto esterno in cui l'attività è inserita e la vulnerabilità funzionale associata alle caratteristiche che possono favorire o ostacolare il supporto da parte di squadre di soccorso esterne.

Nel metodo INSPECT le situazioni avverse vengono descritte attraverso lo strumento degli scenari di avversità potenziale. In questo contesto l'attività di ricerca è stata finalizzata alla definizione degli scenari di avversità potenziale in caso di incendio o esplosione in ambienti confinati.

Gli scenari di avversità potenziale

La caratterizzazione delle avversità viene descritta attraverso due elementi: una descrizione qualitativa che consente di identificare gli scenari di incendio potenziale e una descrizione quantitativa che consente di stimare il livello di avversità indotto dall'incendio in termini di altezza e temperature dello strato di fumi caldi.

Il punto di partenza è l'ispezione dell'attività. L'unità di analisi per assunta per l'ispezione è la cella, che concettualmente rappresenta un ambiente delimitato da barriere fisiche più o meno permeabili agli effetti dell'evento e dotato di uno o più varchi, con l'obiettivo di identificare i fuel packages. Il concetto di fuel package è stato adottato in quanto consente di prescindere dal considerare separatamente ogni singolo oggetto presente all'interno della cella esaminata e

14.4. Confronto con i risultati dei test di vulnerabilità

di concentrarsi piuttosto sulle relazioni reciproche tra oggetti, consentendo di ottenere una visione generale del possibile comportamento dell'incendio.

L'identificazione dei fuel package consente di identificare gli schemi di propagazione del fuoco i quali vengono descritti attraverso gli scenari di incendio potenziale. Si è optato per associare a una descrizione qualitativa dello scenario, un pittogramma che lo descrive. Questo strumento può essere utilmente applicato per la realizzazione di mappe di pericolosità che coprono l'intera attività e che possono essere particolarmente utili ai fini della comunicazione delle criticità riscontrate nell'attività esaminata.

Al fine di affiancare alla descrizione qualitativa dello scenario di incendio potenziale una descrizione quantitativa del livello di avversità, non è possibile prescindere dalla valutazione dell'HRR (Heat Release Rate) caratteristico dei fuel packages presenti all'interno della cella esaminata. L'HRR è infatti il parametro principale per definire il livello di pericolosità di un incendio, infatti ad esso sono legate l'evoluzione dell'altezza e delle temperature dello strato di fumi caldi. All'HRR di un fuel package o di un oggetto è legato anche il potenziale coinvolgimento di altri oggetti o fuel packages presenti all'interno della cella esaminata per effetto dell'irraggiamento emesso dalle fiamme.

Nel presente lavoro sono state proposte semplici metodologie per stimare la curva HRR di un fuel package, le temperature dell'hot gas layer ed il flusso termico radiativo in corrispondenza di un target. Nel caso della stima dell'HRR i risultati ottenuti sono stati confrontati con dati in letteratura, mentre le previsioni inerenti la temperatura dell'hot gas layer e dei flussi termici radiativi sono stati confrontati con le previsioni ottenute dall'applicazione del modello fluidodinamico FDS.

Nel caso delle esplosioni, seguendo lo stesso framework logico sono stati definiti gli scenari di esplosione potenziale associati a valori di sovrappressione massima correlati con specifici livelli di danno sui bersagli esposti. La valutazione delle sovrappressioni avviene attraverso un semplice modello termodinamico che consente di stimare la pressione massima di esplosione a partire dalle caratteristiche e dalla quantità delle sostanze infiammabili individuate attraverso l'ispezione della cella. È stato inoltre introdotto nel modello un coefficiente di dispersione che tiene conto della qualità della gestione delle sostanze pericolose.

Gli strumenti così definiti possono essere particolarmente utili per la rapida valutazione delle avversità in caso di incendio o esplosione in attività esistenti, consentendone un rapido screening. L'introduzione di pittogrammi per rappresentare gli scenari di incendio e di esplosione potenziale consente di realizzare mappe di pericolosità che coprono l'intera attività. L'integrazione tra la descrizione qualitativa e quantitativa delle avversità permette di mettere in luce la presenza di condizioni critiche e quindi indirizzare eventuali analisi di dettaglio che richiedono l'impiego di metodi più avanzati ma anche più onerosi dal punto di vista dei tempi richiesti, consentendo così di ottimizzare le risorse disponibili.

Evacuazione e human behaviour

Nel metodo INSPECT vengono valutate le vulnerabilità dell'attività al fine di definirne la prestazione o performance rispetto ai cinque obiettivi di sicurezza introdotti dalla Direttiva 89/106/EEC (1989). Nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata sull'obiettivo 4 - "gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti". In questo contesto si è adottato come riferimento

per l'analisi della vulnerabilità del sistema d'esodo il metodo PASS (Preliminary Assessment of the egress-System Safety (S. Grimaz e Tosolini 2013; S. Grimaz, Tosolini e Dolcetti 2010; Tosolini 2013)). L'analisi del sistema d'esodo avviene attraverso sette test che sono stati sviluppati empiricamente riferendosi al modello concettuale delle frontiere d'esodo che concettualizza l'evacuazione come il movimento delle persone da una zona ad elevate pericolosità a una zona sicura e che permettono di valutazione le capacità di risposta del sistema d'evacuazione considerando gli aspetti più importanti dell'esodo: caratteristiche delle persone, dell'edificio e criticità presenti.

Nel presente studio sono stati presentati nuovi risultati ottenuti dall'analisi delle sperimentazioni condotte nel laboratorio sperimentale LabCUBE_{egress} relativi al movimento delle persone lungo percorsi che consentono il movimento in fila indiana. Questi percorsi possono essere caratteristici sia di ambienti industriali sia di edifici storici. L'analisi dei dati ed il confronto con riferimenti in letteratura ha evidenziato come questo tipo di percorsi determini un rallentamento delle velocità di deflusso rispetto a quelle osservate in corridoi o passaggi dove il movimento è libero. Questi risultati oltre che fornire una utile informazione ai fini della progettazione o valutazione dei sistemi d'esodo, ha consentito di verificare la corretta previsione del rallentamento, attraverso uno specifico fattore fornito da PASS in questo tipo di percorsi.

L'organizzazione in collaborazione con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Pordenone, di una prova di evacuazione non preannunciata tenutasi il 10 febbraio 2015 presso del Teatro Verdi di Pordenone ha consentito di raccogliere informazioni riguardanti i comportamenti e i tempi di reazione e le dinamiche di movimento degli occupanti in presenza di un'evacuazione teoricamente di emergenza.

Infine i test di vulnerabilità contenuti in PASS sono stati applicati alla parte del sistema d'esodo del Teatro Verdi di Pordenone interessata dalla prova di evacuazione. I risultati ottenuti sono stati confrontati con le osservazioni relative alla prova di evacuazione che ha confermato le capacità e l'utilità del metodo PASS come strumento che consente di mettere in luce le principali criticità connesse a un sistema d'esodo.

Pagina intenzionalmente vuota.

Bibliografia

- 1994/9/EC. *Directive 94/9/EC of the European Parliament and the Council of 23 March 1994 on the approximation of the laws of the Member States concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres*. The Council of The European Communities, 1994.
- 1999/92/EC. *Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres*. The Council of The European Communities, 1999.
- 89/106/EEC. *89/106/EEC Council Directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products*. The Council of The European Communities, 1989.
- 89/391/EEC. *89/391/EEC Council Directive of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work. Council Directive of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work*. The Council of The European Communities, 1989.
- Ahonen, A., M. Kokkala e H. Weckman. *Burning characteristics of potential ignition sources of room fires*. Rapp. tecn. 285. VTT, 1984.
- AICHe. *Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide*. American Institute of Chemical Engineers, 1994.
- Anderson, A. e O.A. Ezekoye. *Property Risk Optimization by Predictive Hazard Evaluation Tool (PROPHET). Final Report*. Rapp. tecn. SFPE Educational & Scientific Foundation, 2014.
- Babrauskas, V. «Heat Release Rates». In: a cura di M.J. Hurley. 5th. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Cap. 26, pp. 818–923.
- «The Cone Calorimeter». In: a cura di M.J. Hurley. 5th. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Cap. 28, pp. 952–980.
- «Will the Second Item Ignite?» In: *Fire Safety Journal* 4 (1982), pp. 281–292.
- Babrauskas, V., D. Baroudi et al. «The Cone Calorimeter Used for Predictions of the Full-scale Burning Behaviour of Upholstered Furniture». In: *Fire and Materials* 21 (1997), pp. 95–105.
- Babrauskas, V. e J.F. Krasny. *Prediction of Upholstered Chair Heat Release Rates From Bench-Scale Measurements*. ASTM Special Technical Publication. ASTM, 1985.
- Babrauskas, V. e R.D. Peacock. «Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard». In: *Fire Safety Journal* 18 (1992), pp. 255–272.

BIBLIOGRAFIA

- Babrauskas, V. e W.D. Walton. «A Simplified Characterization of Upholstered Furniture Heat Release Rates». In: *Fire Safety Journal* 11 (1986), pp. 181–192.
- Baker, W.E. et al. *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier Scientific Publishing Co., 1983.
- Barry, T. «Quantitative risk assessment in chemical process industries». In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. A cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 13 (Sez. 5), pp. 176–213.
- Beyler, C.L. «Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 11 (sez. 3), pp. 802–848.
- Bryan, J. «Behavioral Response to Fire and Smoke». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 12 (Sez. 3), pp. 315–341.
- Bukowski, R.W. «Fire as a Building Design Load». In: *Proc. InterFlam 2001*. London: Interscience Communications, 2001, pp. 341–350.
- Bundy, M. e T. Ohlemiller. *Bench-Scale Flammability Measures for Electronic Equipment*. Rapp. tecn. NIST, 2003.
- *Fire performance of flame retarded polymers used in consumer electronics*. Rapp. tecn. NIST, 2005.
- *Full-Scale Flammability Measures for Electronic Equipment*. Rapp. tecn. NIST, 2004.
- Butler, K.M. e G.W. Mulholland. «Generation and Transport of Smoke Components». In: *Fire Technology* (2004).
- Bwalya, A.C. «An Overview of Design Fires for Building Compartments». In: *Fire Technology* 44 (2008), pp. 167–184.
- *Design Fires for Commercial Premises - Results of Phase I*. Internal Report 868. NRC-CNRC, 2005.
- Bwalya, A.C., N. Biľjnichou e M.A. Sultan. *Literature Review on Design Fires*. Rapp. tecn. NRC-CNRC, 2003.
- Bwalya, A.C., M.A. Sultan e N. Biľjnichou. *A Pilot Survey of Fire Loads in Canadian Homes*. Research Report 159. NRC-CNRC, 2004.
- *Towards the development of design fires for residential buildings: literature review and survey results of fire loads in Canadian homes*. Rapp. tecn. NRCC-46766. NRC-CNRC, 2004.
- Bwalya, A.C., E. Zalok e G. Hadjisophocleous. *Design Fires for Commercial Premises - Results of Phase 2*. Research Report 236. NRC-CNRC, 2007.
- Clarke, F.B. et al. *National fire Risk Assessment Research Project Final Report*. Rapp. tecn. Fire Protection Research Foundation, 1990.
- CNVVF. *Annuario Statistico del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco*. Rapp. tecn. Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile - Direzione Centrale per le Risorse Logistiche e Strumentali. Area IX - Telecomunicazioni e Statistica, 2014.
- Cooper, L.Y. «A Concept for Estimating Available Safe Egress Time in Fires». In: *Fire Safety Journal* 5 (1983), pp. 135–144.
- «Compartment Fire-Generated Environment and Smoke Filling». In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. A cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 10 (Sez. 3), pp. 243–267.
- Cozzani, V., G. Gubinelli e E. Salzano. «Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events». In: *Journal of Hazardous Materials* 129 (2006), pp. 1–21.

- Cozzani, V., A. Tugnoli e E. Salzano. «Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design». In: *Journal of Hazardous Materials* 139.2 (2007), pp. 209–219.
- Crichton, D. «The Risk Triangle». In: *Natural Disaster Management*. A cura di J. Ingleton. Tudor Rose, 1999.
- Daamen, W. e S.P. Hoogendoorn. «Free speed distributions - Based on empirical data in different traffic conditions». In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. A cura di N. Waldau et al. Berlin, Germany: Springer, 2005, pp. 13–25.
- Dayan, A. e C.L. Tien. «Radiant Heating from a Cylindrical Fire Column». In: *Combustion Science and Technology* 9 (1974), pp. 41–47.
- Delichatsios, M. «Fire Growth Rates in Wood Crib». In: *Combustion and Flame* 27 (1976), pp. 267–278.
- «Tenability conditions and filling times for fires in large spaces». In: *Fire Safety Journal* 39 (2004), pp. 643–662.
- DM 1 luglio 2014. *DECRETO 1 luglio 2014. Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle attività di demolizioni di veicoli e simili, con relativi depositi, di superficie superiore a 3000 m²*. Ministero dell'Interno, 2014.
- DM 28 febbraio 2014. *DECRETO 28 febbraio 2014. Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio delle strutture turistico - ricettive in aria aperta (campeggi, villaggi turistici, ecc.) con capacità ricettiva superiore a 400 persone*. Ministero dell'Interno, 2014.
- DM 9 maggio 2007. *DECRETO 9 maggio 2007. Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*. Ministero dell'Interno, 2007.
- Drysdale, D. *An introduction to fire dynamics*. Third Edition. Wiley, 2011.
- Fleury, R. «Evaluation of Thermal Radiation Models for Fire Spread Between Objects». Tesi di laurea mag. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 2010.
- Fournier d'Albe, E. «An approach to earthquake riskmanagement». In: *Eng. Struct.* (1982).
- Fowkes, N.D. *A Study of Room Fire Development: The Second Full-Scale Bedroom Fire Test of the Home Fire Project (Croce P.A. ed.)* Rapp. tecn. FMRC Technical Report, 1974.
- Frantzich, H. «Risk analysis and fire safety engineering». In: *Fire Safety Journal* 31.4 (1998), pp. 313–330.
- Fridolf, K. et al. «Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels». In: *Fire Safety Journal* (2013).
- Fruin, J.J. *Pedestrian planning and design*. A cura di G. Strakosch. Elevator World, 1987.
- Gann, R. «Estimating data for incapacitation of people by fire smoke». In: *Fire Technology* 40 (2004), pp. 201–207.
- Gann, R. e N. Bryner. «Combustion products and their effects on life safety». In: *NFPA Fire Protection Handbook*. A cura di A.E. Cote. NFPA, 2008. Cap. 2 (Sez. 6), pp. 11–33.
- Gann, R.G. et al. *International study of the sublethal effects of fire smoke on survivability and health (SEFS): Phase I Final Report*. Rapp. tecn. 1439. NIST, 2001.
- Grimaz, L. «Sostanze pericolose e gestione delle emergenze: il metodo P.Ra.G.Em». Tesi di laurea in Ingegneria Gestionale. Università degli Studi di Udine, 1997.

BIBLIOGRAFIA

- Grimaz, S. *Progettazione ergonomica e sistemi di sicurezza e di gestione delle emergenze*. Università degli Studi di Udine. 2000.
- Grimaz, S., F. Dattilo e A. Maiolo. «Inspect: a new method for fire safety in existing premises». In: *Chemical Engineering Transactions* (2014).
- Grimaz, S., A. Dusso et al. «People's movement in narrow paths with different width». In: *Chemical Engineering Transactions* 36 (2014), pp. 79–84.
- Grimaz, S. e A. Pini. *Valutazione del rischio incendio e della sicurezza equivalente*. EPC Libri, 1999.
- Grimaz, S. e E. Tosolini. «Application of rapid method for checking egress system vulnerability». In: *Fire Safety Journal* 58 (2013), pp. 92–102.
- Grimaz, S., E. Tosolini e G. Dolcetti. «A quick method for emergency evacuation design in workplaces». In: *Chemical Engineering Transactions* 19 (2010), pp. 433–438.
- Grosshandler, W., N. Bryner e D. Madrzykowski. *Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire*. Rapp. tecn. National Institute of Standards e Technology, 2005.
- Gwynne, S., E.R. Galea et al. «A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment». In: *Building and Environment* 34.6 (1999). in NUMERICAL MODELLING archive, pp. 741–749.
- Gwynne, S. e E. Kuligowski. «The faults with default». In: *Proceedings of the 12th International Fire Science & Engineering Conference, Interflam 2010, 5-7th July 2010, University of Nottingham, UK*. 2010, pp. 1473–78.
- Gwynne, S. e E. Rosenbaum. «Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement». In: a cura di M.J. Hurley. 5th. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Cap. 59, pp. 2115–2152.
- Hadjisophocleous, G. e N. Benichou. «Performance criteria used in fire safety design». In: *Automation in Construction* 8 (1999), pp. 489–501.
- Hankin, B.D. e R.A. Wright. «Passenger flow in subways». In: *Operational Research Quarterly* 9 (1958), pp. 81–88.
- Helm, P. «Integrated Risk Management for Natural and Technological Disasters». In: *Tephra* (1996).
- Heskestad, G. «Fire plumes, flame height, and air entrainment». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 1 (sez. 2), pp. 216–232.
- Hietaniemi, J. e E. Mikkola. *Design Fires for Fire Safety Engineering*. VTT Working Papers 139. Espoo. Finland: VTT Building Technology, 2010.
- *Minimising fire risks at chemical storage facilities. Basis for the guidelines for safety engineers*. Rapp. tecn. Espoo. Finland: VTT Building Technology, 1997.
- Hoglander, K. e B. Sundstrom. *Design Fires for Pre-Flashover Fires*. SP Report 1997:36. SP, 1997.
- Hoskins, B.L. «Adjusted density measurement methods on stairs». In: *Fire and Materials* (2013).
- ISO 13571. *ISO 13571:2007. Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data. Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data*. International Organization for Standardization, 2007.
- ISO/FDIS 13943. *ISO/FDIS 13943:2008. Fire safety - Vocabulary. Fire safety - Vocabulary*. International Organization for Standardization, 2008.

- ISO/TR 13387-1. *ISO/TR 13387-1:1999. Fire safety engineering - Application of fire performance concepts to design objectives*. International Organization for Standardization, 1999.
- ISO/TR 13387-2. *ISO/TR 13387-2:1999. Fire safety engineering - Design fire scenarios and design fires*. International Organization for Standardization, 1999.
- ISO/TR 13387-8. *ISO/TR 13387-8:1999. Fire safety engineering: Life safety - Occupant behaviour, location and condition*. International Organization for Standardization, 1999.
- ISO/TR 16738. *ISO/TR 16738:2009. Fire Safety Engineering - Evaluation of behaviour and movement of people*. International Organization for Standardization, 2009.
- Janssens, M. «Calorimetry». In: a cura di M.J. Hurley. 5th. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Cap. 26, pp. 924–970.
- Kady, R.A. «The development of a movement-density relationship for people going on four in evacuation». In: *Safety Science* 50 (2012), pp. 253–258.
- Karlsson, B. e J.G. Quintiere. *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press, 2000.
- Kawagoe, K. *Fire Behaviour in Rooms*. Rapp. tecn. 27. Tokyo: Building Research Institute, 1958.
- Kim, H. e D. Lilley. «Heat release rates of burning items in fires». In: *38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*. American Institute of Aeronautics e Astronautics. 2000.
- Kobes, M. et al. «Building safety and human behaviour in fire: A literature review». In: *Fire Safety Journal* 45 (2009), pp. 1–11.
- Kodur, V. K. R. e T. Z. Harmathy. «Properties of Building Materials». In: a cura di P.J. Di Nanno. Society of Fire Protection Engineering, 2002. Cap. 10 (Sez. 1), pp. 165–191.
- Korhonen, T. e S. Hostikka. *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. Technical Reference and User's Guide*. Rapp. tecn. VTT - Technical Research Centre of Finland, 2010.
- Kuligowski, E. «Predicting Human Behavior During Fires». English. In: *Fire Technology* 49.1 (2013), pp. 101–120. ISSN: 0015-2684. DOI: 10.1007/s10694-011-0245-6. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-011-0245-6>.
- Kuligowski E. and Peacock, R.D. et al. *Movement on Stairs During Building Evacuations*. Rapp. tecn. National Institute of Standards e Technology, 2015.
- Lautkaski, R. *Understanding vented gas explosions*. Rapp. tecn. VTT - Technical Research Centre of Finland, 1997.
- Law, A. et al. «The influence of travelling fires on a concrete frame». In: *Engineering Structures* (2011).
- Lovreglio, R., E. Ronchi e D. Nilsson. «A model of the decision-making process during pre-evacuation». In: *Fire Safety Journal* 78 (2015), pp. 168–179. ISSN: 0379-7112. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.07.001>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711215300023>.
- Madrzykowski, D. e W.D. Walton. *Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations*. Rapp. tecn. NIST, 2004.
- Mannan, S., cur. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*. Fourth Edition. Oxford, UK: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005.

BIBLIOGRAFIA

- McCaffrey, B.J., J.G. Quintiere e M.F. Harkleroad. «Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations». In: *Fire Technol.* (1981).
- McGrattan, K. e B. Toman. «Quantifying the predictive uncertainty of complex numerical models». In: *Metrologia* 48.3 (2011), pp. 173–180.
- McGrattan, K. et al. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) - Technical Reference Guide*. Rapp. tecn. Special Publication 1018-5. NIST, 2015.
- *Fire Dynamics Simulator (Version 6) - Technical Reference Guide. Volume 3: Validation*. Rapp. tecn. Special Publication 1018-3. NIST, 2015.
- Milke, J. e J. Klote. «Smoke Movement in Buildings». In: *NFPA Fire Protection Handbook*. A cura di A.E. Cote. NFPA, 2008. Cap. 3 (Sez. 18), pp. 43–55.
- Modak, A.T. «Thermal radiation from pool fires». In: *Combustion and Flame* 29 (1977), pp. 177–192.
- Morgan, A.B. e M. Bundy. «Cone calorimeter analysis of UL-94 V-rated plastics». In: *Fire and Materials* 31 (2007), pp. 257–283.
- Mori, M. e H. Tsukaguchi. «A new Method for Evaluation of Level of Service in Pedestrian Facilities». In: *Transp. Res* 21.3 (1987), pp. 223–234.
- Mowrer, F.W. «Enclosure smoke filling revisited». In: *Fire Safety Journal* 33 (1999), pp. 93–114.
- Mudan, K.S. «Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires». In: *Progress in Energy and Combustion Science* 10.1 (1984), pp. 59–80.
- Mulholland, G.W. «Smoke Production and Properties». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 2 (Sez. 2), pp. 258–268.
- Natori, A. «Identification of Localized Fire Source and Calculation of Heat Release Rate». In: *Fire Science and Technology* 27.3 (2008), pp. 372–417.
- Natori, A. et al. «Development of a Simple Estimation Method of Heat Release Rate based on Classification of Common Combustibles into Category Groups». In: *Fire Science and Technology* 27.3 (2006), pp. 372–417.
- Nelson, H.E. e F.W. Mowrer. «Emergency Movement». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 14 (sez.3), pp. 367–380.
- NFPA. *Fire Investigations. Beverly Hills Supper Club Fire*. Rapp. tecn. National Fire Protection Association, 1980.
- NFPA 101. *NFPA 101. Life Safety Code*. National Fire Protection Association, 2009.
- NFPA 551. *NFPA 551. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments*. National Fire Protection Association, 2010.
- NFPA 555. *NFPA 555. Methods for Evaluating Potential for Room Flashover*. National Fire Protection Association, 2009.
- NFPA 68. *NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*. National Fire Protection Association, 2007.
- NFPA 921. *NFPA 921. Fire and explosion investigations*. National Fire Protection Association, 2011.
- NFPA 92b. *NFPA 92B. Standard for Smoke Management System in Malls, Atria, and Large Spaces*. National Fire Protection Association, 2009.
- Nilsson, D. e C. Uhr. «Complex systems - A holistic approach for understanding and modelling fire evacuation behaviour». In: *Proceedings of the 4th*

- International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Robinson College, Cambridge, UK. 2009, pp. 525–530.
- NUREG-1824. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 3: Fire Dynamics Tools (FDT)*. Rapp. tecn. NUREG-1824 and EPRI 1011999. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Rockville, MD, 2007, and Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, 2007.
- Ogle, R.A. «Explosion hazard analysis for an enclosure partially filled with a flammable gas». In: *Process Safety Progress* 18 (1999), pp. 170–176.
- Older, S.J. «Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets». In: *Traffic Engineering and Control* (ago. 1968), pp. 160–163.
- Overholt, K. *Verification and Validation of Commonly Used Empirical Correlations for Fire Scenarios*. Rapp. tecn. NIST, 2014.
- Pauls, J.L. «Effective-Width Model for Evacuation Flow in Buildings». In: *Proceedings, Engineering Applications Workshop*. Society of Fire Protection Engineers. Boston, USA, 1980.
- Pauls, J.L., J.J. Fruin e J.M. Zupan. «Minimum Stair Width for Evacuation, Overtaking Movement and Counterflow - Technical Bases and Suggestions for the Past, Present and Future». English. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. A cura di N. Waldau et al. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 57–69. ISBN: 978-3-540-47062-5. DOI: 10.1007/978-3-540-47064-9_5. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-47064-9_5.
- Pauls, J.L., N. Groner et al. «Informed emergency responses through improved situation awareness». In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire*. 2009, pp. 531–542.
- Peacock, R.D. et al. «Defining flashover for fire hazard calculations». In: *Fire Safety Journal* 32 (1999), pp. 331–45.
- Pecile, L.C. «Soccorso alle persone in caso di incendio in luoghi ad elevato affollamento». Tesi di dott. Università degli Studi di Udine, 2013.
- Pettersson, O., S. Magnusson e J. Thor. *Fire engineering design of structures*. Rapp. tecn. 50. Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- Predtechenskii, V.M. e A.I. Milinskii. *Planning for Foot Traffic in Buildings*. New Delhi, India, 1978.
- Proulx, G. «Movement of people: the evacuation timing.» In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 13 (Sez. 3), pp. 342–366.
- Purkiss, J.A: *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Butterworth-Heinemann, 2007.
- Purser, D. «Behavioural impairment in smoke environments». In: *Toxicology* (1996).
- «Toxicity Assessment of Combustion Products». In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. A cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 6 (Sez. 2), pp. 83–171.
- Quintiere, J.G. *Principles of fire Behaviour*. Delmar Cengage Learning, 1998.
- Quintiere, J.G. e B.J. McCaffrey. *The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure: Vol. I*. Rapp. tecn. NBSIR 80-2054. Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1980.
- Quintiere, J.G., K. Steckler e D. Corley. «An Assessment of Fire Induced Flows in Compartments». In: *Fire Science and Technology* 4.1 (1984), pp. 1–14.

BIBLIOGRAFIA

- Sardqvist, S. *Initial Fires. RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests*. Rapp. tecn. Lund University, 1993.
- Sayers, P.B. et al. *Risk, Performance and Uncertainty in Flood and Coastal Defence - A Review*. Rapp. tecn. Defra - Environment Agency, 2003.
- Seyfried, A. et al. «The Fundamental Diagram of Pedestrian Movement Revisited». In: *J. Stat. Mech.* 10 (2005).
- SFPE. *SFPE Engineering Guide to Human Behavior in Fire*. Society of Fire Protection Engineering, 2003.
- *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd. Society of Fire Protection Engineers. 2002.
- Shi, L. et al. «Developing a database for emergency evacuation model». In: *Building and Environment* 44.8 (2009), pp. 1724–1729.
- Shokri, M. e C.L. Beyler. «Radiation from Large Pool Fires». In: *Journal of Fire Protection Engineering* (1989).
- Sime, J.D. «Accidents and disasters: vulnerability in the built environment». In: *Safety Science* 14 (1991), pp. 109–124.
- Stroup, D.W., N. Bryner et al. *Structural Collapse Fire Tests: Single Story, Wood Frame Structures*. Rapp. tecn. NISTIR 7094. FEMA e NIST, 2004.
- Stroup, D.W., L. DeLauter et al. *Fire Tests of Men's Suits on Racks*. REPORT OF TEST FR 4013. NIST, 2001.
- Stroup, D.W. e A. Linderman. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications*. Rapp. tecn. NUREG-1824 supplement 1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2013.
- Sundström, B. *CBUF: fire safety of upholstered furniture - the final report on the CBUF research programme*. Rapp. tecn. Commission of the European Communities. Directorate-General Science, Research e Development, 1996.
- «The Development of a European Fire Classification System for Building Products Test Methods and Mathematical Modelling». Tesi di dott. Lund University, 2007.
- Tavares, R.M. «An analysis of the fire safety codes in Brazil: Is the performance-based approach the best practice?». In: *Fire Safety Journal* 44 (2009). in STANDARDS ANALYSIS archive, pp. 749–755.
- «Evacuation Processes Versus Evacuation Models: "Quo Vadimus"?». In: *Fire technology* 45.4 (2009), pp. 419–430.
- Tewarson, A. «Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires». In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. A cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 4 (Sez. 3), pp. 616–695.
- Tien, C.L., K.Y. Lee e A. J. Stretton. «Radiation Heat Transfer». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 5 (Sez. 1), pp. 83–99.
- TNO. *Methods for the calculation of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (Green Book)*. The Netherlands: TNO (The Netherlands Organization of Applied Scientific Research), 1992.
- Tosolini, E. «Emergency evacuation and safety in complex environments». Tesi di dott. Università degli Studi di Udine, 2013.
- «L'evacuazione nella Fire Safety Engineering: proposta di un metodo integrato per la valutazione prestazionale». Tesi di laurea mag. Università degli Studi di Udine, 2008.

- Tosolini, E., S. Grimaz, L.C. Pecile et al. «People evacuation: simplified evaluation of available safe egress times (ASET) in enclosures». In: *Chemical Engineering Transactions* 26 (2012), pp. 501–506.
- Tosolini, E., S. Grimaz e E. Salzano. «A Sensitivity Analysis of Available Safe Egress Time Correlation». In: *Chemical Engineering Transactions* 31 (2013), pp. 223–229.
- Tosolini, E., L.C. Pecile e S. Grimaz. «LabCUBE_{egress}: a laboratory for a selective study of people's movement and human behaviour during egress situations». In: *Proceedings of the 5th Human Behaviour in Fires International Symposium*. London: Interscience Comms, 2012, pp. 148–158.
- UNDHA. *Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management*. 1992.
- UNDRO. *Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979)*. 1979.
- UNESCO. *Consultative meeting of Experts on the Statistical Studies of Natural Hazards and their Consequences*. Report. 1972.
- UNI EN 1991-1-2. *Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco*. 2004.
- Walton, W.D. e P.H. Thomas. «Estimating Temperatures in Compartment Fires». In: a cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 6 (Sez. 3), pp. 171–188.
- Walton, W.D., P.H. Thomas e Y. Ohmiya. «Estimating Temperatures in Compartment Fires». In: a cura di M.J. Hurley. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Cap. 30, pp. 996–1023.
- Watts, J.M. e J.R. Hall. «Introduction to Fire Risk Analysis». In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. A cura di P.J. Di Nenno. Society of Fire Protection Engineers, 2002. Cap. 1 (Sez. 5), pp. 1–7.
- Wickstrom, U. e U. Goransson. «Prediction of heat release rates of surface materials in large-scale fire test based on cone calorimeter results». In: *Journal of Testing and Evaluation* 15.6 (1987), pp. 364–370.
- Yung, D. *Principles of Fire Risk Assessment in Buildings*. Wiley, 2008.
- Zalok, E. e G. Hadjisophocleous. «Characterizing of design fires for clothing stores». In: *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, UK, 2007.

Pagina intenzionalmente vuota.

Appendice A

Test di vulnerabilità per l'obiettivo di sicurezza 4

Obiettivo 4

Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti

Principi generali

E' necessario prevedere dei sistemi che permettano agli occupanti di evacuare un'opera di costruzione e che consentano alle squadre di soccorso di potervi accedere per i seguenti fini:

- consentire agli occupanti che si trovano in un punto qualsiasi dell'edificio di mettersi in salvo;
- permettere alle squadre di soccorso di accedere all'edificio, di esplorare il suo interno e di uscirne.

In caso d'incendio, la sicurezza degli occupanti durante l'evacuazione può essere garantita da quattro tipi di misure:

- progettazione e disposizione dei percorsi verso le uscite di sicurezza concepiti per consentire l'evacuazione senza pericolo degli occupanti;
- separazione di questi percorsi tramite elementi divisorii a prova di incendio e di fumo;
- sistemi per il controllo dei fumi;
- limitazione del fuoco e del fumo prodotti dalle pareti e dai rivestimenti del soffitti/pavimenti lungo i percorsi verso le uscite di sicurezza.

Definizioni

Cella = ambiente delimitato da barriere fisiche più o meno permeabili agli effetti dell'evento e dotato di uno o più varchi.

Comparto = insieme di celle che si ipotizzano unitarie sotto il profilo delle condizioni operative e di rischio.

Franco = spazio dato dalla differenza tra la larghezza nominale del percorso o varco e la larghezza d'ingombro totale delle file. Vedere figura.

Larghezza di ingombro = larghezza di ingombro laterale di una singola fila che tiene conto anche della presenza di eventuali mezzi di deambulazione. Fare riferimento alla Tabella 1.

Larghezza effettiva = larghezza del varco effettivamente disponibile per il passaggio delle persone. Fare riferimento alla figura 1.

Livelli di confinamento = grado di isolamento rispetto agli effetti dell'incendio garantito dagli elementi di separazione verticali e orizzontali. Fare riferimento alla Tabella 2.

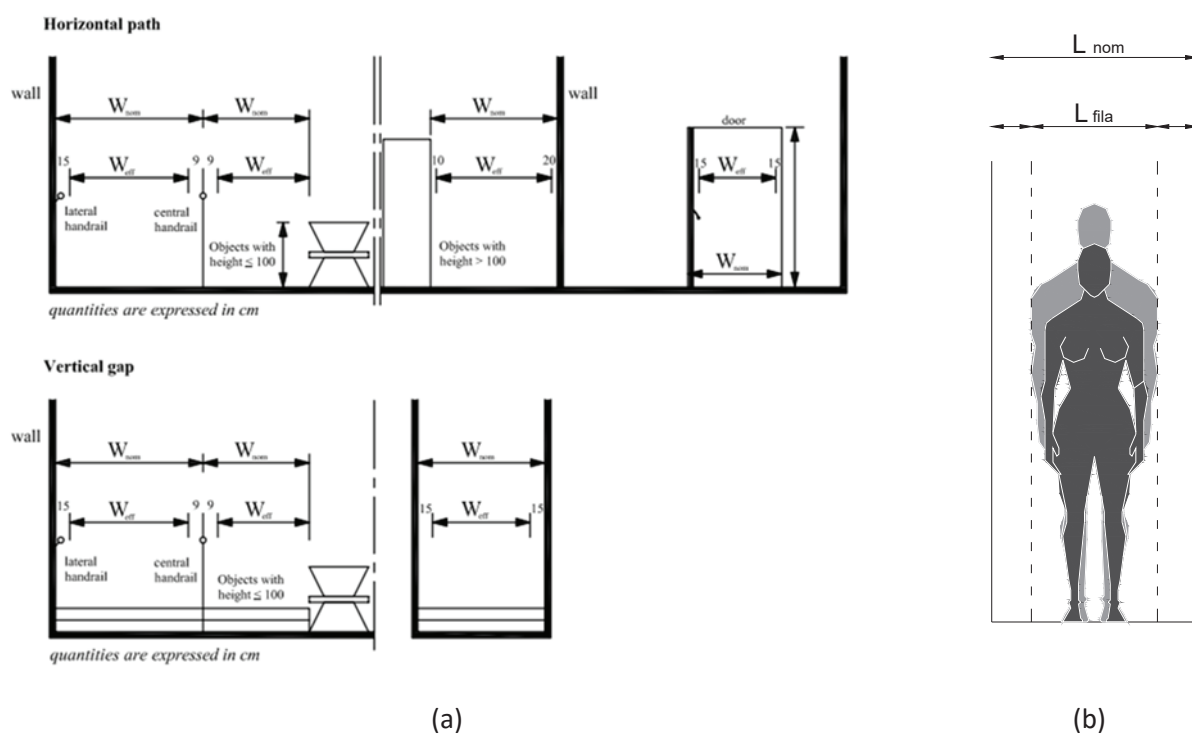


Figura 1. Larghezze effettive per percorsi orizzontali e verticali (a) e del franco (b).

Tabella 1. Larghezze di ingombro.

Caratteristiche delle persone	Larghezza di ingombro (in cm)
Generiche	55
Su sedia a rotelle	75
Con carrelli o borse	90
Su letto	110

Tabella 2. Definizione livelli di confinamento.

Livello di confinamento	Descrizione
Tipo 1	Partizioni fisse e/o mobili permeabili agli effetti dell'incendio
Tipo 2	Barriere fisse e/o mobili impermeabili agli effetti dell'incendio classificate almeno REI15 (compartimento antincendio)
Tipo 3	Barriere fisse e/o mobili sistemi che garantiscono impermeabilità agli effetti dell'incendio per un tempo indeterminato (es. filtri a prova di fumo, aree dell'edificio separate dalla zona critica primaria da almeno tre barriere di livello L2)

Numero di file = numero di file che attraversano un varco o sezione del percorso d'esodo, si calcola con la relazione:

$$n_{file} = \frac{d_{nom}}{d_{ing}}$$

dove:

d_{nom} = larghezza nominale del varco o sezione della tratta in cm.

d_{ing} = larghezza di ingombro in cm (Tabella 1).

Tempo di riferimento = tempo massimo convenzionale entro il quale deve essere abbandonata la zona in esame, prima che al suo interno le condizioni diventino insostenibili per la vita. Fare riferimento a Tabella 3.

Velocità di riferimento = velocità convenzionale con cui si spostano gli occupanti, assunta pari a 0.7 m/s.

Zone = suddivisione dell'unità funzionale in aree caratteristiche ai fini dell'analisi. Fare riferimento a Tabella 3.

Tabella 3. Definizione zone e tempi di riferimento.

Zona	Identificativo	Descrizione	Tempo di riferimento
Zona critica primaria (hot zone)	ZCP	Cella che si ipotizza essere interessata dagli effetti avversi dell'incendio.	60 s
Zona critica convenzionale (warm zone)	ZCC	Zona che contiene la cella in cui ha origine l'incendio e in cui gli effetti avversi possono propagarsi, in quanto tutte le barriere al suo interno sono permeabili.	90 s
Zona riparata convenzionale (temporary-cold zone)	ZRC	Zona complementare alla zona critica convenzionale e delimitata da barriere che consentono un confinamento di tipo 2.	240 s
Zona sicura	ZS	Zona nella quale non si risente degli effetti avversi dell'evento per un tempo indeterminato (confinamento di tipo 3) e dalla quale è possibile allontanarsi, avente caratteristiche idonee a ricevere e contenere un predeterminato numero di persone ovvero a permettere lo smaltimento dei flussi senza la creazione di intasamenti.	-

Livello di avversità caratteristico della cella

Il livello di avversità caratteristico della cella viene determinato come condizione peggiore tra quelle individuate in Tabella A3 e A4 sulla base del contenuto combustibile presente all'interno della cella.

Il livello di pericolosità delle zone (ZHL) viene determinato in Tabella A2 a partire dall'indice medio di pericolosità (MHI) calcolato attraverso l'equazione:

$$MHI = \frac{\sum_{n=1}^{num. \text{ celle}} chl_n \cdot A_{floor_n}}{\sum_{n=1}^{num. \text{ celle}} A_{floor_n}}$$

I coefficienti *chl* si determinano a partire dai livelli di avversità delle celle (Tabella)

Tabella A1. Definizione coefficienti chl.

CHL	chl
0	1
I	2
II	4
III	8
IV	16

Tabella A2. Definizione livello di pericolosità della zona (ZHL).

MHI	ZHL
1.0 ÷ 1.5	t
1.5 ÷ 3.5	b
3.5 ÷ 7.5	m
7.5 ÷ 14	a
>14	e

Tabella A3. Definizione livello di avversità caratteristico della cella (CHL) in termini di contenuto combustibile.

Contenuto combustibile	Non presente	Presente
Arredi in plastica	0	I
Cuscini e biancheria da letto	0	I/0 ^a
Arredi imbottiti o materassi	0	II/I ^a
Apparecchi elettronici	0	II
Solidi estremamente infiammabili	0	III/II ^b
Liquidi infiammabili	0	III/II ^b
Gas infiammabili	0	II/II ^b /I ^c
Sostanze reattive	0	III/I ^b
Materiale radioattivi	0	III/II ^b
Esplosivi	0	IV

a. Se materiale non propagante la fiamma.

b. Se sigillato in contenitori o armadi di sicurezza.

c. Se in tubazioni

Tabella A4. Definizione livello di avversità caratteristico della cella (CHL) in termini di rivestimenti e finiture interne.

Tipo di finiture o rivestimenti interni	Contributo alla propagazione del fuoco e alla produzione di fumi ^a	Non presente	Presente ^b			
			A<5%	<A≤25%	25<A≤50%	A>50%
Rivestimenti generici	Basso	0	0	0	0	I
	Ordinario/elevato	0	II	II	II	II
Rivestimenti in legno	Basso	0	I	I	I	I
	Ordinario/elevato	0	II	II	II	II
Tende	Basso	0	I	I	I	I
	Ordinario/elevato	0	II	II	III	III
Rivestimenti sottili	Basso	0	II	II	III	III
	Ordinario/elevato	0	III	III	III	III
Materiali con elevate emissioni nocive, termoplastici e/o con gocciolamento	Basso	0	I	II	III	III
	Ordinario/elevato	0	IV	IV	IV	IV

a. basso: materiale non propagante la fiamma; ordinario/elevato: materiali che possono favorire la propagazione dell'incendio.

b. A = percentuale della superficie complessiva della cella su cui si estendono i rivestimenti. Nel caso delle tende si considerano solo le pareti verticali.

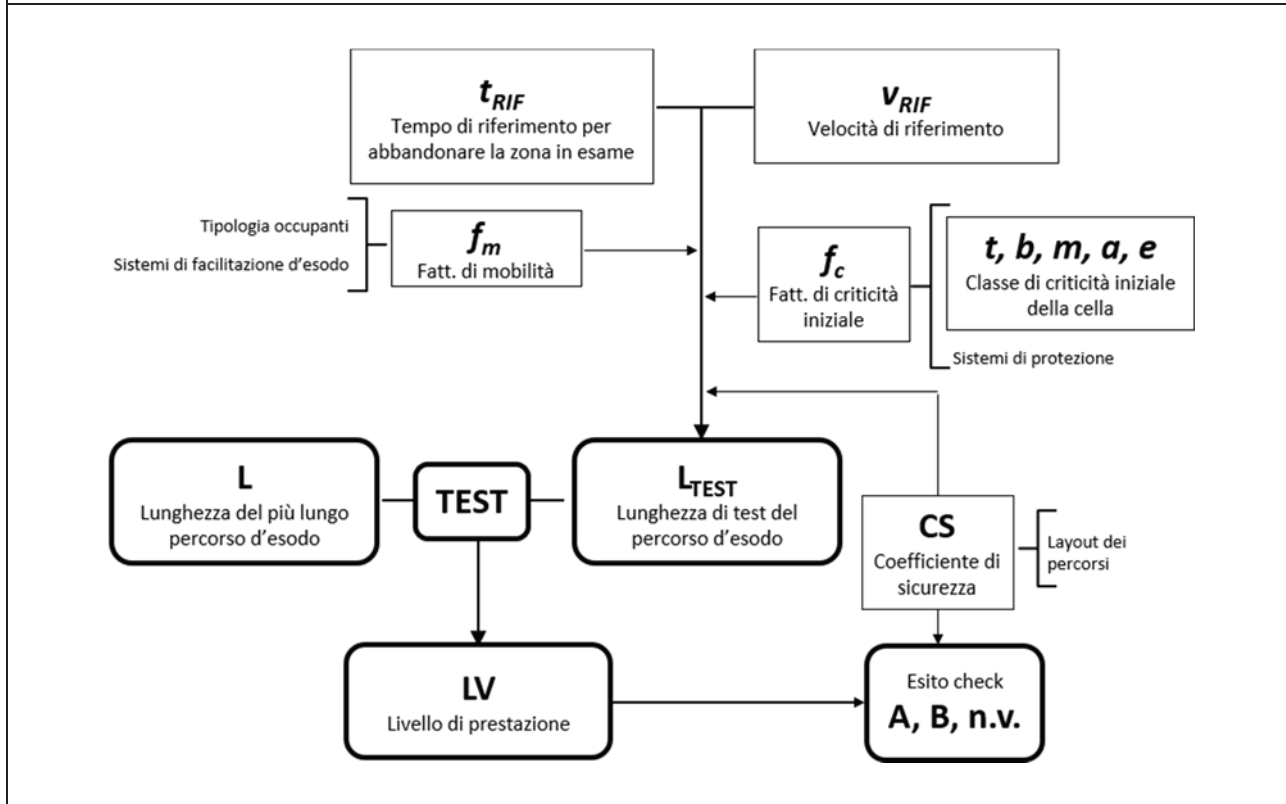
Test della raggiungibilità dei varchi della cella

Test di vulnerabilità - Obiettivo 4

Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti

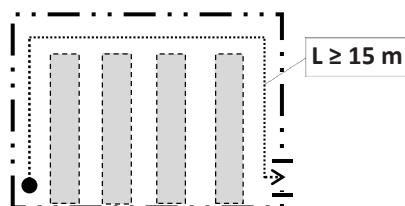
Raggiungibilità dei varchi della cella

(NB. Solo per celle in cui il più lungo percorso, in proiezione orizzontale, per raggiungere un varco è maggiore o uguale a 15 m)



Viene verificata la raggiungibilità dei varchi di uscita della cella entro un tempo di riferimento.

Il test deve essere eseguito per tutte le celle in cui il più lungo percorso, in proiezione orizzontale, per raggiungere un varco è maggiore o uguale a 15 m, negli altri casi la verifica si ritiene soddisfatta.



Il test si ritiene superato se:

$$L < L_{TEST}$$

L = lunghezza (in m) del più lungo percorso d'esodo per raggiungere il varco più vicino tenuto conto degli arredi e degli ostacoli presenti.

L_{TEST} = lunghezza di test (in m) del percorso d'esodo per raggiungere il varco più vicino:

$$L_{TEST} = \frac{t_{rif} \cdot v_{rif} \cdot f_m}{f_{ci} \cdot CS}$$

dove:

t_{rif} = tempo di riferimento per abbandonare la zona critica primaria in s (vedi paragrafo definizioni).

v_{rif} = velocità di riferimento (vedi paragrafo definizioni).

$f_m = \frac{EC}{OP}$ = fattore di mobilità, è dato dal rapporto tra il fattore che tiene conto delle capacità di uscita (EC, Tabella 4) e il fattore di ostruzione dei percorsi (OP, Tabella 5).

f_{ci} = fattore di criticità iniziale (Tabella 6).

CS = coefficiente di sicurezza (Tabella 7).

Tabella 4. Fattore della capacità di uscita (EC)

Familiarità dei luoghi	Sistemi di facilitazione all'esodo (segnaletica, avvisi vocali, assistenti all'esodo)	Mobilità				
		Generica	Standard	Guidata	Ridotta	Assistita
Si		1.00	1.00	0.80	0.75	0.50
No	Presenti	0.85	0.95	0.75	0.50	0.30
	Assenti o non efficaci	0.55	0.60	0.50	0.50	0.30

Tabella 5. Fattore di ostruzione dei percorsi (OP)

Densità di affollamento d (p/m ²)	Caratteristiche degli ostacoli		
	Mobili	Semimobili	Fissi o vincolati
$d \leq 0.4$	0.67	0.67	0.67
$0.4 < d \leq 1.0$	0.80	0.67	0.80
$d > 1.0$	1.00	0.80	0.90

Tabella 6. Fattore di criticità iniziale f_{ci}

Livello di criticità iniziale	Sistemi di protezione			
	Assenti	Spegnimento automatico	Evacuazione fumi e calore	Entrambi presenti
t	1.33	1.75	1.85	2.00
b	1.00	1.66	1.40	1.90
m	0.75	0.90	0.70	1.05
a	0.50	0.83	0.67	1.00
e	0.30	0.50	0.40	0.60

Tabella 7. Coefficiente di sicurezza CS

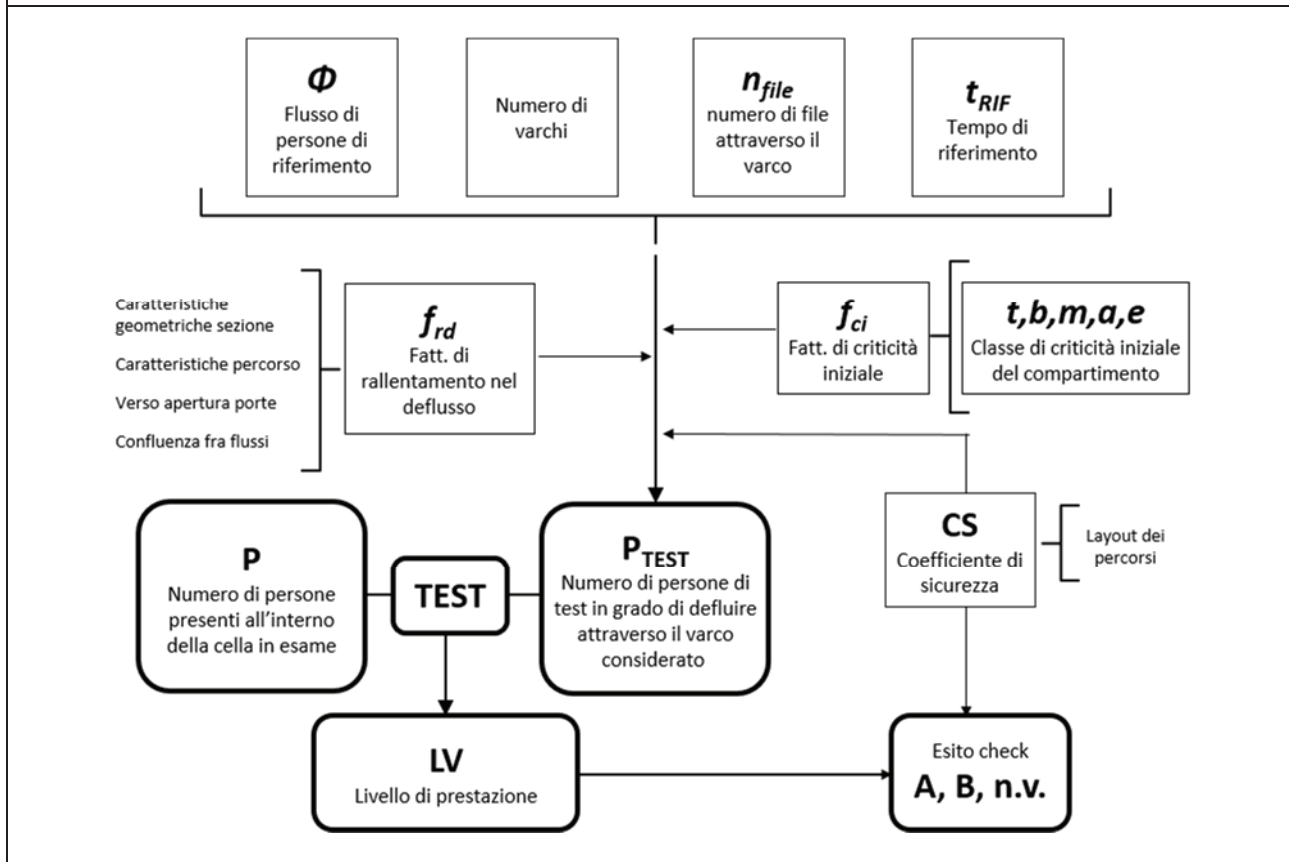
Percorsi verso i varchi	CS
Unico percorso	2.0
Percorsi multipli asimmetrici	1.8
Percorsi multipli simmetrici	1.7
Percorsi multipli bilanciati e presenza di varchi che immettono direttamente verso una zona sicura	1.4

Test della capacità di deflusso delle celle

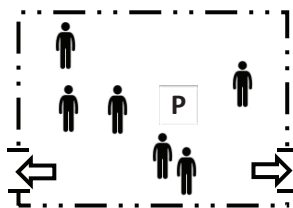
Test di vulnerabilità - Obiettivo n.4

Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti

Capacità di deflusso delle celle



Viene verificata la capacità di sfollamento dei varchi della cella che immettono su un percorso d'esodo o direttamente in una zona sicura.



Il test si ritiene superato se:

$$P < P_{TEST}$$

P = numero di persone presenti all'interno della cella in esame.

P_{TEST} = numero di persone di test che i varchi della cella sono in grado di far defluire nel tempo di riferimento, calcolato con la relazione seguente:

$$P_{TEST} = \frac{\sum_i^{n. \text{ varchi}} (\phi \cdot n_{file,i} \cdot f_{rd,i}) \cdot t_{rif}}{CS \cdot f_{ci}}$$

ϕ = flusso di persone di riferimento in grado di defluire attraverso il varco considerato, assunto pari a 1.4 persone/(s m).

$n_{file,i}$ = numero di file che possono defluire attraverso il varco i-esimo, vedi paragrafo definizioni.

$f_{rd,i} = LI_i \cdot GF_i$ = fattore di rallentamento nel deflusso attraverso il varco i-esimo. È dato dal prodotto del fattore di interazione tra le file (LI, Tabella 8) e il fattore di deflusso al varco (GF, Tabella 9).

f_{ci} = fattore di criticità iniziale (Tabella 10).

t_{rif} = tempo di riferimento per abbandonare la zona critica primaria in s (vedi paragrafo definizioni).

CS = coefficiente di sicurezza (Tabella 11).

Tabella 8. Fattore di interazione tra le file (LI).

Numero di file al varco (n_{Li})	Caratteristiche dell'interazione tra le file al varco	Franco (m)	Fattore LI
1	Fila singola	< 0.20	0.67
		0.20 ÷ 0.40	0.90
		0.40 ÷ 0.55	1.00
2	Flussi contrapposti al varco File parallele	qualsiasi	0.67
		< 0.20	0.80
		0.20 ÷ 0.55	1.00
3	Flussi contrapposti al varco File parallele	qualsiasi	0.67
		< 0.30	0.80
		0.30 ÷ 0.55	1.00
> 3	Flussi contrapposti al varco File parallele	qualsiasi	0.67
		< 0.40	0.75

Tabella 9. Fattore di deflusso al varco (GF).

Porte apribili nel verso dell'esodo	Densità di affollamento d (persone/m ²)	Posizione del varco	
		In piano	Rampe o scale
SI	Qualsiasi	1.00	0.75
NO	$d \leq 0.4$	0.90	0.68
	$0.4 < d \leq 1.0$	0.75	0.56
	$d > 1.0$	0.67	0.50

Tabella 10. Fattore di criticità iniziale f_{ci}

Livello di criticità iniziale	f_{ci}
t	0.80
b	1.00
m	1.25
a	2.00
e	10.00

Tabella 11. Coefficiente di sicurezza CS

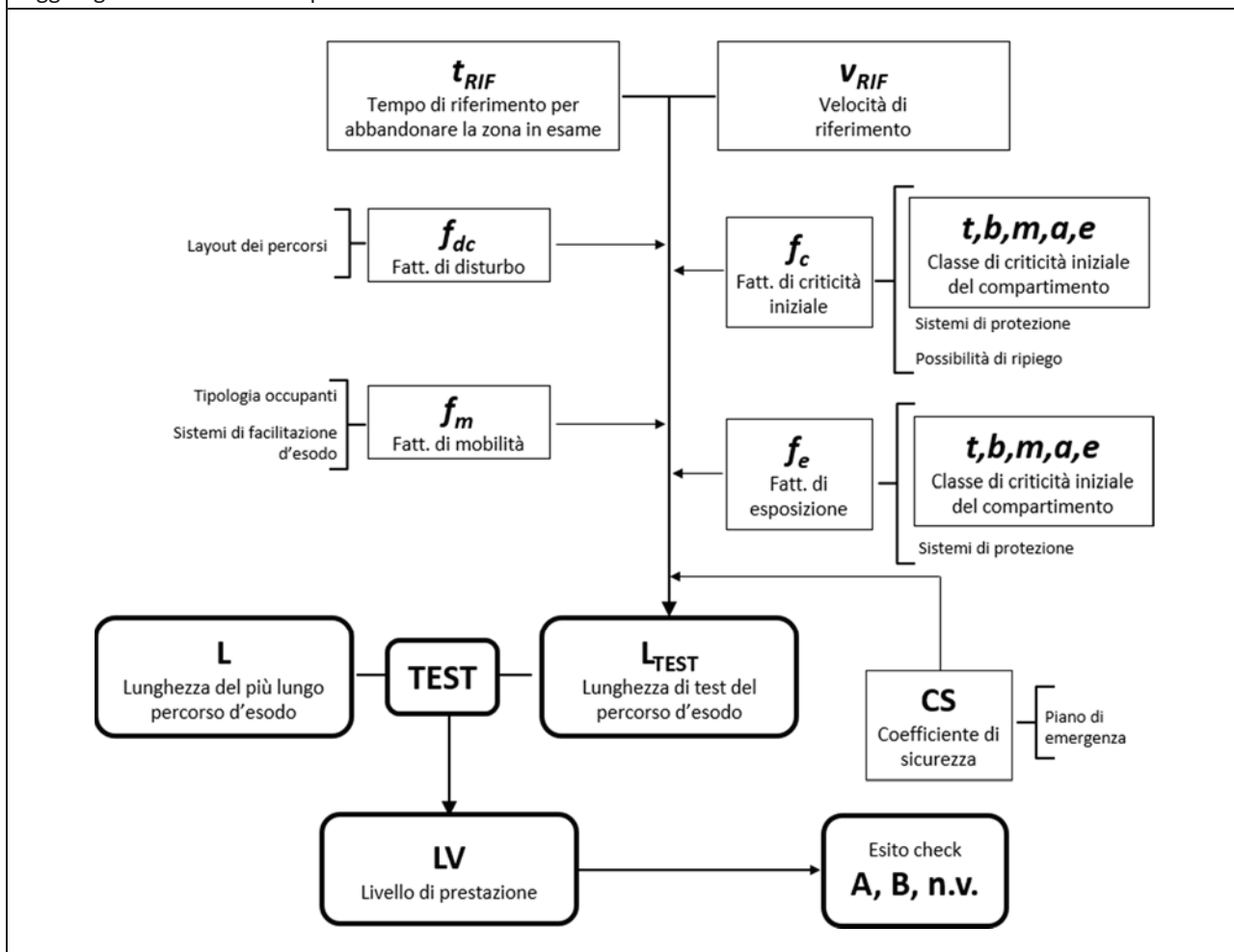
Percorsi verso i varchi	CS
Unico percorso	3.0
Percorsi multipli asimmetrici	2.5
Percorsi multipli simmetrici	2.0
Percorsi multipli bilanciati e presenza di varchi che immettono direttamente verso una zona sicura	1.6

Test della raggiungibilità di una zona riparata

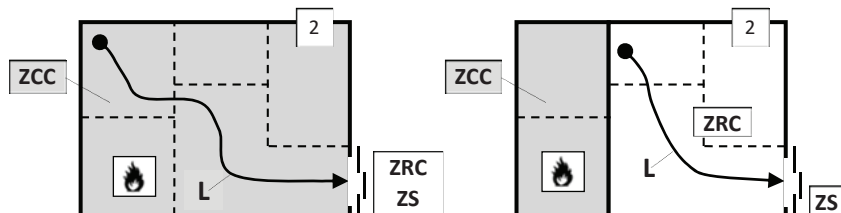
Test di vulnerabilità - Obiettivo n.4

gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti

Raggiungibilità di una zona riparata



Il test viene eseguito sia nella zona critica convenzionale (ZCC) sia nella zona riparata convenzionale (ZRC) al fine di testare, per ciascuna delle due zone, la lunghezza massima (in m) del percorso d'esodo per raggiungere i varchi verso una zona riparata o una zona sicura entro un tempo di riferimento prefissato.



Il test si ritiene superato se:

$$L_{EC} < L_{TEST}$$

L_{EC} = lunghezza esposta convenzionale (in m) del più lungo percorso d'esodo per raggiungere un varco verso una ZRC o una ZS riscontrato nella ZCC in esame:

$$L_{EC} = \sum_i^{\text{num. tratte uniformi}} \frac{L_i \cdot f_{e,i}}{f_{dc,i} \cdot f_{ci,i}}$$

L_i = lunghezza (in m) dell'i-esimo tratto uniforme.

$f_{e,i}$ = fattore di esposizione dell'i-esimo tratto uniforme (Tabella 13).

$f_{dc,i}$ = fattore di disturbo dovuto alle confluenze tra flussi nell'i-esimo tratto uniforme (Tabella 12).

f_{ci} = fattore di criticità iniziale nell'i-esimo tratto uniforme (Tabella 14).

L_{TEST} = lunghezza di test (in m) del percorso d'esodo per raggiungere una zona riparata o una zona sicura entro il tempo di riferimento, calcolata con la relazione seguente, considerando le condizioni peggiori individuabili lungo il percorso:

$$L_{TEST} = \frac{t_{rif} \cdot v_{rif} \cdot f_m}{CS}$$

t_{rif} = tempo di riferimento per abbandonare la zona in esame in s (vedi paragrafo definizioni).

v_{rif} = velocità di riferimento (vedi paragrafo definizioni).

f_m = fattore di mobilità (Tabella 15).

f_{dc} = fattore di disturbo dovuto alle confluenze tra flussi (Tabella 12).

CS = coefficiente di sicurezza (Tabella 16).

Tabella 12. Fattore di disturbo dovuto alle confluenze tra flussi f_{dc}

Layout dei percorsi (presenza di alternative e/o confluenze tra flussi)	f_{dc}
Assenza di confluenze tra flussi	1.0
Presenza di interazioni/confluenze con flussi secondari	0.9
Presenza di interazioni/confluenze con flussi primari	0.85

Tabella 13. Fattore di esposizione f_e

Livello di criticità della tratta	Misure di protezione		f_e
	Contro l'incendio	Contro le esplosioni	
t	Presenza di barriere di livello L2 almeno REI 15	-	0.0
	Sistema di pressurizzazione (sovrappressione di almeno 25 Pa per almeno 20 minuti)	-	0.5
b	-	-	0.8
> b oppure presenza di scenari di esplosione	Presenza di barriere fisse o mobili non impermeabili (inferiori a REI 15, oppure non dotate di dispositivi di autochiusura)	Presenza di barriere in grado di resistere alle onde di sovrappressione	1
		Assenza di barriere in grado di resistere alle onde di sovrappressione	10

Tabella 14. Fattore di criticità iniziale f_{ci} (ottenuto come prodotto dei singoli coefficienti).

Livello di criticità iniziale		Sistemi di protezione						Possibilità di ripiego	
		Spegnimento automatico		Evacuazione fumi e calore				Invertendo il senso di marcia lungo la tratta è possibile raggiungere una ZS o una ZRC.*	
		Presente	Assenti	Presente	Assenti				
t	1.330	1.33	1.00	1.66	1.00			1.00	0.60
b	1.000	1.33	1.00	1.66	1.00			1.00	0.50
m	0.725	x 1.33	1.00	x 1.66	1.00	x		1.00	0.50
a	0.500	1.33	1.00	1.66	1.00			1.00	0.40
e	0.300	1.33	1.00	1.66	1.00			1.00	0.30

* Per la zona riparata: invertendo il senso di marcia lungo la tratta è possibile raggiungere una ZS senza attraversare la ZCC

Tabella 15. Fattore di mobilità f_m .

Familiarità dei luoghi	Sistemi di facilitazione all'esodo (segnaletica, avvisi vocali, assistenti all'esodo)	Mobilità				
		Generica	Standard	Guidata	Ridotta	Assistita
Si		1.00	1.00	0.80	0.75	0.50
No	Presenti	0.85	0.95	0.75	0.50	0.30
	Assenti o non efficaci	0.55	0.60	0.50	0.50	0.30

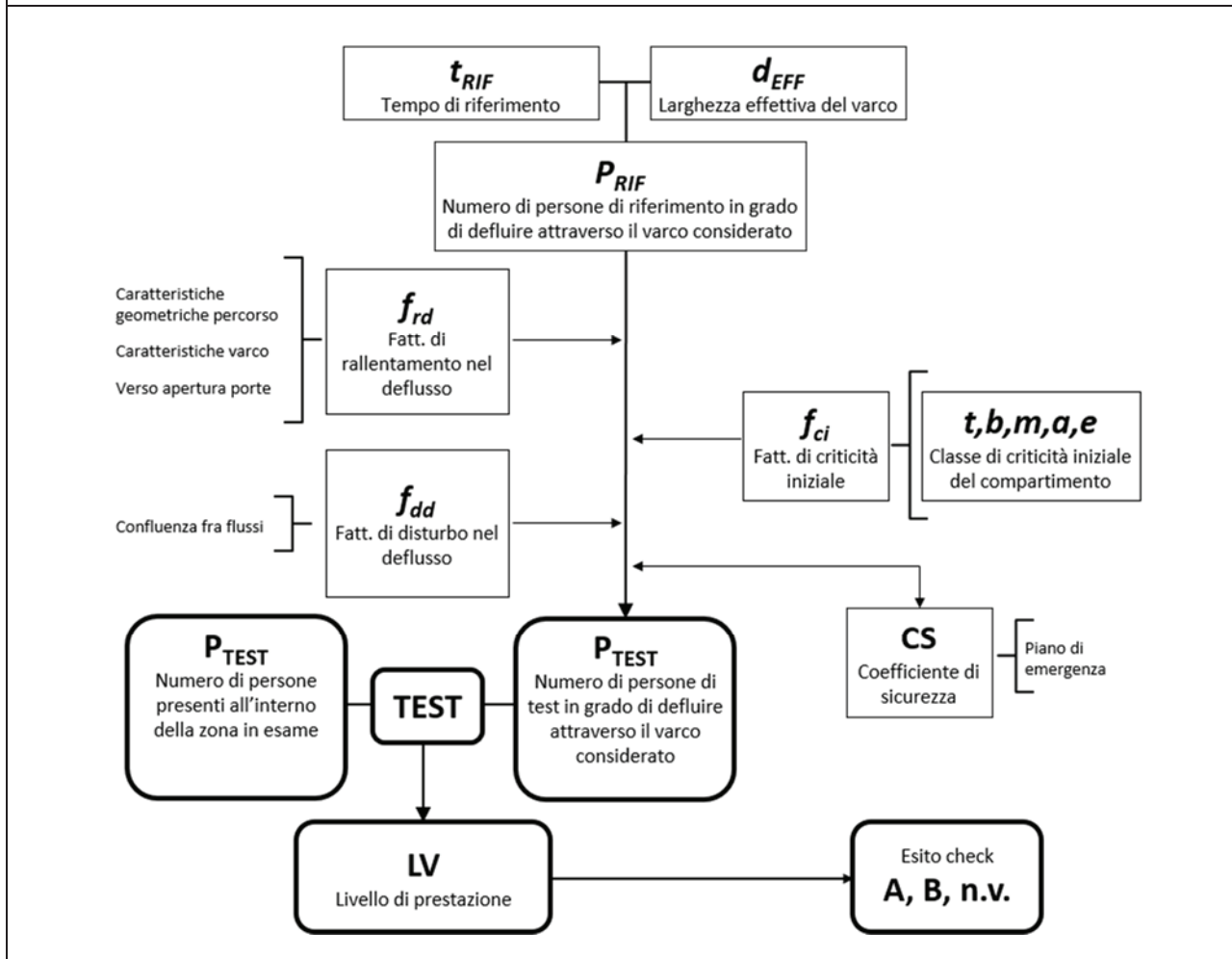
Tabella 16. Coefficiente di sicurezza CS

Piano di emergenza	CS
Presente	1.5
Assente	3.0

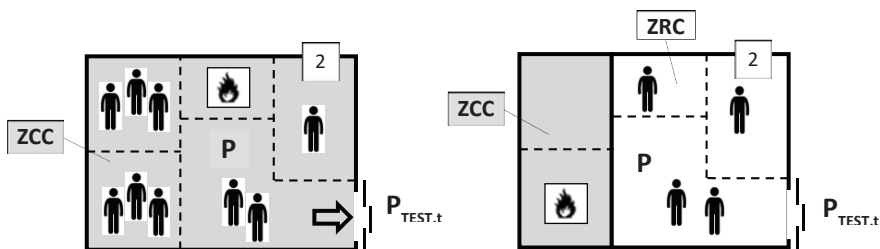
Test della capacità di deflusso al varco critico

Test di vulnerabilità - Obiettivo n.4 gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti

Capacità di deflusso massima al varco critico



Viene verificato il numero massimo di persone che i varchi della tratta d'esodo considerata sono in grado di far defluire entro il tempo di riferimento.



Il test si ritiene superato se:

$$P < P_{TEST}$$

P = numero di persone presenti all'interno della zona in esame.

P_{TEST} = numero di persone di test che il varco della tratta d'esodo considerata è in grado di far defluire nel tempo di riferimento calcolata con la relazione seguente, considerando le condizioni peggiori individuabili lungo il percorso:

$$P_{TEST} = \frac{P_{rif} \cdot f_{rd} \cdot f_{dt}}{CS \cdot f_{ci}}$$

P_{rif} = numero di persone di riferimento in grado di defluire attraverso il varco considerato nel tempo di riferimento per la zona in esame, da calcolare con la relazione seguente (basata sul lavoro di Pauls):

$$P_{rif} = \frac{d_{eff} \cdot (t_{rif})^{1.37}}{350}$$

d_{eff} = larghezza effettiva del varco o sezione della tratta in cm.

t_{rif} = tempo di riferimento per abbandonare la zona in esame in s (vedi paragrafo definizioni).

$f_{rd} = \prod_i PF_i$ = fattore di rallentamento nel deflusso (tabelle 17).

f_{dd} = fattore di disturbo nel deflusso, da riferirsi alla condizione più sfavorevole presente (Tabella 18).

f_{ci} = fattore di criticità iniziale (Tabella 19).

CS = coefficiente di sicurezza (Tabella 20).

Tabelle 17. Fattori PF per il calcolo del fattore di rallentamento nel deflusso f_{rd} .

PF ₁			
Altezza del percorso h (m)	Larghezza del percorso		
	$W_{nom} \leq W_{body}$	$W_{nom} > W_{body}$ Franco ≤ 0.20 m	$W_{nom} > W_{body}$ Franco > 0.20 m
$h \geq 2.0$	0.00	0.87	1.00
$1.7 \leq h < 2.0$	0.00	0.33	0.50
$h < 1.7$	0.00	0.00	0.00

PF ₂			
Porte	Tratto del percorso in corrispondenza del varco		
	In piano	In salita	In discesa
Ante apribili nel verso dell'esodo	1.00	0.75	0.75
Ante non apribili nel verso dell'esodo	0.50	0.38	0.38

PF ₃	
Andamento generale tratto del percorso	
Tratta orizzontale regolare e senza gradini	1.00
Tratta irregolare con allargamenti e restringimenti	0.95
Presenza di rampe regolari	0.90
Rampe con più di 15 gradini o meno di 3	0.80
Tratta non regolare	0.80

PF₄

Geometria scale	
Scale assenti	1.00
Alzata = 16.5 cm - Pedata = 33 cm	0.90
Alzata = 16.5 cm - Pedata = 30.0 cm	0.85
Alzata = 17.8 cm - Pedata = 27.9 cm	0.80
Alzata = 19.0 cm - Pedata = 25.4 cm	0.75
Alzata = > 22.0 cm - Pedata = < 24.0 cm	0.00

Tabella 18. Fattore di disturbo nel deflusso della tratta dovuto a confluenza tra le file (f_{dd}).

Caratteristiche dei flussi in corrispondenza del varco	Fattore f_{dd}
Fila singola o file multiple che confluiscono senza interazioni reciproche	1.00
Confluenza e interazioni tra flussi primari, ossia flussi che provengono da percorsi d'esodo principali	0.85
Confluenza e interazioni tra un flusso primario e flussi secondari, ossia flussi che provengono da percorsi d'esodo secondari	0.90
Confluenza tra flussi primari provenienti da direzioni opposte	0.75
Confluenza tra un flusso primario e un flusso secondario provenienti da direzioni opposte	0.80

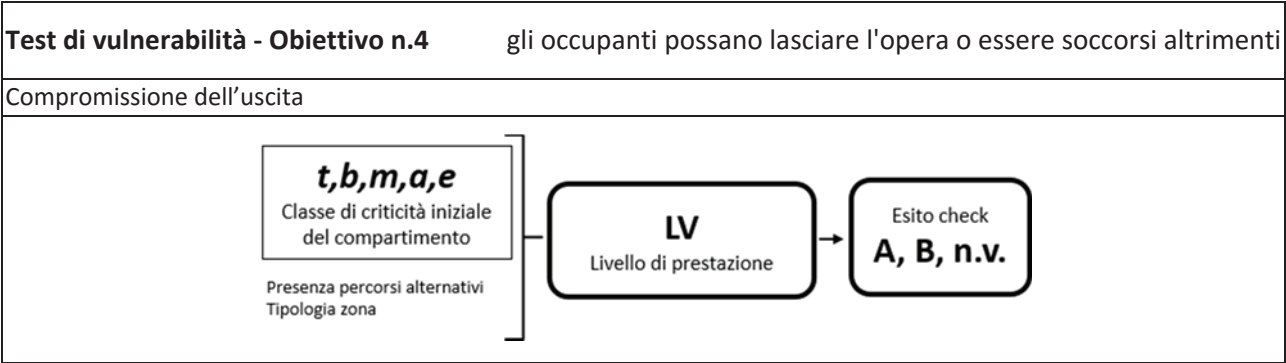
Tabella 19. Fattore di criticità iniziale f_{ci}

Livello di criticità iniziale	f_{ci}
t	0.80
b	1.00
m	1.25
a	2.00
e	10.00

Tabella 20. Coefficiente di sicurezza CS

Piano di emergenza	CS
Presente	1.5
Assente	3.0

Test di compromissione dell'uscita



Verifica della presenza di percorsi alternativi per l'esodo da singole celle

La verifica deve essere eseguita per tutte le celle in cui il più lungo percorso, in proiezione orizzontale, per raggiungere un varco è maggiore o uguale a 15 m, negli altri casi la verifica si ritiene soddisfatta automaticamente.

Questa analisi viene eseguita per valutare la presenza di una via d'esodo alternativa e praticabile nel caso in cui un focolaio si sviluppi in prossimità di un varco. A tale scopo si definisce un'area interdetta convenzionale, delimitata dai contorni fisici presenti nella cella e dall'arco di circonferenza con centro in corrispondenza della mezzeria del varco e raggio ricavato dalla Tabella 21 in funzione del livello di criticità iniziale della cella.

Tabella 21. Raggio convenzionale (m) di interdizione all'esodo in funzione del livello di criticità iniziale.

	Livello di criticità iniziale			
	t	b	m	a
Raggio di interdizione (m)	4.0	5.0	7.5	10.0

La verifica si ritiene superata se esiste almeno un varco alternativo praticabile.



Figura 2. Nel caso a) la verifica si ritiene soddisfatta; nel caso b) la verifica non è soddisfatta in quanto esiste un'area interdetta senza vie d'uscita.

Verifica della possibilità di ripiego lungo tratte d'esodo.

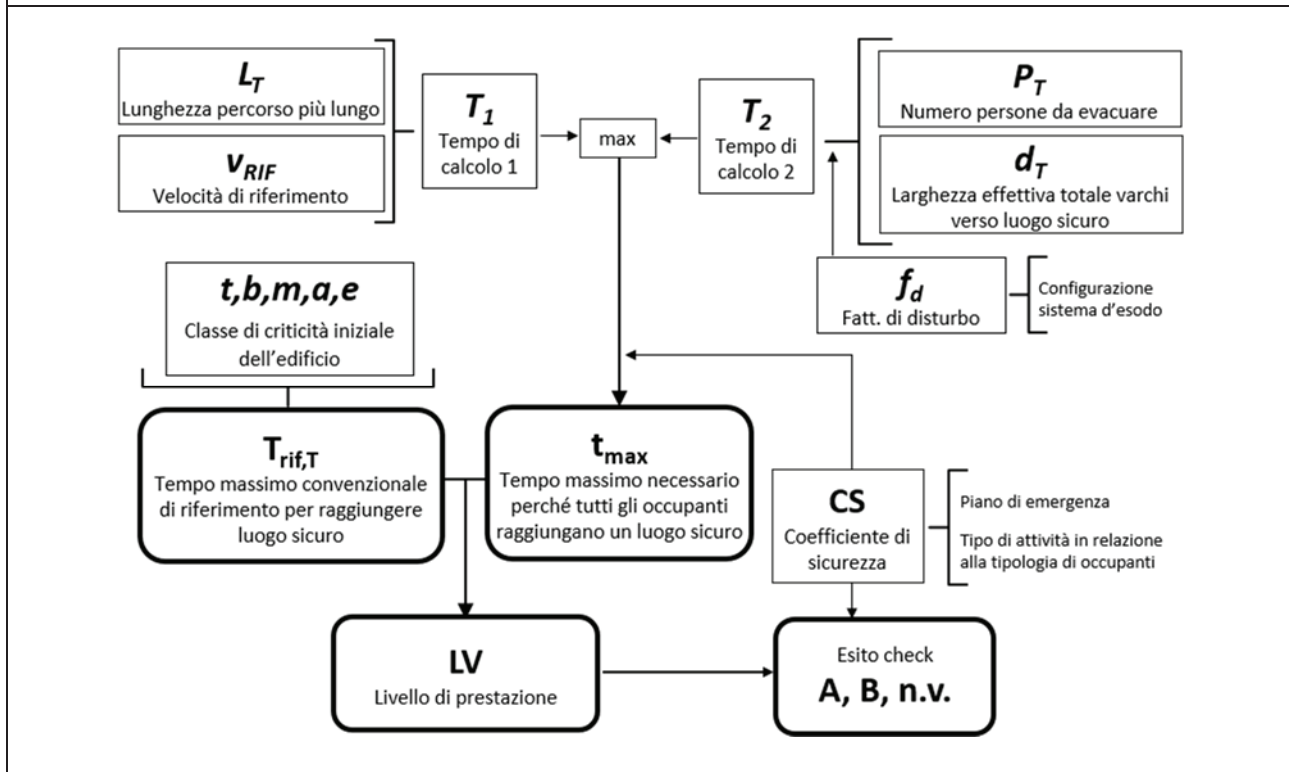
Se la tratta in esame si trova all'interno di una zona critica convenzionale (ZCC), la verifica si ritiene soddisfatta se invertendo il senso di marcia lungo la tratta d'esodo è in ogni caso possibile raggiungere una zona riparata convenzionale (ZRC) o una zona sicura (ZS);

Se la tratta in esame si trova all'interno di una zona riparata convenzionale (ZRC), la verifica si ritiene soddisfatta se invertendo il senso di marcia lungo la tratta d'esodo è in ogni caso possibile raggiungere una zona sicura (ZS) senza dover attraversare la zona critica convenzionale (ZCC).

Test di abbandonabilità generale del sistema d'esodo

Test di vulnerabilità - Obiettivo n.4 gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti

Abbandonabilità generale del sistema d'esodo



Valutare se tutti gli occupanti presenti nell'unità funzionale sono in grado di raggiungere un luogo sicuro entro il tempo di massimo convenzionale.

Il test si ritiene soddisfatto se:

$$t_{\max} \leq t_{\text{rif},T}$$

$t_{\max}$ = tempo massimo necessario perché tutti gli occupanti raggiungano un luogo sicuro, si calcola con la seguente relazione, sviluppata a partire dall'equazione proposta da Pauls.

$$t_{\max} = \max \left\{ \left(\frac{L_T}{v_{\text{rif}}} \cdot CS \right); \left(\frac{P_T \cdot 350 \cdot f_d}{d_T} \cdot CS \right)^{\frac{1}{1.37}} \right\}$$

L_T = lunghezza del percorso più lungo necessario per raggiungere un luogo sicuro (in m).

v_{rif} = velocità di riferimento (m/s), vedere definizioni.

P_T = numero totale di persone nell'unità funzionale che devono evacuare.

f_d = fattore di disturbo del deflusso (Tabella 23).

d_T = somma delle larghezze effettive di tutte le aperture verso un luogo sicuro (in cm).

CS = coefficiente di sicurezza (Tabella 24).

$t_{\text{rif},T}$ = tempo massimo convenzionale di riferimento per raggiungere un luogo sicuro in s. Fare riferimento alla Tabella 22.

Tabella 22. Tempo massimo convenzionale di riferimento in s , $t_{rif,T}$.

Livello di criticità massima riscontrata nell'edificio			
	t oppure b	m	a oppure e
Tempo di riferimento (s)	480	240	120

Tabella 23. Fattore di disturbo f_d .

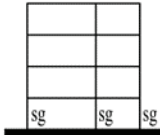
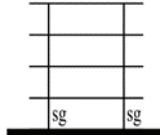
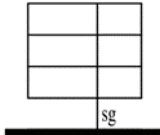
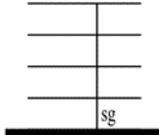
Configurazione sistema d'esodo			
Magliata ad uscita multipla	A telaio magliato con uscite multiple	Ad albero magliato	Ad albero
			
1.00	1.25	1.50	1.67

Tabella 24. Coefficiente di sicurezza CS .

Piano di emergenza	Piano di emergenza	
	Presente	Assente
Attività con presenza significativa di persone con capacità di autogestione limitata o impedita	2.50	5.00
Attività con prevalenza di pubblico	2.00	4.00
Attività aperta al pubblico	1.50	3.00
Presenza di persone addette con capacità di autogestione ridotta	1.50	2.50
Presenza di persone addette con capacità di autogestione standard	1.25	2.00