



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Corso di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti XXV Ciclo

**IL RISCHIO DI INCENDIO NELLE
GALLERIE FERROVIARIE**
L'elaborazione di Piani di Emergenza
Esterna

Dottorando: Giovanni Rainoldi
Curriculum in Ingegneria Ferroviaria
Tutore : Gabriele Malavasi
Cotutore: Roberto Maja

A mamma e papà

Indice

INDICE DELLE FIGURE	5
INDICE DELLE TABELLE.....	7
INTRODUZIONE	8
INQUADRAMENTO DELLA RICERCA: TEMA, SCOPO, OBIETTIVI	8
ATTIVITÀ DI RICERCA, INDIVIDUAZIONE DELLE COMPETENZE E DELLE CRITICITÀ.....	9
PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA INTEGRATA DI ANALISI E VERIFICA SU UN CASO CONCRETO	10
CAPITOLO 1 LEGGI E REGOLAMENTI PER LA GESTIONE DELLE EMERGENZE IN GALLERIA.....	12
1.1 LEGGI E REGOLAMENTI PER LA REGOLAMENTAZIONE DEL TRANSITO ALL'INTERNO DI GALLERIE FERROVIARIE.....	13
1.1.1 D.M. 28 ottobre 2005 "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" [54]	13
1.1.2 Direttiva 2008/163/CE specifica tecnica di interoperabilità (STI) [57]	19
1.1.3 Principali aspetti riguardanti la gestione delle emergenze nelle 2 direttive esaminate.....	21
1.2 IL REGOLAMENTO DI ESERCIZIO FERROVIARIO.....	25
1.3 INDIRIZZI OPERATIVI PER LA GESTIONE DELLE EMERGENZE IN AMBITO FERROVIARIO	26
CAPITOLO 2 LE COMPONENTI CHE DEFINISCONO IL RISCHIO ALL'INTERNO DI UNA GALLERIA FERROVIARIA	30
2.1 COMPONENTI CHE CONCORRONO A DEFINIRE LA SICUREZZA DEL SISTEMA FERROVIARIO	31
2.2 MISURE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO ATTIVE E PASSIVE.....	34
2.3 METODOLOGIE DI STIMA DEL RISCHIO NELLE GALLERIE FERROVIARIE	39
CAPITOLO 3 MODELLO INTEGRATO DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA IN GALLERIA	44
3.1 MODELLO DI CALCOLO DELLA FREQUENZA DI INCIDENTE IN GALLERIA	45
3.2 MODELLO DI VALUTAZIONE DI SISTEMI DI RILEVAZIONE ANOMALIA	49
3.3 MODELLO DI ARRESTO CONVOGLIO IN EMERGENZA.....	51
3.3.1 Marcia a vista.....	51
3.3.2 Fermata assistita	53
3.3.3 Analisi comparata	55
3.3.4 Conclusioni	56
3.4 MODELLO DI ATTIVAZIONE DELLE PROCEDURE DI AUTO SALVATAGGIO	58
3.5 MODELLO DI STIMA DELLE CONSEGUENZE	61
3.5.1 Metodi di descrizione di un incendio in galleria	61

3.5.2 Metodi di valutazione della vivibilità di una galleria durante un incendio	66
3.5.3 Costruzione del modello speditivo di valutazione delle conseguenze.....	73
3.6 MODELLO DI VALUTAZIONE DEI SOCCORSI	76
3.7 MODELLO DI EVACUAZIONE.....	83
3.8 COSTRUZIONE DI UN MODELLO INTEGRATO DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO IN GALLERIA.....	88
<u>CAPITOLO 4 ANALISI E VALIDAZIONE DEL MODELLO.....</u>	<u>91</u>
4.1 ANALISI DEI PARAMETRI CHE DEFINISCONO IL MODELLO INTEGRATO DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO	92
4.2 ANALISI DI CASI DI STUDIO – INCENDIO DI UN CONVOGLIO FERROVIARIO IN GALLERIA.....	94
4.2.1 Calcolo della probabilità di accadimento	96
4.2.2 Valutazione di sistemi di rilevazione anomalia	97
4.2.3 Arresto convoglio in emergenza	98
4.2.4 Attivazione delle procedure di auto salvataggio	102
4.2.5 Evacuazione	103
4.2.6 Valutazione dei soccorsi	107
4.2.7 Stima delle conseguenze	110
4.2.8 Risultati conclusivi.....	113
4.3 ANALISI DELLE CONSEGUENZE	114
4.4 ANALISI CRITICA DEI RISULTATI PER LA MODALITÀ DI ARRESTO DEL CONVOGLIO IN EMERGENZA.....	119
4.5 ADATTAMENTO DEL MODELLO A SISTEMI ANTINCENDIO REPERITI IN LETTERATURA	120
<u>CAPITOLO 5 LINEE GUIDA PER LA PIANIFICAZIONE DELLE EMERGENZE NELLE GALLERIE.....</u>	<u>123</u>
5.1 ANALISI DELL'INFLUENZA DELLE COMPONENTI DEI SOCCORSI SUL RISCHIO TOTALE	124
5.2 ANALISI DEI RUOLI E DELLE RESPONSABILITÀ DEI DIFFERENTI SOGGETTI COINVOLTI	128
5.3 DEFINIZIONE DELLE COMPONENTI DI UN PIANO E INDIVIDUAZIONE DEL MODELLO DI INTERVENTO.....	131
5.3.1 Descrizione delle caratteristiche della galleria	131
5.3.2 Individuazione degli scenari di incidente	133
5.3.3 Redazione delle procedure di organizzazione dei soccorsi	135
5.4 LINEE GUIDA PER LA REDAZIONE DI PIANI DI EMERGENZA ESTERNA	136
<u>CONCLUSIONI.....</u>	<u>143</u>
RISULTATI ED OBIETTIVI RAGGIUNTI	143
VALUTAZIONE DEI LIMITI E PROSPETTIVE FUTURE DI APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA	144
<u>RINGRAZIAMENTI.....</u>	<u>146</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>147</u>
<u>LEGISLAZIONE</u>	<u>150</u>

Indice delle Figure

Figura 1. 1 Criteri di applicazione dei requisiti minimi.....	14
Figura 1. 2 Ruoli e compiti nella gestione dell'emergenza.....	27
Figura 1. 3 Schema delle attività connesse con la gestione di un'emergenza in seguito ad un incidente ferroviario.....	28
Figura 1. 4 Elenco delle attività assegnate al gestore della rete ferroviaria in caso di emergenza .	28
Figura 2. 1 Rappresentazione grafica del rischio.....	31
Figura 2. 2 Curva di isorischio	32
Figura 2. 3 Aspetti che influenzano la sicurezza nel sistema ferroviario	33
Figura 2. 4 Interazione tra le differenti componenti del sistema ferroviario	33
Figura 2. 5 Schema dei differenti approcci di analisi del rischio	40
Figura 2. 6 Criticità e punti di forza dell'analisi qualitativa.....	40
Figura 2. 7 Criticità e punti di forza dell'analisi quantitativa.....	41
Figura 3. 1 Schema della procedura estesa nel DM 28 ottobre 2005 "sicurezza nelle gallerie ferroviarie" [54].....	45
Figura 3. 2 Diagramma di trazione rappresentativo dell'arresto del convoglio con marcia a vista..	51
Figura 3. 3 Diagramma di trazione rappresentativo dell'arresto del convoglio fermata a bersaglio	54
Figura 3. 4 Rappresentazione comparata dei tempi di arresto con le 2 modalità di fermata in base alla distanza del punto di esodo	55
Figura 3. 5 Rappresentazione dei tempi di arresto con le 2 modalità di fermata ipotizzando un punto di esodo ogni 2000 metri.	57
Figura 3. 6 Andamento della curva di incendio ISO-834 [26].	62
Figura 3. 7 Andamento della curva di incendio HC [26].	63
Figura 3. 8 Andamento della curva di incendio HCM [26].....	64
Figura 3. 9 Andamento della curva di incendio RABT-ZTV [26].....	64
Figura 3. 10 Andamento della curva di incendio RWS [26].....	65
Figura 3. 11 Rappresentazione del modello semplificato di andamento della temperatura per l'incendio con carico di fuoco di 760 MJ di una carrozza ferroviaria	74
Figura 3. 12 Rappresentazione delle fasce di intervento dei soccorsi in caso di incendio.....	77
Figura 3. 13 Rappresentazione del modello semplificato di andamento della temperatura per l'incendio con carico di fuoco di 760 MJ di una carrozza ferroviaria con intervento delle squadre di soccorso.....	81
Figura 3. 14 Velocità in funzione della densità di persone: per densità inferiori a 0,5 pers/m ² la velocità di esodo risulta pari a circa 1,19 m/s; per valori di densità superiori, la velocità decresce linearmente fino ad arrivare al valore nullo [42].	85
Figura 3. 15 Velocità in funzione della densità di fumo: il valore minimo della velocità è pari a 0,3 m/s, nel caso di completa oscurazione del percorso (<i>darkness</i>) e nei casi di visibilità inferiori a 5 m (<i>irritant smoke</i>) o inferiori a 2,3 m (<i>non irritant smoke</i>) [42].....	86
Figura 3. 16 Contributo delle componenti tecnico – strutturali e procedurali nella definizione del rischio globale.....	88
Figura 3. 17 Schema composizione modello integrato di valutazione del rischio Globale.	89
Figura 4. 1 Elenco degli aspetti considerati nel modello integrato suddivisi per tipologia	92
Figura 4. 2 Valori di <i>TR</i> <i>Rilevazione Anomalia</i> in secondi	98
Figura 4. 3 Andamento altimetrico galleria A.....	99

Figura 4. 4 Rappresentazione dell'andamento della temperatura con intervento delle squadre di soccorso per la galleria A	108
Figura 4. 5 Rappresentazione dell'andamento della temperatura con intervento delle squadre di soccorso per la galleria B	109
Figura 4. 6 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria A	114
Figura 4. 7 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria B	114
Figura 4. 8 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria A con scarsa visibilità	115
Figura 4. 9 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria B con scarsa visibilità	116
Figura 4. 10 Rappresentazione del Tempo di Soccorso diviso per le sue componenti	118
Figura 4. 11 Immagine del treno di soccorso in servizio presso la galleria del Lötschberg [fonte BLS Lötschbergbahn]	120
Figura 4. 12 Schema di Sistema di spegnimento automatizzato [fonte Robogat].....	121
Figura 5. 1 Schema riassuntivo della valutazione del rischio in una galleria ferroviaria.....	124
Figura 5. 2 Schema delle azioni di mitigazione delle conseguenze in caso di incendio in galleria	125
Figura 5. 3 Schema riassuntivo delle azioni di governo dell'emergenza conseguenti al verificarsi di un incendio in galleria	126
Figura 5. 4 Schema delle componenti del sistema di gestione delle emergenze in galleria	128
Figura 5. 5 Schema delle azioni di mitigazione delle conseguenze in caso di incendio in galleria	129
Figura 5. 6 Schema dell'influenza delle differenti componenti sulla mitigazione delle conseguenze in caso di incendio in galleria	130
Figura 5. 7 Elenco schematico delle componenti descrizione della galleria	132
Figura 5. 8 Elenco schematico della componente individuazione dello scenario incidentale	134
Figura 5. 9 Elenco schematico della componente modello d'intervento	135
Figura 5. 10 Schema delle fasi di progettazione di una galleria	136
Figura 5. 11 Schema delle componenti tecnico strutturali che influenzano il rischio in galleria	137
Figura 5. 12 Schema delle componenti tecnico procedurali che influenzano il rischio in galleria ..	138
Figura 5. 13 Schema della procedura ricorsiva per la taratura degli elementi utili alla pianificazione di emergenza.....	139
Figura 5. 14 Elementi che influenzano le prestazioni del sistema di soccorsi in caso di incidente in galleria.....	140
Figura 5. 15 Elementi del regolamento di esercizio che regola il transito di un convoglio in galleria che hanno influenza sulla pianificazione di emergenza	141
Figura 5. 16 Elenco schematico dei soggetti e delle azioni che hanno effetto sulla gestione delle emergenze in una galleria	142

Indice delle Tabele

Tabella 1. 1 Requisiti relativi all'infrastruttura	16
Tabella 1. 2 Requisiti relativi al materiale rotabile	17
Tabella 1. 3 Requisiti relativi alle procedure operative	17
Tabella 1. 4 I mezzi di soccorso nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto ..	21
Tabella 1. 5 Il piazzale di emergenza nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto	22
Tabella 1. 6 Il marciapiede nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto	23
Tabella 1. 7 La segnaletica di emergenza nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto	23
Tabella 1. 8 L'arresto nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto	24
Tabella 2. 1 Raccomandazioni di sicurezza per le gallerie ferroviarie secondo il D.M. 28 Ottobre 2005.	42
Tabella 3. 1 Calcolo dei tempi di arresto del convoglio	52
Tabella 3. 2 Calcolo dei tempi di arresto con marcia a vista in base alla distanza	53
Tabella 3. 3 Calcolo dei tempi di arresto con fermata assistita in base alla distanza dai punti di esodo	54
Tabella 3. 4 Valutazione delle differenze nei tempi di arresto con le 2 modalità di fermata in base alla distanza dal punto di esodo	56
Tabella 3. 5 Coordinate dei punti che definiscono la curva di incendio RWS	65
Tabella 3. 6 Espressioni del modello Probit che fornisce le probabilità di danno biologico in funzione della quantità di energia assorbita, calcolata come il prodotto tra l'irraggiamento Q [W/m^2] e il tempo di esposizione t [s]	69
Tabella 4. 1 Risultati calcolo frequenza incendio per le 2 gallerie	97
Tabella 4. 2 progressiva dei punti di esodo per la galleria A	100
Tabella 4. 3 Tempi di arresto del convoglio per le due gallerie in esame	101
Tabella 4. 4 Risultati del calcolo del tempo di evacuazione nelle gallerie in esame	105
Tabella 4. 5 Tempi di marcia dei passeggeri presenti in galleria	105
Tabella 4. 6 Tempi di marcia dei passeggeri presenti in galleria con convoglio fermo a centro galleria	106
Tabella 4. 7 Valutazione conseguenze galleria A con scarsa visibilità	111
Tabella 4. 8 Valutazione conseguenze galleria B con scarsa visibilità	111
Tabella 4. 9 Valutazione conseguenze galleria conforme alla direttiva con scarsa visibilità	112

Introduzione

Inquadramento della ricerca: tema, scopo, obiettivi

La conoscenza del rischio associato alle differenti modalità di trasporto permette un utilizzo razionale delle risorse necessarie per aumentare il livello di sicurezza associato alla movimentazione di persone e cose. Per fare ciò è necessario individuare metodologie che permettano di ottenere misure di rischio tra loro confrontabili per differenti modalità di trasporto e per le diverse parti della rete stradale o ferroviaria. All'interno della rete dei trasporti le gallerie, per le particolari caratteristiche che le contraddistinguono dal resto della rete, sono infrastrutture che necessitano di un approccio differente e di studi particolareggiati per riuscire a valutarne il livello di sicurezza. Per rispondere alla crescente domanda di mobilità, in numerosi casi si è fatto ricorso alla realizzazione di gallerie per superare gli ostacoli limitando la tortuosità dei tracciati. In particolare le caratteristiche geomorfologiche del territorio italiano rendono molto difficoltoso garantire la mobilità tra differenti aree del territorio e per questo motivo l'Italia risulta il primo stato europeo per numero ed estensione di gallerie stradali e ferroviarie.

Il Parlamento Europeo ha emanato alcune direttive in merito (es: 2004/54/CE, per gallerie stradali della rete Transeuropea - specifica tecnica di interoperabilità concernente la «sicurezza nelle gallerie ferroviarie nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità») e il parlamento italiano ha emanato specifici provvedimenti legislativi (D.Lgs n° 264 del 5/10/2006, per gallerie stradali della rete Transeuropea e D.Min. del 28/10/2005 "Sicurezza delle Gallerie Ferroviarie") che regolamentano i requisiti minimi relativi alla progettazione della sicurezza all'interno delle gallerie. In particolare, queste direttive delineano un nuovo approccio che considera la sicurezza non limitandosi all'imposizione di semplici requisiti minimi alle dotazioni strutturali e impiantistiche, ma suggerendo l'applicazione di procedure di analisi del rischio. Il passaggio da un approccio normativo prescrittivo a uno prestazionale ha evidenziato l'importanza di individuare una metodologia uniforme e trasparente di valutazione del rischio all'interno di una galleria e di stima dell'effetto su di esso di tutte le possibili azioni di carattere strutturale tecnico e organizzativo che possono essere adottate per la mitigazione del rischio. A livello nazionale e comunitario emerge chiaramente come metodologia più diffusamente

applicata si basa sull'applicazione di metodi probabilistici consolidati per la valutazione del rischio di sistemi complessi.

La mitigazione del rischio all'interno delle gallerie ferroviarie è una materia che abbraccia differenti discipline. In particolare per garantire un livello di sicurezza accettabile è necessaria la messa in opera della giusta unione di interventi infrastrutturali, tecnologici e procedurali. La valutazione dell'efficacia di qualsiasi intervento è subordinata all'individuazione di una chiara e trasparente metodologia di valutazione del rischio.

Se la metodologia utilizzata per la rappresentazione del rischio all'interno delle gallerie è definita e applicata in modo uniforme all'interno della Comunità Europea, non altrettanto si può dire su come le iniziative di mitigazione del rischio, in particolar modo quelle connesse alle attività di soccorso successive a un incidente, possono influire sul rischio complessivo associato al transito nelle gallerie ferroviarie.

Attività di ricerca, individuazione delle competenze e delle criticità

Dalle considerazioni sopra esposte appare chiaro che è necessario individuare una metodologia che permetta di considerare anche elementi relativi alla gestione delle emergenze in modo coerente con le tecniche attualmente in uso per la valutazione del rischio globale associato al transito all'interno di una galleria ferroviaria.

Per fare ciò sono state approfondite le seguenti tematiche:

- Individuazione dei principi generali di regolazione dell'esercizio ferroviario in galleria a livello nazionale ed Europeo, evidenziando le prescrizioni, le indicazioni e le raccomandazioni, nonché la suddivisione delle competenze e delle responsabilità relative alla sicurezza in galleria;
- Analisi delle differenti Metodologie di stima del rischio, individuando quelle utilizzate o raccomandate nei differenti paesi europei;
- Ricognizione delle metodologie procedurali o tecniche utilizzabili per il contenimento della pericolosità connessa al transito in gallerie ferroviarie (regolazione circolazione, dotazioni di sicurezza presenti sul veicolo e sull'infrastruttura);
- Ricognizione delle metodologie procedurali o tecniche utilizzabili per il contenimento delle conseguenze derivanti da un incidente o malfunzionamento

connesso al transito in gallerie ferroviarie. In questa categoria devono essere considerate con attenzione le procedure di soccorso, l'evacuazione della popolazione presente in galleria in caso di emergenza e l'autosalvataggio.

Proposta di una metodologia integrata di analisi e verifica su un caso concreto

Tale lavoro ha portato alla costruzione di un modello di valutazione del rischio globale, costituito da 7 differenti sottomodelli. In particolare, oltre ad alcuni metodi di stima della pericolosità e delle conseguenze di un incendio reperiti in letteratura, sono stati analizzati e sviluppati sottomodelli innovativi che permettono di valutare l'incidenza di aspetti connessi con la gestione delle emergenze. Il modello globale dovrebbe permettere di stimare infatti i tempi relativi alle fasi connesse con l'evento incidentale secondo i seguenti parametri:

- tempo di rilevazione anomalia;
- tempo di arresto convoglio in emergenza;
- tempo di attivazione delle procedure di auto salvataggio;
- tempo di evacuazione.

Il modello permette inoltre di poter valutare l'effetto sull'evoluzione dello scenario di rischio dell'intervento delle squadre di soccorso. I sottomodelli, combinati insieme, permettono di valutare il tempo di messa in sicurezza delle persone presenti in galleria e di stimare le conseguenze in termini di perdite di vite umane.

La combinazione dei modelli sopraelencati permette quindi di valutare il rischio globale associato al transito di convogli in gallerie ferroviarie. Il modello sviluppato è stato testato su due gallerie reali, differenti per tipologia di linea ferroviaria che le interessa, dotazioni di sicurezza, lunghezza e traffico ferroviario. Tali applicazioni hanno permesso di valutare l'incidenza di differenti aspetti sul rischio globale e di individuare le interdipendenze tra le differenti componenti che concorrono nella mitigazione del rischio in una galleria. In questo modo è possibile individuare elementi utili alla redazione di Piani di Emergenza, esplicitando le componenti essenziali di un piano e individuando i soggetti e gli elementi che hanno influenza su di esso. L'applicazione ricorsiva del modello permette inoltre di individuare la combinazione di elementi tecnico / infrastrutturali e procedurali che permettono la minimizzazione del rischio in una galleria.

Da esperienze acquisite in qualità di funzionario, lavorando nell'ambito della gestione della mobilità e sicurezza dei trasporti presso il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri è emerso come la Pianificazione di emergenza delle gallerie ferroviarie sia un argomento non ancora totalmente definito che vede applicazioni non omogenee sul territorio e poca chiarezza circa il campo di applicazione e gli attori chiamati a partecipare alla redazione di tale documento. Il presente lavoro di tesi ha quindi fissato come obiettivo quello di fornire un supporto alla redazione di tali piani coniugando aspetti scientifici caratteristici dell'analisi del rischio con aspetti tecnico procedurali tipici della gestione delle emergenze e della pianificazione di Protezione Civile favorendo, in questo modo, la valutazione del rischio associato a una galleria nella sua globalità.

Capitolo 1

Leggi e regolamenti per la gestione delle emergenze in galleria

Il presente capitolo descrive le leggi, i regolamenti e le direttive che normano la circolazione, la sicurezza e la gestione delle emergenze nelle gallerie ferroviarie. Nel capitolo viene svolta un'analisi critica dell'apparato regolamentare individuando compiti e responsabilità in caso di emergenza.

Nel capitolo vengono quindi descritti:

- Leggi e regolamenti per la regolamentazione del transito all'interno di gallerie ferroviarie;
- Il regolamento di esercizio ferroviario;
- Indirizzi operativi per la gestione delle emergenze in ambito ferroviario.

1.1 Leggi e regolamenti per la regolamentazione del transito all'interno di gallerie ferroviarie

Nel presente paragrafo vengono esaminate le principali norme in vigore che regolamentano la sicurezza all'interno delle gallerie ferroviarie a livello nazionale ed europeo.

1.1.1 D.M. 28 ottobre 2005 “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie” [54]

Il decreto ha lo scopo di assicurare un livello adeguato di sicurezza nelle gallerie ferroviarie, mediante l'adozione di misure di prevenzione e protezione atte alla riduzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria, nonché mirate alla limitazione delle conseguenze in caso di incidente.

Il decreto si applica a tutte le gallerie ferroviarie di lunghezza superiore a 1000 m, in esercizio, in fase di costruzione o di progettazione, ubicate sull'infrastruttura ferroviaria e sulle reti regionali non isolate, allo scopo di assicurare un livello adeguato di sicurezza nelle gallerie ferroviarie, mediante l'adozione di misure di prevenzione e protezione. Vengono fornite prescrizioni (requisiti minimi ridotti) anche per gallerie con lunghezza compresa tra 500 e 1000 m.

Il gestore dell'infrastruttura, tramite le figure del Responsabile di Galleria e del Responsabile della Sicurezza, deve curare il rispetto delle norme e delle procedure riguardanti la sicurezza della galleria e provvede alla approvazione dei progetti e alla messa in esercizio della galleria; in particolare deve approntare la documentazione di sicurezza e effettuare le ispezioni periodiche, deve elaborare e attuare gli schemi organizzativi e operativi per i propri servizi di pronto intervento, nonché formare ed equipaggiare adeguatamente il personale.

Dovrà inoltre definire le procedure per la chiusura immediata di una galleria in caso di emergenza e svolgere le inchieste per ogni episodio che abbia compromesso la sicurezza della galleria, comunicandone l'esito al Ministero.

Il decreto ha quindi individuato una serie di requisiti minimi che garantiscono un livello accettabile di sicurezza, essi vengono divisi in requisiti ridotti e non, in base alla tipologia di galleria e al volume di traffico. Nel caso non fossero rispettati i requisiti minimi e fosse necessario l'introduzione di altri sistemi contenuti tra quelli integrativi (economicamente meno impattanti o tecnicamente adottabili a differenza dei requisiti

minimi di base), è necessaria un'analisi del rischio (regolamentata dal decreto stesso) che dimostri come l'introduzione di misure integrative riportano il rischio ad essere equivalente o minore a quello della galleria in esame rispettante dei requisiti minimi di base.

Nel seguente schema (Figura 1. 1) vengono illustrate i criteri di applicazione dei requisiti minimi:

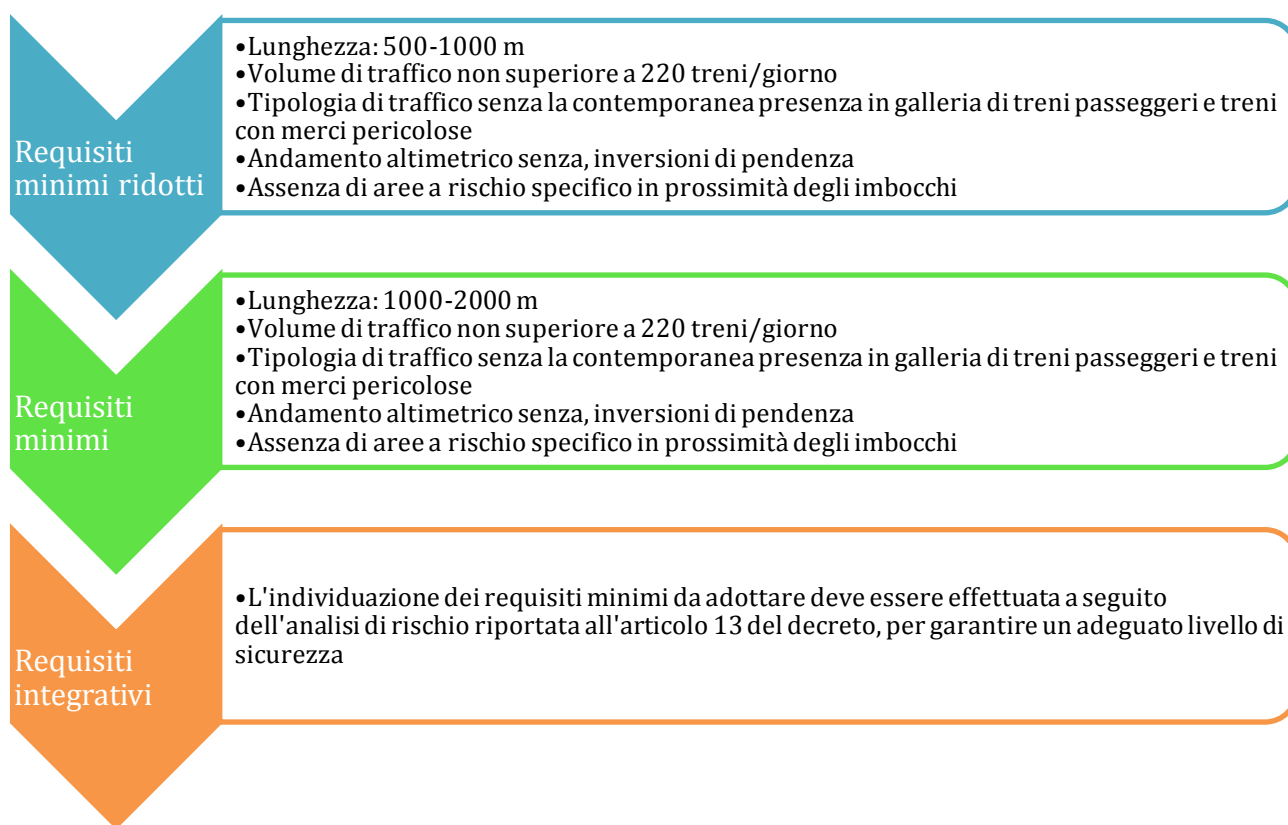


Figura 1. 1 Criteri di applicazione dei requisiti minimi

In altre parole, il rispetto dei requisiti minimi costituisce condizione sufficiente a garantire un adeguato livello di sicurezza. Per tali gallerie non è richiesta una specifica analisi di rischio. Qualora la galleria non fosse conforme ai requisiti minimi ad essa assegnati attraverso un'analisi del rischio deve essere dimostrato che, con l'applicazione di misure mitigazione del rischio contenute nei requisiti alternativi, si riporta il livello di sicurezza ad essere uguale o maggiore di quello che avrebbe la medesima galleria qualora rispettasse i requisiti minimi.

Le tabelle sottostanti riassumono i requisiti minimi relativi a infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative.

I requisiti minimi relativi all'infrastruttura si propongono gli obiettivi di prevenzione degli incidenti, di mitigazione delle conseguenze degli stessi, della facilitazione dell'esodo e di facilitazione del soccorso.

Tabella 1. 1 Requisiti relativi all'infrastruttura

INFRASTRUTTURA		
Requisiti minimi ridotti	Requisiti minimi	Requisiti integrativi
<ul style="list-style-type: none"> • Limitazione deviatoi in galleria • Controllo sistematico dello stato del binario • Ispezione regolare dello stato della galleria • Piano manutenzione galleria • Marciapiede • Segnaletica di emergenza • Illuminazione di emergenza nella galleria 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema di radiocomunicazione • Limitazione deviatoi in galleria • Controllo sistematico dello stato del binario • Protezione e controllo accessi • Ispezione regolare dello stato della galleria • Piano manutenzione galleria • Resistenza e reazione al fuoco • Affidabilità delle installazioni elettriche • Impianto idrico antincendio • Marciapiede • Corrimano • Segnaletica di emergenza • Illuminazione di emergenza nella galleria • Uscite/accessi • Realizzazione uscite/accessi • Sistema di controllo fumi nelle vie di esodo • Impianto telefonico di emergenza (viva/voce) e di diffusione sonora • Piazzale di emergenza • Area di triage • Piazzole per l'elisoccorso • Strade di accesso • Impianto di radiopropagazione in galleria per le operazioni di soccorso • Disponibilità di energia elettrica per le squadre di soccorso • Postazioni di controllo • Sezionamento linea di contatto • Sistema, di interruzione e messa a terra della linea di contatto 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoraggio della velocità/sistema di segnalamento • Individuazione del treno (conta assi, circuito binario) • Impianti fissi per il controllo dello stato del treno • Indipendenza dei binari in galleria • Requisiti di resistenza e reazione al fuoco (Cavi elettrici) • Uscite/accessi • Sezione collegamenti trasversali • Rivelazione di incendio, fumo e gas nei locali tecnici • Sistema di controllo a distanza TVCC • Sistemi di estinzione incendio • Sistemi di estrazione fumi/sistema di ventilazione • Nicchie • Galleria parallela di servizio e di sicurezza • Accessibilità per veicoli stradali • Veicoli di soccorso

Il materiale rotabile autorizzato alla circolazione all'interno delle gallerie deve essere conforme alle normative di sicurezza antincendio secondo quanto previsto dalle Norme

Tecniche Europee, in vigore attualmente. Gli obiettivi prefissi dai requisiti minimi sono la prevenzione e mitigazione incidenti e la facilitazione dell'esodo.

Tabella 1. 2 Requisiti relativi al materiale rotabile

MATERIALE ROTABILE		
Requisiti minimi ridotti	Requisiti minimi	Requisiti integrativi
	<ul style="list-style-type: none"> • Misure di protezione dal fuoco (materiali di motrici e carrozze) • Rilevatori di incendio di bordo (motrici, carrozze notte, ristorante e passeggeri) • Dispositivi manuali di allarme • Neutralizzazione freno di emergenza • Mantenimento della capacità di movimento • Estintori portatili a bordo • Impianti fissi di estinzione • Comando centralizzato spegnimento aria condizionamento • Illuminazione d'emergenza • Equipaggiamento di primo soccorso a bordo • Dimensionamento per l'esodo • Arresto per emergenza 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipaggiamento delle carrozze per facilitare l'esodo dei passeggeri e l'accesso delle squadre di soccorso

Tabella 1. 3 Requisiti relativi alle procedure operative

PROCEDURE OPERATIVE		
Requisiti minimi ridotti	Requisiti minimi	Requisiti integrativi
	<ul style="list-style-type: none"> • Formazione del personale • Informazioni di sicurezza e istruzioni sul comportamento in caso di emergenza • Piani di emergenza e soccorso • Esercitazioni periodiche con le squadre di soccorso • Mezzi di soccorso (mezzo bimodale) • Informazioni sul trasporto di merci pericolose • Disponibilità attrezzature di soccorso 	<ul style="list-style-type: none"> • Orario/programma di esercizio (specialmente treni passeggeri/treni merci pericolose) • Regolamenti per il trasporto di merci pericolose

Misure in merito all'esercizio

Occorre provvedere, per tutte le gallerie oggetto della direttiva, alla redazione di piani di intervento in caso di emergenza.

In caso di incidente grave, tutte le canne della galleria devono essere chiuse. Il tempo di intervento dei servizi di emergenza deve essere il più breve possibile e misurato in occasione delle esercitazioni periodiche.

Per tutte le gallerie, comprese quelle transfrontaliere, un unico centro deve avere sempre il controllo della situazione.

Campagne di informazione

E' necessario organizzare campagne di informazione riguardanti la sicurezza nelle gallerie, compito di queste è pubblicizzare il comportamento corretto che gli utenti devono adottare durante il transito in galleria, con particolare riferimento alle procedure di auto salvataggio in caso di abbandono del convoglio in emergenza.

Piani di emergenza

Il Decreto stabilisce inoltre che per le gallerie devono essere redatti piani di emergenza esterni, limitandosi per le competenze a citare la responsabilità degli enti territoriali, senza per esempio definire nel dettaglio le competenze delle Prefetture-UTG (responsabili dell'attivazione delle componenti statali nel soccorso) e le Provincie (individuate dal D.lgs 31 marzo 1998 n. 112, art. 108 comma 1, lettera -b, come ente di riferimento per la pianificazione delle emergenze per il territorio di competenza).

(Borghetti, Gandini 2012 [9]).

1.1.2 Direttiva 2008/163/CE specifica tecnica di interoperabilità (STI) [57]

La Specifica Tecnica di Interoperabilità (STI) relativa alla “Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie” (SRT) ha rappresentato la conferma - dopo il D.M. del 2005 di cui sopra - dell'introduzione in Italia del criterio prestazionale nell'ambito della sicurezza ferroviaria con particolare riferimento alle prestazioni di sicurezza dei tunnel. La STI costituisce un regolamento obbligatorio per tutti gli Stati della UE. La STI è pienamente applicabile al sistema ferroviario transeuropeo convenzionale quale definito nell'allegato I della direttiva 2001/16/CE e al sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità quale definito nell'allegato I della direttiva 96/48/CE.

La specifica tecnica individua i requisiti di sicurezza minimi indispensabili per l'armonizzazione su scala europea delle condizioni di sicurezza in galleria. Lo scopo ultimo è quindi quello di rendere possibile l'interoperabilità, la libera circolazione dei treni e l'offerta ai passeggeri di una strategia simile in materia di sicurezza nelle gallerie ferroviarie del sistema ferroviario transeuropeo.

La STI SRT si applica a sottosistemi nuovi, rinnovati e ristrutturati. Essa riguarda in particolare i seguenti sottosistemi:

- **Infrastruttura** Gli aspetti fondamentali dell'infrastruttura normati dalle specifiche riguardano: l'installazione minima di deviatori ed incroci; la presenza di dispositivi di sicurezza che impediscano l'accesso non autorizzato alle uscite di emergenza e ai locali tecnici; la resistenza al fuoco; la presenza di rilevatori di incendio; la dotazione di strutture per l'autosoccorso, l'evacuazione, l'intervento ed il soccorso all'esterno, e di uscite di emergenza; la presenza di collegamenti tra le canne; le caratteristiche dei marciapiedi, dell'impianto di illuminazione di emergenza e della segnaletica di emergenza; la presenza e continuità del sistema di comunicazione; e l'adeguata fornitura idrica.
- **Energia** Gli aspetti fondamentali del sottosistema energia di cui occorre valutare la conformità alle specifiche tecniche riguardano: la periodicità del sezionamento della linea aerea o della rotaia conduttrice, la predisposizione e sistemazione dei dispositivi di messa a terra, la adeguatezza dell'alimentazione elettrica alle attrezzature delle squadre di soccorso, la resistenza ad incendio di cavi elettrici e delle installazioni elettriche.

- **Controllo-comando e segnalamento** Devono essere previsti rilevatori a terra, o preventivi sulla rete, di boccole calde, in modo da aumentare la possibilità di bloccare il treno difettoso prima che entri in galleria.
- **Esercizio** Le regole di esercizio specifiche per la sicurezza nelle gallerie dei sottosistemi interessati dalla STI, alla luce dei requisiti essenziali sopra riportati, riguardano: la definizione delle tempistiche del controllo e del soggetto controllore dello stato dei treni; le norme di emergenza; i contenuti dei piani di emergenza in galleria e le modalità delle esercitazioni; le procedure di isolamento e messa a terra; le informazioni da fornire ai passeggeri in materia di sicurezza sul treno e comportamento in caso di emergenza e il coordinamento fra centri di controllo della galleria.
- **Materiale rotabile** Le specifiche a riguardo contemplano in particolar modo la resistenza dei materiali in caso di incendio, sia nel caso di trasporto passeggeri che di trasporto merci, nonché la presenza di estintori, schermi parafuoco, rilevatori di incendio e dispositivi di comunicazione, le misure per garantire il movimento di un treno con incendio a bordo, il sistema di illuminazione e il sistema di esodo dei passeggeri.

Salvo indicazione contraria, tutte le specifiche contenute si applicano alle gallerie di lunghezza superiore ad 1 km.

Le gallerie di lunghezza superiore a 20 km richiedono un'indagine di sicurezza speciale che può portare alla specifica di misure di sicurezza supplementari - non incluse nella STI SRT- allo scopo di ammettere treni interoperabili (treni conformi alle pertinenti STI) in un ambiente accettabile dal punto di vista della sicurezza antincendio.

In particolare la direttiva individua negli scenari «caldi» ovvero incendio, esplosione seguita da incendio, emissione di fumo o gas tossici. Per questi eventi prescrive che, quando ciò sia possibile il treno deve lasciare la galleria. Se il treno si ferma, i passeggeri vengono evacuati sotto la direzione del personale viaggiante, o si dirigono da soli (auto soccorso), verso un'area di sicurezza. Per ognuno degli scenari, nella STI SRT è indicato quale debba essere il ruolo delle squadre di soccorso, fermo restando che la priorità debba essere la protezione delle vite umane e non dei beni materiali infrastrutturali (Borghetti, Gandini 2012 [9]).

1.1.3 Principali aspetti riguardanti la gestione delle emergenze nelle 2 direttive esaminate

Si riportano di seguito i principali aspetti incidenti sulla gestione delle emergenze nelle gallerie ferroviarie evidenziando le differenze tra le due normative.

Tabella 1. 4 I mezzi di soccorso nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto

Mezzi di soccorso	
STI	DM
<p>Mezzi utilizzati in caso di incidente in galleria al fine di agevolare l'esodo dei passeggeri e l'intervento delle squadre di soccorso. Possono essere dei seguenti tipi:</p> <p>a) <u>carrelli ferroviari</u>, ovvero mezzi per il personale FS, con i quali si può accedere in galleria dagli imbocchi, utilizzati come mezzi ausiliari di trasporto di feriti, materiale pesante, età;</p> <p>b) <u>mezzi ordinari</u>, ovvero automezzi gommati normalmente in uso alle squadre di soccorso per gli interventi di emergenza. Se la galleria è resa carrabile dalla realizzazione di un armamento su piastre di calcestruzzo anziché su ballast, tali mezzi possono essere usati per accedere alla galleria;</p> <p>c) <u>treno di soccorso</u>, che svolge la funzione di soccorso tecnico per la messa in sicurezza delle persone e della infrastruttura attraverso la mitigazione degli effetti dell'incidente e la prima assistenza sanitaria agli eventuali feriti. Trasporta una squadra composta da personale ferroviario e antincendio e le attrezzature antincendio. Sosta normalmente su di un binario dedicato, in un posto di movimento (PM) o nella stazione più vicina alla galleria;</p> <p>d) <u>treno di evacuazione</u>, che deve poter intervenire durante l'esercizio della galleria ed avere la possibilità di evacuare tutte le persone del treno incidentato. Sosta normalmente su binario dedicato, in un PM o nella stazione più vicina alla galleria</p>	<p>Le squadre di soccorso devono poter entrare nella galleria in caso di incidente, attraverso i portali della galleria e/o uscite di emergenza appropriate. Tali vie di accesso devono essere larghe almeno 2,25 m e alte almeno 2,25 m. Il gestore dell'infrastruttura descrive nel piano di emergenza le strutture dedicate come vie di accesso.</p> <p>Se il piano di emergenza impone l'accessibilità stradale, essa deve essere il più vicino possibile all'area di sicurezza prevista. Le possibilità di accesso alternative devono essere descritte nel piano di emergenza.</p>

Tabella 1. 5 Il piazzale di emergenza nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto

Piazzale di emergenza	
STI	DM
<p>Per le gallerie di lunghezza superiore a 5000 m, deve essere previsto almeno un piazzale di emergenza, posizionato in prossimità degli imbocchi, che deve costituire uno spazio adeguato per la sosta degli automezzi di soccorso e per l'impiego delle attrezzature necessarie all'emergenza. Dal piazzale di emergenza deve essere possibile accedere alla sede ferroviaria attraverso la realizzazione di un piano a raso che consenta il posizionamento del mezzo bimodale sul binario e l'attraversamento dei binari da parte di mezzi gommati. La superficie del piazzale deve essere almeno pari a 500 mq, riducibile a 300 mq per le gallerie in costruzione e in esercizio. Il piazzale deve risultare opportunamente collegato con la viabilità stradale ordinaria di zona. Dovrà essere dotato di illuminazione. Per gallerie di lunghezza superiore a 5.000 m deve essere prevista una postazione per il comando, il controllo, la diagnostica e manutenzione delle predisposizioni di sicurezza. Dalla postazione di controllo sono gestiti gli impianti sia durante le normali fasi di esercizio, sia in presenza di una emergenza. Una postazione di controllo può gestire più gallerie.</p> <p><u>Area di triage</u> Per le gallerie di lunghezza superiore a 5000 m, deve essere individuata in prossimità della galleria almeno un'area destinata al primo soccorso ed allo smistamento delle persone coinvolte in un eventuale incidente, che potrà essere utilizzata anche per diversi scopi a condizione che risulti sempre sgombra da attrezzature (campo sportivo, area pic-nic, ecc).</p> <p><u>Piazzole per l'elisoccorso</u> Per le gallerie, di lunghezza superiore a 5.000 m deve essere prevista una elisuperficie, in prossimità dei piazzali di emergenza.</p> <p><u>Strade di accesso</u> Per le gallerie in cui non sia previsto il piazzale di emergenza, dovrà essere previsto un collegamento viario percorribile da mezzi di soccorso tra almeno uno dei due imbocchi (o degli accessi/uscite intermedi, se presenti) e la viabilità stradale ordinaria di zona.</p>	<p>Devono essere previste aree di soccorso di almeno 500 mq. in prossimità della galleria vicino alle vie di accesso. Le strade esistenti possono essere considerate aree di soccorso. Se l'accesso dalla strada non è ragionevolmente praticabile, devono essere previste soluzioni alternative in consultazione con le squadre di soccorso.</p>

Tabella 1. 6 Il marciapiede nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto

Marciapiede	
STI	DM
<p>Lungo le gallerie devono essere realizzati marciapiedi per assicurare un rapido e sicuro esodo delle persone.</p> <p>Nelle gallerie a doppio binario detti marciapiedi saranno previsti su entrambi i lati della galleria, mentre nelle gallerie a singolo binario potranno essere realizzati da un solo lato.</p> <p>Per le gallerie di lunghezza superiore a 2000 m la larghezza dei marciapiedi non deve essere inferiore a 90 cm singolarmente, per le gallerie in progettazione, o complessivamente, per le gallerie in esercizio o costruzione, tenendo conto di camminamenti funzionalmente equivalenti, percorribili in assenza di circolazione ferroviaria, o anche con l'impiego di armamento senza ballast.</p> <p>Per le gallerie di lunghezza inferiore tale larghezza non potrà in ogni caso essere minore di 50 cm.</p>	<p>La presente specifica si applica a tutte le gallerie di lunghezza superiore a 500 m.</p> <p>Nelle gallerie a singolo binario i marciapiedi per consentire l'esodo devono essere previsti su almeno un lato del binario e nelle gallerie a doppio binario devono essere realizzati su entrambi i lati della galleria. Nelle gallerie più larghe con più di due binari deve essere possibile accedere al marciapiede a partire da ogni binario.</p> <p>La larghezza del marciapiede non deve essere inferiore a 75 centimetri, mentre lo spazio libero minimo al di sopra del marciapiede deve essere di 2,25 m.</p> <p>Il livello minimo del marciapiede non deve essere inferiore al piano del ferro.</p> <p>Devono essere evitati restringimenti puntuali dovuti a ostacoli nell'area di esodo. La presenza di ostacoli non deve ridurre la larghezza minima a meno di 70 centimetri e la lunghezza dell'ostacolo non deve superare i 2 m.</p>

Tabella 1. 7 La segnaletica di emergenza nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto

Segnaletica di emergenza	
STI	DM
<p>Al fine di favorire l'autosoccorso, per agevolare l'esodo e per consentire l'individuazione delle predisposizioni di emergenza presenti nella galleria, devono essere previsti appositi cartelli tali da fornire informazioni visive di immediata e chiara interpretazione.</p> <p>In particolare devono essere posizionati lungo la galleria, almeno ogni 100 m, cartelli di tipo riflettente o luminescente che indichino la distanza e la direzione delle uscite più vicine. I cartelli devono essere resi visibili attraverso una opportuna illuminazione.</p>	<p>La presente specifica si applica a tutte le gallerie di lunghezza superiore a 100 m.</p> <p>La Segnaletica d'emergenza indica le uscite di emergenza, la distanza e la direzione verso un'area sicura. La segnaletica deve essere progettata secondo i requisiti della direttiva 92/58/CEE del Consiglio, del 24 giugno 1992, recante le prescrizioni minime per la segnaletica di sicurezza e/o di salute sul luogo di lavoro e la norma ISO 3864-1.</p> <p>La Segnaletica d'emergenza deve essere installata sulle pareti laterali. La distanza massima fra i pannelli segnaletici per l'esodo è di 50 m.</p> <p>Nella galleria devono essere previsti pannelli indicatori della localizzazione delle attrezzature di emergenza, quando esse sono disponibili.</p>

Tabella 1. 8 L'arresto nella gestione dell'emergenza nelle due normative a confronto

Arresto in emergenza	
STI	DM
<p>In presenza di un'emergenza con incendio a bordo in una galleria, i treni, compatibilmente con il sistema di distanziamento per essi previsto, verranno arrestati all'esterno della galleria, o nel caso di gallerie di rilevante lunghezza, in punti opportunamente individuati per favorire l'eventuale esodo. In presenza di un'emergenza i treni eventualmente presenti sulla linea dovranno essere arrestati prima del loro ingresso nella galleria stessa e i treni presenti fatti uscire eventualmente riducendo opportunamente la velocità. I treni accodati a quello incidentato devono essere fermati il prima possibile.</p>	<p>Le regole di esercizio del gestore dell'infrastruttura adottano e sviluppano in modo più dettagliato, se necessario, il principio che, in caso di incidente (tranne che in un deragliamento, che esige l'arresto immediato del treno) il treno verrà fermato prima di entrare in una galleria o portato fuori da una galleria. Nelle gallerie con stazioni sotterranee, il treno può essere evacuato presso un marciapiede sotterraneo. Le procedure per una situazione di questo tipo vengono sviluppate dal gestore dell'infrastruttura e dall'impresa ferroviaria e specificate nel piano di emergenza. In ogni caso, il gestore dell'infrastruttura deve essere immediatamente informato dal personale di bordo e a nessun altro treno viene consentito di entrare nella galleria</p>

1.2 Il regolamento di esercizio ferroviario

La regolazione della circolazione ferroviaria consiste essenzialmente nella disciplina delle operazioni necessarie per permettere la marcia dei treni, al fine di garantire rigorosamente la sicurezza dell'esercizio e, in subordine, di assicurare all'utenza la migliore regolarità del servizio offerto.

Queste esigenze primarie determinano la formazione di un'organizzazione molto complessa nella quale siano definite con precisione le mansioni del personale addetto ai posti fissi e alla condotta dei convogli, in relazione alle caratteristiche tecniche degli impianti e nelle diverse condizioni di esercizio.

In particolare il regolamento comporta la definizione di un programma di esercizio di base sul quale si regola la circolazione con gli speciali vincoli in base alle caratteristiche tecniche delle linee e del materiale rotabile. L'attuazione del programma di esercizio comporta l'impiego di attrezzature tecnologiche e la definizione di norme di esercizio tali che ciascun treno, in qualunque circostanza, circoli in linea e nelle stazioni sui binari assegnatigli senza incontrare ostacoli imprevisti.

Il regolamento di esercizio stabilisce le differenti competenze dei diversi soggetti chiamati ad operare per garantire l'erogazione del servizio ferroviario e la sicurezza dei passeggeri, in particolare si definiscono le seguenti figure:

- dirigenza locale;
- dirigenza unica;
- dirigenza centrale di coordinamento;
- dirigenza centrale operativa.

La dirigenza centrale operativa permette di realizzare il Controllo del Traffico Centralizzato (CTC). Questo sistema presuppone che la linea sia regolata con un regime di blocco automatico e che gli impianti delle stazioni siano manovrati da apparati centrali a itinerari.

Per quanto riguarda la gestione delle emergenze in galleria va sottolineato che, nel caso la galleria fosse dotata di sistema di fermata a bersaglio solamente in alcuni dei suoi punti d'esodo, il regolamento d'esercizio non norma l'arresto del treno, non specificando se fermarsi al più vicino punto d'esodo (anche se non assistito) o se proseguire la corsa fino al primo luogo sicuro dotato di fermata a bersaglio.

1.3 Indirizzi operativi per la gestione delle emergenze in ambito ferroviario

Con lo scopo di garantire il coordinamento delle iniziative e delle misure finalizzate a disciplinare gli interventi di soccorso e di assistenza alla popolazione in occasione di incidenti stradali, ferroviari, aerei ed in mare, di esplosioni e crolli di strutture e di incidenti con presenza di sostanze pericolose è stata emanata la direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 6 aprile 2006, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 87 del 13 aprile 2006 [55], che incarica il Capo del Dipartimento della Protezione Civile di fornire alle differenti componenti e strutture operative le indicazioni necessarie a garantire il coordinamento operativo, attraverso:

- adeguato flusso di informazioni tra le sale operative territoriali e centrali;
- individuazione delle attività prioritarie da porre in essere per ciascuna componente;
- assegnazione delle funzioni relative alla prima assistenza alla popolazione ed alla diffusione delle informazioni.

In particolare sono stati indicati i seguenti eventi:

1. incidenti ferroviari con convogli passeggeri - Esplosioni o crolli di strutture con coinvolgimento di persone - Incidenti stradali che coinvolgono un gran numero di persone;
2. incidenti in mare che coinvolgono un gran numero di persone;
3. incidenti aerei;
4. incidenti con presenza di sostanze pericolose.

Come previsto, il Capo del Dipartimento della Protezione civile emana le indicazioni per il coordinamento operativo delle emergenze dovute ad incidenti stradali, ferroviari, aerei ed in mare, ad esplosioni e crolli di strutture e ad incidenti con presenza di sostanze pericolose, indirizzate alle componenti e alle strutture operative del Servizio nazionale della protezione civile (Direttiva del 2 maggio 2006: Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 101 del 3 maggio 2006) [56].

Per ogni tipologia di emergenza esiste una componente procedurale comune che prevede le seguenti azioni:



Figura 1. 2 Ruoli e compiti nella gestione dell'emergenza

Particolarmente importante in termini di gestione dei soccorsi in seguito a un incidente ferroviario è la suddivisione dei compiti tra le differenti componenti del sistema dei soccorsi e in particolare l'attribuzione del ruolo di coordinatore dell'intervento sul posto al Comandante del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco al quale è assegnato il compito di Direttore Tecnico dei Soccorsi.

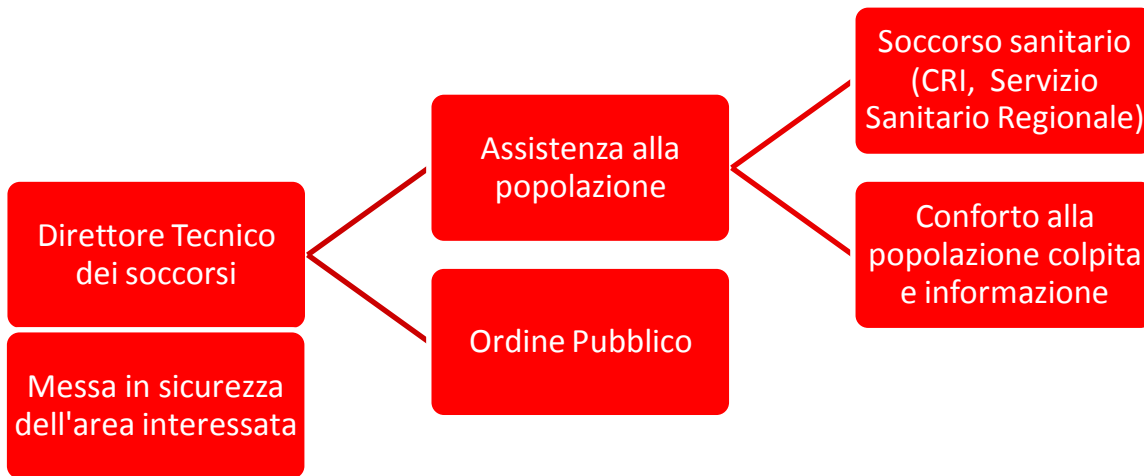


Figura 1. 3 Schema delle attività connesse con la gestione di un'emergenza in seguito ad un incidente ferroviario

La direttiva individua anche i compiti del sistema ferroviario in emergenza. Alla rilevazione di un'anomalia o emergenza devono seguire le seguenti azioni:

Comunica alla Sala Operativa del Gestore Ferroviario l'emergenza in atto

Attiva le procedure interne di gestione dell'emergenza

Comunica le seguenti informazioni ai soggetti responsabili del soccorso tecnico urgente (comando VVF), soccorso sanitario (sala operativa 118) e ordine pubblico (forze di Polizia):

1 Luogo dell'incidente

2 Numero di treni e popolazione coinvolta

3 Modalità d'accesso al luogo dell'incidente

Figura 1. 4 Elenco delle attività assegnate al gestore della rete ferroviaria in caso di emergenza

Inoltre il sistema ferroviario assicura il blocco del traffico sulla linea interessata e mette in atto tutte le azioni necessarie a garantire la completa operatività del sistema dei soccorsi.

Durante la gestione delle operazioni, il gestore della rete ferroviaria, le sale operative delle strutture coinvolte e i centri locali di coordinamento mantengono uno stretto contatto con la Sala Situazione Italia del Dipartimento della Protezione Civile, le cui attività sono regolate dalla D.P.C.M del 3 dicembre 2008 “Organizzazione e funzionamento di SISTEMA [58] presso la Sala Situazione Italia del Dipartimento della Protezione Civile” in modo tale da poter intervenire, qualora le risorse disponibili sul territorio non fossero sufficienti a fronteggiare l'evento, attivando il Servizio Nazionale di Protezione Civile così come previsto dalla legislazione vigente in materia di Protezione Civile (D.P.C.M del 3 dicembre 2008 concernente “Indirizzi operativi per la gestione delle emergenze [59]).

Capitolo 2

Le componenti che definiscono il rischio all'interno di una galleria ferroviaria

Il presente capitolo descrive le leggi, le componenti che definiscono il rischio e le metodologie di analisi dello stesso così come definiti in letteratura.

In particolare vengono valutati criticamente i differenti sistemi di mitigazione del rischio attivi e passivi nelle gallerie ferroviarie. Infine sono state analizzate le metodologie di analisi del rischio qualitative e quantitative e viene descritto come la normativa italiana prevede la sua applicazione.

Nel capitolo vengono quindi descritti:

- Componenti che concorrono a definire la sicurezza del sistema ferroviario;
- Misure di mitigazione del rischio attive e passive;
- Metodologie di stima del rischio nelle gallerie ferroviarie.

2.1 Componenti che concorrono a definire la sicurezza del sistema ferroviario

In questo paragrafo si analizzano i sistemi di sicurezza disponibili per la riduzione del rischio di incidente in galleria, con riferimento particolare alla problematica legata all'incendio.

I vocaboli *pericolo* e *rischio*, a differenza del linguaggio comune, assumono in quello tecnico significati differenti.

Il primo può essere considerato come una caratteristica appartenente all'attività del trasporto e si riferisce alla possibilità di accadimento di incidenti dalle conseguenze indesiderabili.

Il significato del termine rischio, invece, si basa sul concetto di danno e di incertezza. Per formulare una definizione che coniuga entrambi gli aspetti si può considerare il rischio come una possibilità di danno.

La rappresentazione matematica del rischio maggiormente utilizzata è la seguente:

$$R = P \cdot C, \text{ dove:}$$

- P = probabilità o frequenza di accadimento dell'evento dannoso,
- C = magnitudo (o conseguenza) derivante dall'incidente.

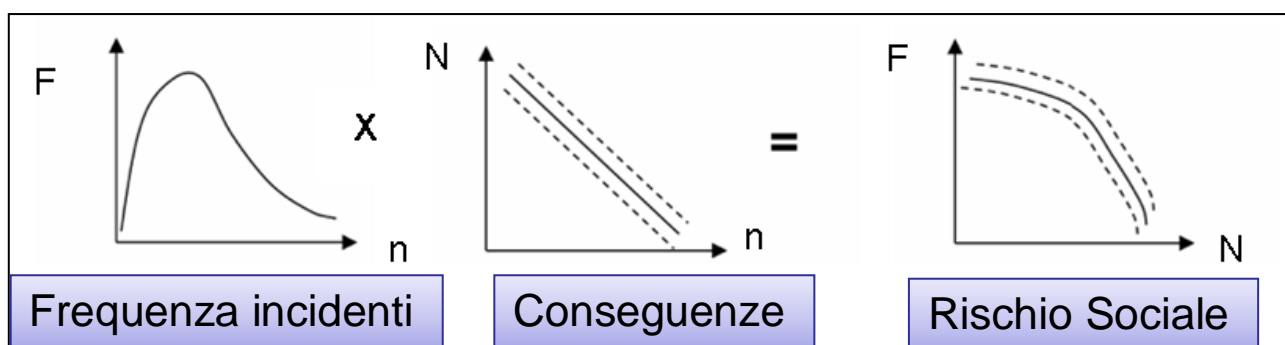


Figura 2. 1 Rappresentazione grafica del rischio

Per diminuire l'entità di rischio è allora possibile seguire due tipi di approccio differenti:

- adottare misure *preventive* per ridurre le occasioni di rischio: in questo modo diminuisce la frequenza P con cui si manifestano gli eventi;
- adottare misure *protettive* per contenere le conseguenze derivanti dagli incidenti: in questo modo si attenua l'entità dei danni ovvero la magnitudo C .

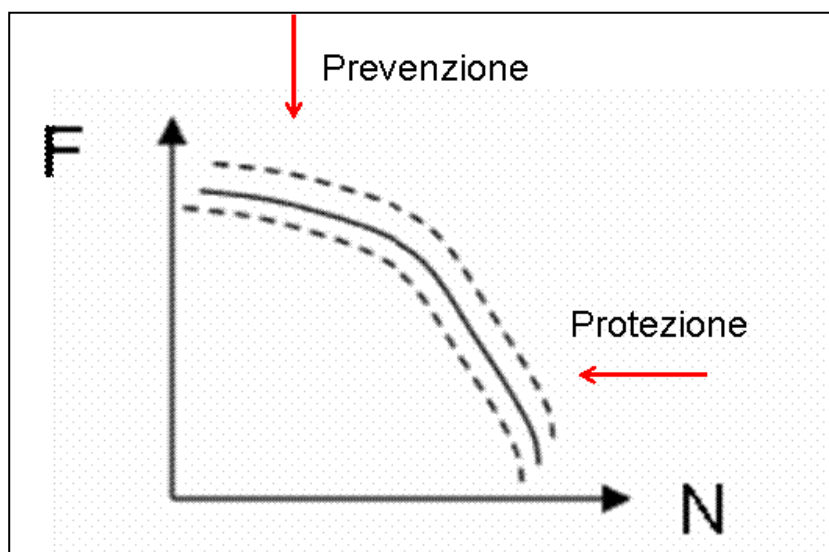


Figura 2. 2 Curva di isorischio

Nella Figura 2. 2 vengono rappresentate le curve *isorischio*, che consistono in iperboli nel piano M, F , ovvero Magnitudo delle conseguenze, Frequenza di accadimento.

A ogni evento indesiderato si associa un punto, che si troverà sulla curva caratterizzata da un livello di rischio R_i del diagramma, e si verifica che esso sia al di sotto della soglia massima di accettabilità R_s .

In caso contrario, per riportare il rischio entro i livelli di accettabilità è necessario intervenire o sulla frequenza di accadimento (misure di *prevenzione*) o sulla magnitudo degli effetti (misure di *protezione*).

Le considerazioni sopra riportate sono applicabili a qualsiasi attività umana, compreso il transito all'interno di una galleria ferroviaria. Per verificare nel dettaglio i componenti specifici che definiscono il rischio in questo particolare ambito è necessario considerare le differenti componenti che contribuiscono a definire il rischio all'interno del sistema ferroviario e più in particolare in una galleria.

Il sistema ferroviario è composto da diverse componenti che assieme concorrono a definire il livello di sicurezza relativo al transito di un convoglio in una galleria ferroviaria, in particolare il livello di rischio è relativo all'interazione tra le tre componenti principali, veicolo, infrastruttura e comportamento umano.

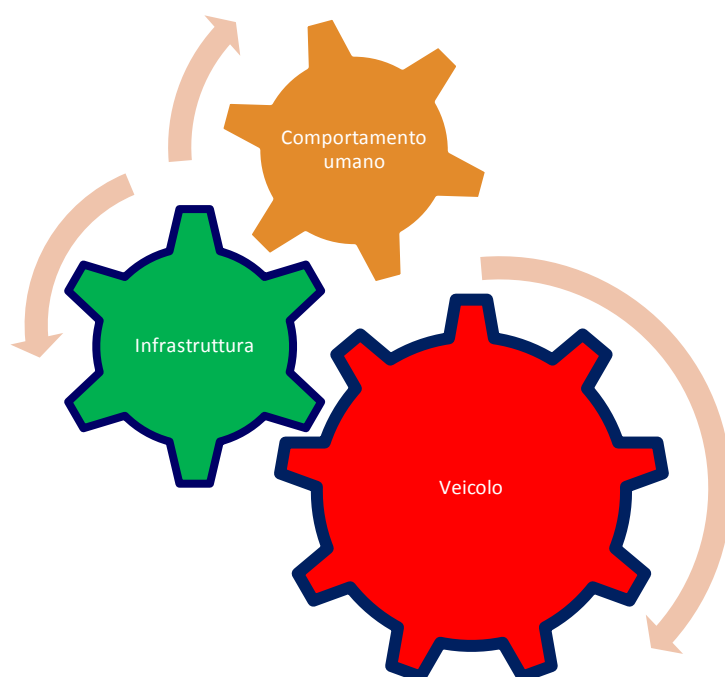


Figura 2. 3 Aspetti che influenzano la sicurezza nel sistema ferroviario

In particolare per analizzare il rischio all'interno di una galleria ferroviaria è necessario considerare l'interazione delle differenti componenti che concorrono tra loro alla definizione del rischio, verificando le specificità e gli obiettivi primari di ogni soggetto.

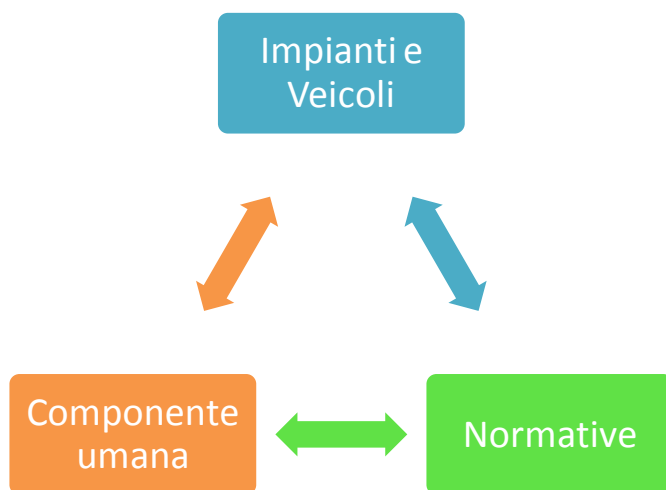


Figura 2. 4 Interazione tra le differenti componenti del sistema ferroviario

Le componenti sopraelencate interagiscono tra di loro in un ambiente complesso, nel quale si intersecano differenti obiettivi, primo tra tutti garantire il servizio di trasporto.

2.2 Misure di mitigazione del rischio attive e passive

Questo paragrafo contiene un'analisi dei sistemi che permettono di ridurre le conseguenze di un incidente e di quelli che ne diminuiscono le probabilità di accadimento. Una prima analisi è riferita ai sistemi di ventilazione che permettono di mantenere le condizioni ambientali corrette per il normale esercizio e che, permettendo l'apporto di aria fresca e l'estrazione dei fumi, garantiscono un periodo di tempo più lungo per l'evacuazione, e pertanto sono da intendere come sistemi di riduzione delle conseguenze. Successivamente vengono analizzati i sistemi di supporto alle operazioni di spegnimento, individuando i sistemi utili per localizzare la sorgente e per il suo contenimento o spegnimento.

Sistemi di ventilazione

Nelle gallerie che superano una data lunghezza o determinati volumi di traffico è auspicabile il ricorso all'impiego di impianti di ventilazione per prevenire i rischi derivanti dall'esposizione a inquinanti come il monossido di carbonio e per permettere una buona visibilità in caso di incendio.

La ventilazione permette infatti, in caso di incendio, di condurre aria fresca in prossimità delle persone intrappolate e di diluire i fumi prodotti, ma nel contempo l'apporto di aria alimenta l'incendio.

Un tunnel che non è equipaggiato con sistemi di ventilazione, è comunque generalmente percorso da un flusso d'aria che dipende dalle condizioni meteorologiche esterne e dalla circolazione ferroviaria.

Le condizioni meteorologiche influiscono per la differenza di pressione tra i due portali e possibili effetti camino o moti convettivi.

La circolazione influisce con l'*effetto pistone*, tale effetto si riduce con l'aumentare della sezione della galleria rispetto alla sagoma del convoglio.

Sono state sviluppate tre diversi metodi per la ventilazione:

- ventilazione trasversale;
- ventilazione longitudinale;
- ventilazione semitrasversale.

Ognuno di questi sistemi presenta vantaggi e svantaggi in relazione al tipo di impiego, ovvero se in condizioni normali di esercizio, in condizioni di emergenza con veicoli fermi, o ancora in condizioni di emergenza in caso di incendio.

La direttiva dell'Unione Europea prevede la possibilità di creare rifugi di emergenza, che comunque devono essere collegati verso l'esterno. Per questi luoghi è opportuno prevedere un sistema di alimentazione di aria fresca indipendente dal sistema di ventilazione principale. Nei locali, la presenza di una pressione leggermente superiore a quella presente in galleria impedisce l'accesso dei fumi, e garantisce l'apporto di aria fresca agli occupanti.

Sistema di ventilazione trasversale

Questo sistema consiste nell'immissione di aria fresca lungo tutta la galleria e nel prelevamento della stessa quantità di aria inquinata che viene allontanata. Si ottiene in tal modo una concentrazione di inquinanti teoricamente uniforme su tutta la lunghezza della galleria.

Il sistema è realizzato con condotti di mandata e di aspirazione posizionati lateralmente o superiormente (controsoffittatura), e da apposite bocchette distribuite sull'intera lunghezza.

In caso di incendio si possono ottenere le migliori condizioni se si realizza una portata sufficiente ad asportare il fumo prodotto, indipendentemente dalla tipologia di traffico. In teoria, però, con l'entità usuale dei flussi di traffico difficilmente si riesce a ottenere una tale portata, e inoltre i moti longitudinali possono rendere molto ampia la zona interessata dai fumi.

Sistema di ventilazione longitudinale

L'aria viene forzata all'interno della galleria con un determinato numero di ventilatori assiali (*jet fan*) applicati sulla volta del tunnel.

Per il controllo dei fumi si possono affiancare dei condotti dotati di opportune bocchette, che possono essere utilizzati solamente in caso di necessità.

Sistema di ventilazione semitrasversale

Come nella ventilazione trasversale sono presenti condotte di mandata e di aspirazione, con la differenza che il bilancio tra i flussi in ingresso e in uscita non è nullo: parte dell'aria viene perciò espulsa dalla galleria, che viene perciò utilizzata come condotto.

Questo sistema risulta un compromesso tra i due precedenti ed è utile nelle lunghe gallerie per limitare la sezione e la velocità (e quindi i consumi) delle condotte di aspirazione.

Sistemi di rilevazione dei fumi e degli incendi

I sistemi di rilevazione dei fumi oltre a permettere di attivare i ventilatori in base alle condizioni ambientali in esercizio normale, permettono, se superate determinate soglie, di individuare le anomalie che potrebbero essere causate da un incendio, ma non ne individuano l'esatta localizzazione se non sono supportati da altri impianti come le telecamere o gli altri sistemi analizzati in questo paragrafo.

Rilevatori di fumi

Solitamente i sistemi di rilevamento dei fumi si basano sull'uso di un dispositivo composto da un emettitore e da un ricevitore di luce, e il loro principio di funzionamento si basa sull'assorbimento o sulla riflessione della luce stessa.

Il metodo più conosciuto è il detector di fumo ottico basato sul principio di riflessione, ovvero quando il fumo entra nella camera dell'apparecchio la luce è riflessa sulla fotocellula ricevente, e oltre una certa soglia di raggi riflessi dal fumo viene attivato lo stato di allarme.

Altro sistema noto, ed più comunemente impiegato in galleria, è l'opacimetro, costituito da un emettitore di luce che invia un raggio luminoso a una distanza di parecchi metri, il quale, è ricevuto da un sistema fotosensibile che, in base alla perdita dell'intensità luminosa, rileva la presenza di opacità permettendo così l'attivazione dei ventilatori e oltre una determinata soglia l'attivazione dello stato di allarme.

Rilevatori di temperatura

I sistemi di rilevazione di temperatura funzionano misurando la temperatura ambientale e, se rilevano una prefissata temperatura massima ammissibile, indicano la presenza di una anomalia.

Sono da distinguersi due principi di rilevazione: rilevazione punto-punto e rilevazione lineare della temperatura.

Il primo incorpora un dispositivo sensibile alla temperatura (resistenza termosensitiva) connesso con l'unità di valutazione.

I rilevatori lineari non hanno interruzioni longitudinali tra i sensori. La rilevazione punto-punto risulta economicamente svantaggiosa rispetto a quella lineare.

Rilevatori di radiazioni luminose

Rilevazione di fiamme misurando le radiazioni luminose emesse. Con questa tecnologia possono essere rilevate differenti lunghezze d'onda, dagli infrarossi agli ultravioletti. Sono perciò sensori sensibili alla luce (calibrati per una certa lunghezza d'onda) e attivati quando la specifica radiazione è ricevuta. La rilevazione di fiamme basata sulla misura delle radiazioni emesse non è, però, adatta per la prevenzione del rischio in galleria, in quanto il fumo sviluppato rapidamente negli ambienti chiusi impedisce per la sua opacità il rilevamento della fiamma, può rilevare pertanto solamente i fuochi all'aperto. Inoltre i costi di investimento e manutenzione (pulizia lenti) sono elevati.

Sistemi di rilevazione lineare con conduttori elettrici

Si tratta di un cablaggio costituito da due conduttori elettrici dotati di isolamento sensibile alla temperatura. La temperatura elevata produce un cortocircuito, causando il relativo allarme. I cavi sensibili alla temperatura sono stati i primi sistemi lineari utilizzati in galleria. L'inconveniente di questa tecnologia è l'impossibilità di rilevare l'esatta localizzazione del fuoco, e pertanto è preferibile utilizzare tecnologie più avanzate.

Sistemi di rilevazione lineare con semiconduttori

I sensori di temperatura a semiconduttori o resistori sono sensibili alla temperatura e connessi a un bus di trasmissione dei dati formato da molti conduttori per le trasmissioni dei dati.

Sistemi di rilevazione con fibre di vetro

Questi cavi sensibili alla temperatura sono composti da una fibra conduttrice di vetro contenuta entro un tubo metallico, connessi a una estremità all'unità di valutazione che invia continuamente segnali luminosi alla fibra ricevendo uno specifico segnale di risposta che deriva dalla riflessione interna al conduttore. L'aumento della temperatura fa espandere la fibra in un determinato punto del cavo, e questa deformazione viene rilevata per effetto del cambiamento del segnale riflesso, rilasciando un allarme per temperature superiori a una determinata soglia massima.

Sistemi di contenimento e di spegnimento

Lo scopo principale di un sistema di contenimento e spegnimento di un incendio è quello di rallentare il processo di combustione nel tempo e quindi l'aumento della temperatura e la produzione di fumi, e se le condizioni lo permettono di estinguerlo, limitando pertanto i danni alle persone e alle strutture.

Oltre alla presenza di estintori portatili e di idranti, è possibile prevedere l'installazione di sistemi fissi di protezione. Tali sistemi si possono attivare automaticamente per effetto del calore emesso dalla combustione (sistemi a sprinkler), ovvero per intervento automatico a seguito dell'allarme pervenuto dai rilevatori.

Con i sistemi a sprinkler, che garantiscono l'attivazione automatica in caso di elevate temperature, può però verificarsi l'apertura di un gran numero di *teste* anche in aree non direttamente collegate con l'incendio a causa del movimento del calore nella direzione longitudinale in galleria che porta a sfalsare l'apertura delle testine rispetto all'ubicazione dell'incendio. Alternative al sistema a sprinkler a teste chiuse sono i sistemi a diluvio a zone alimentati preferibilmente ad acqua e schiuma, oppure sistemi a schiuma a media o ad alta espansione. Ultimamente hanno suscitato grande interesse i sistemi ad acqua finemente suddivisa (tipo "*Water Mist*") che sono in grado di sottrarre un'elevata quantità di calore con l'uso di quantità d'acqua molto contenute. Infatti la nebulizzazione dell'acqua rende possibile la sottrazione di calore di circa 1-2 MW per chilogrammo d'acqua erogata e per secondo. Pertanto per contrastare un tipico incendio di un autocarro, che può raggiungere i 50 MW, potrebbero bastare 25-50 l/s d'acqua se propriamente erogata (Rainoldi, Maja, 2006 [26]).

2.3 Metodologie di stima del rischio nelle gallerie ferroviarie

L'analisi di rischio deve valutare i diversi rischi in una galleria, tenendo conto di tutti gli elementi inerenti alle sue peculiarità progettuali, le condizioni di circolazione e al tipo di traffico (passeggeri o merci), le caratteristiche della infrastruttura e dei rotabili. Lo scopo dell'analisi di rischio è la valutazione della probabilità di accadimento di specifici eventi incidentali, nonché la gravità delle conseguenze della loro evoluzione. L'analisi va reiterata nel caso di adozione di misure di mitigazione del rischio, per poter valutare il rischio residuo. Le misure atte a ridurre il rischio vengono classificate come segue:

- Misure che diminuiscono la probabilità di accadimento di un evento anomalo;
- Misure di protezione;
- Misure di facilitazione dell'allontanamento dei passeggeri;
- Misure di facilitazione degli interventi di soccorso.

La valutazione del rischio associato al passaggio di convogli ferroviari all'interno di gallerie è un aspetto ampiamente trattato nella letteratura di settore. In particolare, differenti studi hanno elaborato diverse metodologie per analizzare questa complicata materia. Tra i differenti metodi di analisi del rischio sono stati individuati due approcci, il primo basato su valutazioni qualitative dei differenti aspetti che influenzano il rischio espresse da tecnici esperti dei differenti settori e un secondo che si basa su un'analisi statistica quantitativa del rischio all'interno della galleria. Un approccio alla valutazione del rischio nei sistemi di trasporto, con particolare riferimento alle gallerie, è stato sviluppato dall'ing. Marco Arcangeli nell'ambito della tesi elaborata nel XXIV ciclo della scuola di dottorato di infrastrutture e trasporti dell'Università La Sapienza dal titolo "Valutazione del Rischio dei Sistemi di Trasporto". In particolare è stato elaborato un modello, costituito da una serie di indicatori che descrivono i diversi pericoli a cui è esposta una galleria evidenziando le vulnerabilità della struttura. Tale modello permette, di conseguenza, di comparare l'efficacia di interventi di mitigazione del rischio e di individuare, attraverso la comparazione dei risultati, il mix di soluzioni più efficaci (Arcangeli, 2012 [6]).

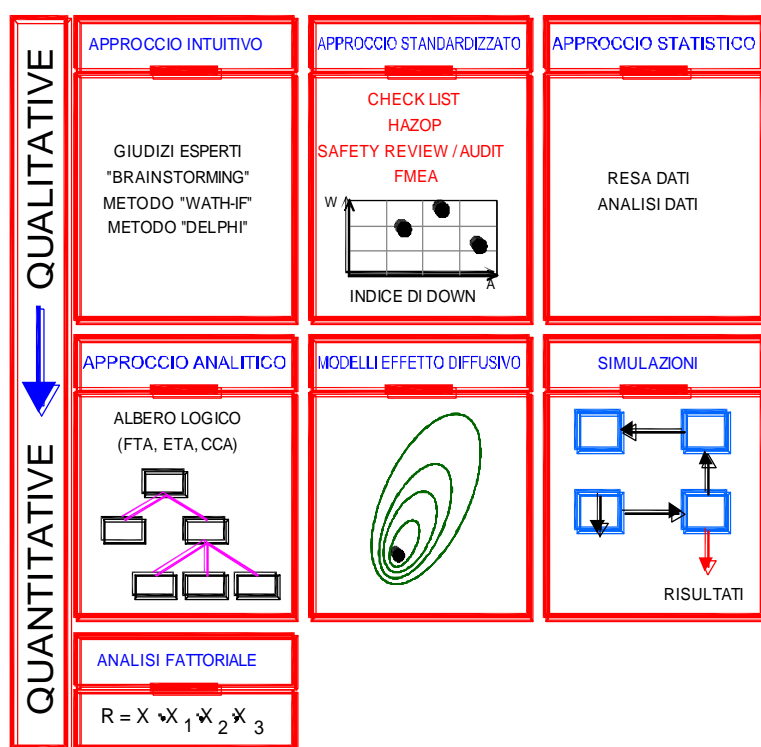


Figura 2. 5 Schema dei differenti approcci di analisi del rischio

In particolare si riportano i seguenti esempi di utilizzo dei differenti approcci all'analisi del rischio:

- qualitativi (giudizi degli esperti, brainstorming, ecc.);
- quantitativi (analisi fattoriale, modelli di simulazione, ecc.).

I differenti approcci nell'analisi del rischio comportano di volta in volta pregi e difetti nella valutazione del rischio globale che sono riportati nelle figure sottostanti

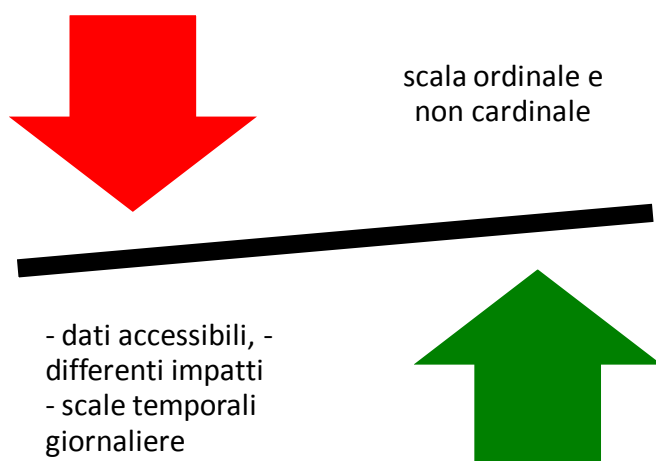


Figura 2. 6 Criticità e punti di forza dell'analisi qualitativa

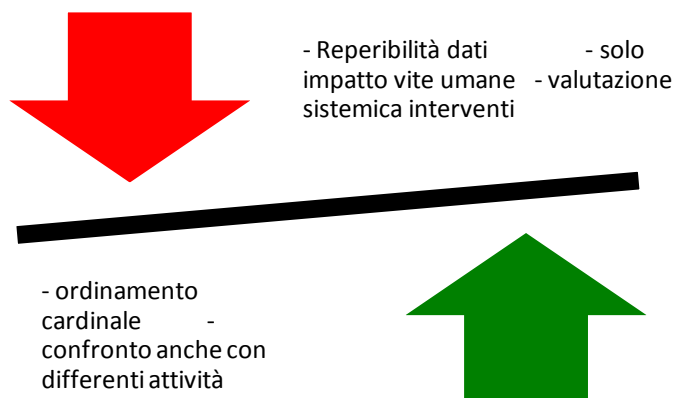


Figura 2. 7 Criticità e punti di forza dell'analisi quantitativa

In sintesi, l'analisi qualitativa permette di valutare aspetti che, per loro natura, con grandi difficoltà e approssimazioni possono essere descritti da indicatori quantitativi e, rinunciando ad ottenere un valore numerico del rischio associato al transito all'interno di una galleria permette di ottenere valutazioni spinte al transito di un singolo convoglio all'interno della galleria.

Considerati le peculiarità di ogni approccio nell'analisi del rischio il legislatore con il D.M. 28 Ottobre 2005 (Sicurezza nelle gallerie ferroviarie) individua in una procedura di analisi del rischio, di tipo quantitativo basata sulla scomposizione del sistema treno – galleria nei sottosistemi componenti infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative. La procedura di analisi di rischio definita all'interno del decreto fa ricorso alle tradizionali tecniche ad Albero degli Eventi ed ad Albero delle Cause, combinate a studi di Scenario per la valutazione delle conseguenze associate a ciascun probabile evento finale.

Il D.M individua i seguenti eventi come incidentali principali di riferimento:

- Incendio (S1);
- Deragliamento (S2);
- Collisione (S3).

Gli scenari vanno generati empiricamente analizzando le serie storiche degli incidenti ferroviari e valutando per ognuno la significatività in termini di probabilità e di conseguenze.

I singoli scenari incidentali evolvono verso una conseguenza di danno massimo, minimo o intermedio in funzione della presenza, dell'efficacia e dell'efficienza dei sistemi produttivi e mitigativi a livello di infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative.

Tali scenari devono essere necessariamente considerati mentre ulteriori scenari (atti vandalici, attentati) devono essere considerati solo in casi particolari.

Il decreto definisce una procedura di Analisi di Rischio Base, definendo un metodo per la validazione dei requisiti minimi come condizioni già sufficienti per garantire la sicurezza dei passeggeri in una data galleria. L'analisi di rischio base costituisce una procedura semplificata per la valutazione dell'incolumità e sopravvivenza dei passeggeri, nei casi in cui la loro sopravvivenza sia condizionata essenzialmente dall'autosoccorso. Tale analisi viene definita sulla base dello scenario incidentale incendio in galleria con perdita di mobilità del rotabile. La procedura di analisi di rischio base viene descritta all'interno degli annessi D1 e D2 del decreto.

Il D.M. prevede inoltre la possibilità di svolgere un'analisi estesa applicando le seguenti prescrizioni:

- Aumentando il numero di scenari incidentali di riferimento;
- Aumentando il livello di dettaglio dei sottosistemi infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative;
- Analizzando le cause di innesco dei singoli eventi iniziatori degli scenari.

Nella tabella sottostante vengono riassunte le condizioni che il legislatore ha individuato per imporre l'analisi del rischio base o estesa in una galleria

Tabella 2. 1 Raccomandazioni di sicurezza per le gallerie ferroviarie secondo il D.M. 28 Ottobre 2005.

Lunghezza galleria [m]	Presenza di requisiti minimi (D.M. 28/10/2005)	Traffico < 220 treni/giorno	Andamento altimetrico senza inversioni di pendenza	Tipo di analisi
L < 1000	no	no	no	nessuna
1000 < L < 2000	si	si	si	nessuna
1000 < L < 2000	no	si	si	ARB
1000 < L < 2000	no	no	no	ARE
2000 < L < 9000	si	si	si	ARB
2000 < L < 9000	no	si	si	ARB
2000 < L < 9000	no	no	no	ARE
L > 9000	si	si	si	ARE

In tutte le gallerie in cui è possibile il transito simultaneo di treni merci trasportanti merci pericolose e treni viaggiatori e qualora l'Analisi di Rischio Base non riesca a dimostrare la sufficienza delle misure di sicurezza adottate va eseguita una Analisi di Rischio Estesa.

L'analisi dei rischi viene effettuata da un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal Gestore della infrastruttura, secondo i principi generali riportati

nell'Allegato III. Il contenuto e i risultati delle analisi dei rischi devono essere inseriti nella documentazione di sicurezza, come indicato nell'Allegato IV.

L'analisi dei rischi deve dimostrare che, con i parametri di riferimento e i requisiti di sicurezza, riportati all'Allegato II, sono conseguiti gli obiettivi di sicurezza contenuti nell'Allegato III, con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto, dei servizi di soccorso.

Il decreto, dopo aver fornito le definizioni preliminari di rischio individuale e rischio cumulato, definisce, per entrambi, i limiti di accettabilità, attenzione ed inaccettabilità. Si sottolinea come il solo criterio basato sull'indicatore di rischio cumulato non possa essere adottato come criterio di accettabilità nell'analisi della singola galleria e come sia necessario a tale scopo essere associato (Borghetti, Gandini 2012 [9]).

Capitolo 3

Modello integrato di valutazione della sicurezza in galleria

Il seguente capitolo descrive il modello di valutazione della sicurezza globale all'interno di una galleria, delineando da prima i sottomodelli che lo compongono, individuando le interrelazioni, e proponendo una metodologia speditiva di valutazione del rischio globale associato al passaggio di un convoglio all'interno di una galleria che considera sia elementi tecnico – strutturali dell'infrastruttura che aspetti procedurali e legati ai soccorsi.

Nel capitolo vengono quindi descritti:

- Modello di calcolo della frequenza di incidente in galleria;
- Modello di valutazione di sistemi di rilevazione anomalia;
- Modello di arresto convoglio in emergenza;
- Modello di attivazione delle procedure di auto salvataggio;
- Modello di stima delle conseguenze;
- Modello di valutazione dei soccorsi;
- Modello di evacuazione;
- Costruzione di un modello integrato di valutazione del rischio in galleria.

3.1 Modello di calcolo della frequenza di incidente in galleria

Per la valutazione globale del rischio è necessario valutare la probabilità di accadimento con cui si verifica ogni possibile evento incidentale iniziatore per poi valutarne l'evoluzione fino ad arrivare allo scenario finale sul quale sono valutate le conseguenze.

La probabilità di conseguenza di ogni singolo evento finale è data dal prodotto delle probabilità dei singoli sottoeventi (esempio anomalie al materiale rotabile o all'infrastruttura, applicazione di procedure non corrette ecc.).

Le macrofamiglie di eventi in galleria identificati dal DM 26/10/2005 sono:

- collisione;
- deragliamenti;
- incendio.

Ognuna di queste macrofamiglie può essere suddivisa in sottoscenari che dipendono a loro volta da differenti parametri del tracciato ferroviario e dei sistemi di sicurezza.

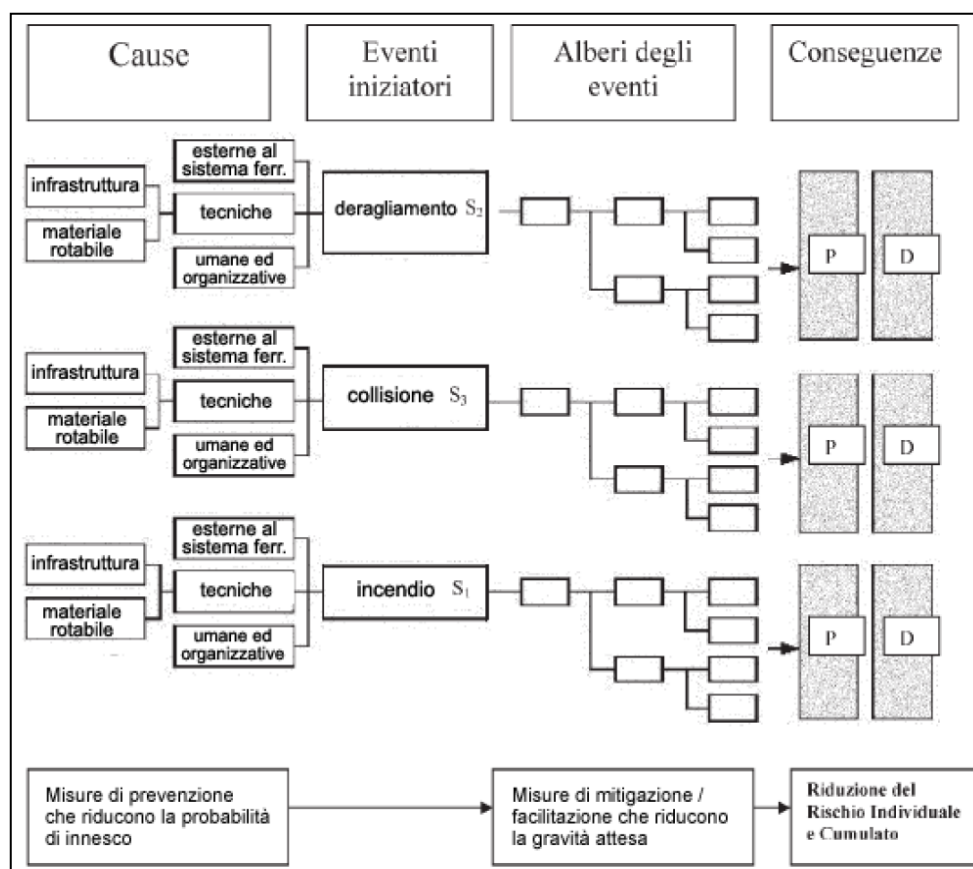


Figura 3. 1 Schema della procedura estesa nel DM 28 ottobre 2005 "sicurezza nelle gallerie ferroviarie" [54]

Per ogni scenario incidentale va individuata una probabilità di accadimento; questa operazione è affetta da incertezza stocastica, a causa della variabilità statistica dell'evento, in quanto i dati storici sugli incidenti in galleria sono scarsi.

Le cause principali possono essere riassunte nei seguenti parametri

- errore umano;
- cause tecniche;
 - strutturali;
 - materiale rotabile;
- cause esterne;
- cause indeterminate.

In particolare gli eventi critici all'interno della gallerie essendo eventi rari sono solitamente rappresentati con un modello di Poisson:

$$P_i(n/T) = e^{-\mu T} \frac{(\mu T)^n}{n!}$$

E 3. 1

dove:

- μ = frequenza di accadimento di un evento incidentale;
- T = periodo di tempo;
- i = classe di pericolo;
- n = numero di eventi.

Una volta determinata la probabilità di accadimento di ogni evento iniziale è necessario generare un albero dei guasti in grado di mostrare la probabilità di accadimento di ogni evento precursore o scatenante dello scenario iniziale.

Se si considera per esempio una collisione, questa può verificarsi se si verifica uno dei seguenti eventi:

- Ostacolo su tracciato.
 - convoglio fuori sagoma;
 - ostacolo lungo la linea;
 - cedimento infrastruttura.
- Mancato rispetto del segnale di arresto o suo malfunzionamento.
- Malfunzionamento dello scambio o eccesso di velocità.

Per ognuno di tali eventi esistono dei modelli secondari di quantificazione delle probabilità.

Il calcolo della probabilità del mancato rispetto di un segnale di stop.

Considerando il blocco fisso:

$$\lambda(X) = f_A(Q_S + Q_L + Q_B)Q_{TR} \quad \text{E 3. 2}$$

dove

- f_A = frequenza dei treni nella sezione X;
- Q_S = probabilità di malfunzionamento di uno scambio o di un semaforo;
- Q_L = mancato rispetto del segnale dal macchinista;
- Q_B = mancato arresto del treno.

(Gheorghe 2005 [3]).

Considerando la distribuzione di Poisson come rappresentativa dei tassi di accadimento degli eventi critici in una galleria ferroviaria, le frequenze di accadimento di questi si ottengono moltiplicando le funzioni di distribuzione dei tassi di accadimento degli eventi critici per il volume di traffico annuo incidente sulla tratta che comprende la galleria per la lunghezza della galleria stessa.

$$f = 365 \times L \times VT \times T_a \quad \text{E 3. 3}$$

dove:

- L: lunghezza espressa in Km;
- VT: volume di traffico espresso in treni\giorno;
- T_a : tasso di accadimento espresso in eventi\treni km.

L'analisi dei dati relativi ad Incidenti Tipici ed Incidenti Atipici avvenuti in circolazione consente di caratterizzare il fenomeno dell'incidentalità sulla Rete Ferroviaria Italiana attraverso i seguenti valori medi:

- numero di incidenti / treno km = $4.5 \cdot 10^{-8}$
- numero di fatalità / treno km = $2.5 \cdot 10^{-8}$
- numero di feriti gravi / treno km = $5 \cdot 10^{-8}$.

Considerando la velocità di transito dei treni lungo la linea e la lunghezza delle gallerie per il numero di convogli giornalieri per i 365 giorni di un anno.

In base a quanto illustrato e considerato che la finalità dello studio è quello di realizzazione uno strumento in grado di confrontare il rischio globale tra differenti strutture permettendo di valutare la sensitività rispetto a elementi procedurali, anche quando non sono disponibili dati specifici, si propone il seguente modello di valutazione della frequenza incidentale.

Da queste considerazioni è possibile ipotizzare un modello semplificato per la stima delle frequenze di accadimento di un incendio al materiale rotabile in transito all'interno di una specifica gallerie ferroviaria.

La frequenza d'incendio di un treno in galleria è definita come:

$$Fi = Pog \times Fit \quad E 3.4$$

dove:

- Pog: probabilità che la galleria sia occupata da un treno;
- Fit: Frequenza di incendio di un treno.

$$Pog = \frac{Ng \times Tg}{T} \quad E 3.5$$

dove:

- Ng: numero di treni che transitano nella galleria nel tempo T (es: treni / giorno);
- Tg: tempo di percorrenza in esercizio della galleria per un treno (Minuti);
- T: tempo di riferimento.

$$Fit = \frac{Ni}{Ts} \quad E 3.6$$

dove:

- Ni: numero di incendi che si verificano in media in Ts;
- Ts: tempo di riferimento (Anni di vita utile di un treno).

3.2 Modello di valutazione di sistemi di rilevazione anomalia

La rilevazione tempestiva di anomalie riveste un ruolo importante tra le azioni di mitigazione del rischio perché permette, in molti casi, l'adozione di comportamenti o l'applicazione di procedure in grado di governare la situazione verificatasi ancor prima che la stessa possa degenerare in emergenza.

In particolare, qualora si verificasse un incendio, in un ambiente confinato quale una galleria, se non governato tempestivamente, lo stesso ha la potenzialità di recare danno e comportare, anche in tempi relativamente brevi, condizioni di vivibilità inaccettabili all'interno del tunnel e, qualora l'incendio fosse di grosse dimensioni, la completa inefficacia delle operazioni di soccorso. Preso atto dell'importanza della tempestiva attivazione delle procedure di gestione delle emergenze, nella valutazione della sicurezza globale all'interno di un tunnel è indispensabile considerare l'influenza dell'utilizzo di tecniche e strumenti di rilevazione anomalia.

Particolarmente importanti in caso di incendio risultano gli impianti di rivelazione incendi ovvero quella serie di componenti degli impianti di allarme incendio in grado di rilevare e segnalare la presenza di un incendio all'interno di un convoglio ferroviario. Un dispositivo di rivelazione fumi e incendi è tipicamente costituito da apparecchiature elettroniche che rilevano la presenza di fumi o di variazioni di calore o di principio di incendio, in base ai fenomeni fisici connessi allo sviluppo dell'incendio stesso.

L'utilizzo di dispositivi di allertamento rapido in caso di anomalia può essere quindi modellizzato come una valutazione del tempo necessario, dal verificarsi di un'anomalia, per mettere in atto le procedure, interne ed esterne al sistema ferroviario, previste per governare l'emergenza.

In particolare il modello di valutazione di sistemi di rilevazione anomalia permette di stimare il tempo di rilevazione anomalia con la seguente formula:

$$TRilevazione\ Anomalia = \frac{\alpha\ rilevazione}{2 \times Iattivazione} \quad E\ 3.7$$

Dove l'indice di attivazione "*Iattivazione*" assume i seguenti valori:

- 0,25 in caso di assenza totale di dispositivi di rilevazione anomalia;

- 1 in caso di assenza di dispositivi ma con presenza di sistemi di allertamento manuale (quali per esempio pulsanti di emergenza o interfono a bordo dei convogli);
- 2 sistema di rilevazione automatizzato.

Mentre α *rilevazione* è il tempo minimo di rilevazione incendio stimato per esempio pari a 120 sec.

I valori assunti da *lattivazione* vanno a modellizzare le tempistiche verosimili di rilevazione per esempio di un incendio all'interno di un convoglio ferroviario riscontrate in letteratura. In particolare in caso di assenza di dispositivi comporta una perdita di tempo stimata intorno ai 4 minuti, ovvero il tempo medio in cui i passeggeri, accortisi per esempio del principio di incendio su un vagone, riescono ad allertare il personale di bordo che a sua volta attiva il sistema di governo dell'emergenza. Nel caso esistessero dei sistemi interfono o dei pulsanti di emergenza il tempo stimato per diramare l'allarme è di un minuto mentre l'utilizzo di sistemi automatizzati di rilevazione incendio comporta una perdita di tempo di appena 30 secondi.

3.3 Modello di arresto convoglio in emergenza

Consideriamo ora le due diverse modalità di avvicinamento del treno verso un punto di esodo presente in galleria:

- marcia a vista;
- fermata assistita.

3.3.1 Marcia a vista

Il regime di “marcia a vista” consente il moto del veicolo in modo da poterlo fermare nel tratto di visuale libera appena se ne manifesti il bisogno (presenza di eventuali rotabili od ostacoli fissi in genere, ecc.), senza mai superare la velocità di 30 Km/h.

Questa procedura di avvicinamento e di arresto del veicolo nel punto d'esodo comporta una decelerazione d'emergenza del convoglio fino alla velocità consentita per la marcia a vista e una successiva frenata d'emergenza fino all'arresto del convoglio in prossimità del punto d'esodo.

Si mostra una rappresentazione grafica di tale tipo di marcia in caso di emergenza.

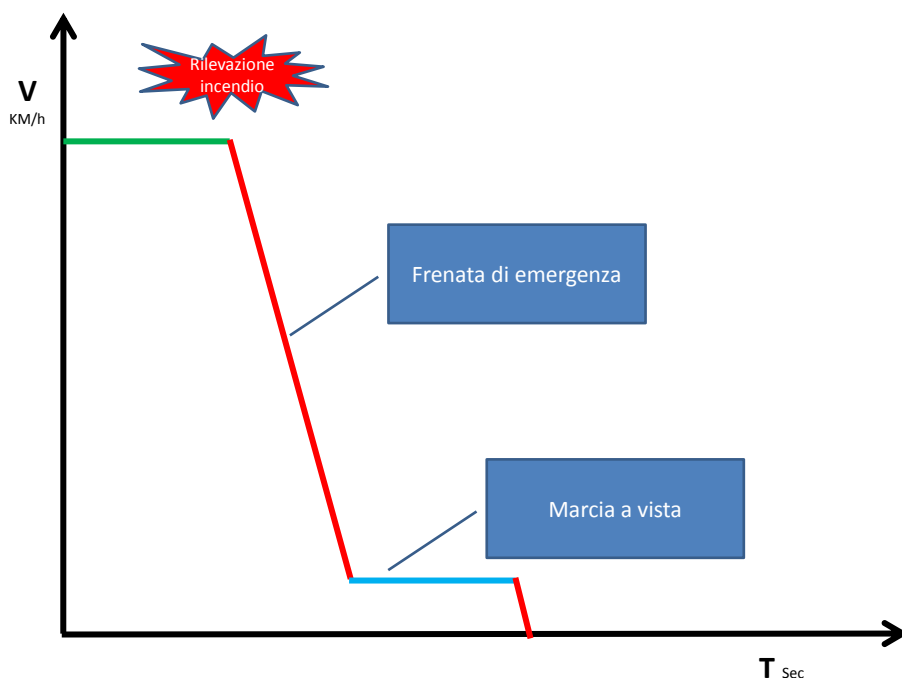


Figura 3. 2 Diagramma di trazione rappresentativo dell'arresto del convoglio con marcia a vista

Considerando una velocità iniziale di 300 km/h e una velocità di marcia a vista di 30 km/h i tempi di frenata in emergenza sono i seguenti considerando una frenata d'emergenza con decelerazione pari a 2 m/s^2 .

Tabella 3. 1 Calcolo dei tempi di arresto del convoglio

<u>V esercizio</u>	<u>V marcia a vista</u>	<u>Tempo</u>	<u>Spazio</u>
(Km/h)	(Km/h)	(s)	(m)
300	30	37,5	1718,75
30	0	4,17	17,36

Considerando che la velocità consentita per la marcia a vista è pari a 30 km/h (quest'ultima potrebbe risultare sovrastimata se le condizioni di visibilità all'interno della galleria non garantissero una marcia in sicurezza a tale velocità).

Il tempo speso e lo spazio percorso durante la marcia a vista sono semplicemente dati dal prodotto

$$S = V \times t$$

E 3. 8

dove

- S: distanza tra il punto di inizio della marcia a vista e il primo punto d'esodo all'interno della galleria
- t: 30 km/h pari a 8,33 m/s.

Il tempo speso e lo spazio percorso durante le fasi di frenata sono ottenuti applicando la formula

$$S = \frac{1}{2} a \Delta t^2$$

E 3. 9

dove

- $\Delta t = \frac{\Delta V}{a}$
- a: accelerazione;
- ΔV : variazione di velocità.

I tempi di arresto sono i seguenti

Tabella 3. 2 Calcolo dei tempi di arresto con marcia a vista in base alla distanza

<u>Spazio</u>	<u>Tempo</u>	<u>Tempo</u> <u>arresto</u>
(m)	(s)	(s)
1800	57	43
1900	81	46
2000	105	48
2100	129	50
2200	153	53
2300	177	55
2400	201	58
2500	225	60
2600	249	62
2700	273	65
2800	297	67
2900	321	70
3000	345	72

Si ricorda infine che la velocità ipotizzata per la marcia a vista potrebbe risultare inferiore nel caso in cui la presenza di fumo o una scarsa illuminazione dovesse diminuire la visibilità del guidatore.

3.3.2 Fermata assistita

La fermata assistita (o fermata a bersaglio) è un sistema automatizzato che conduce il convoglio ad arrestarsi presso il punto d'esodo più vicino e dotato di tale sistema d'arresto.

Si mostra una rappresentazione grafica di tale tipo di marcia in caso di emergenza.

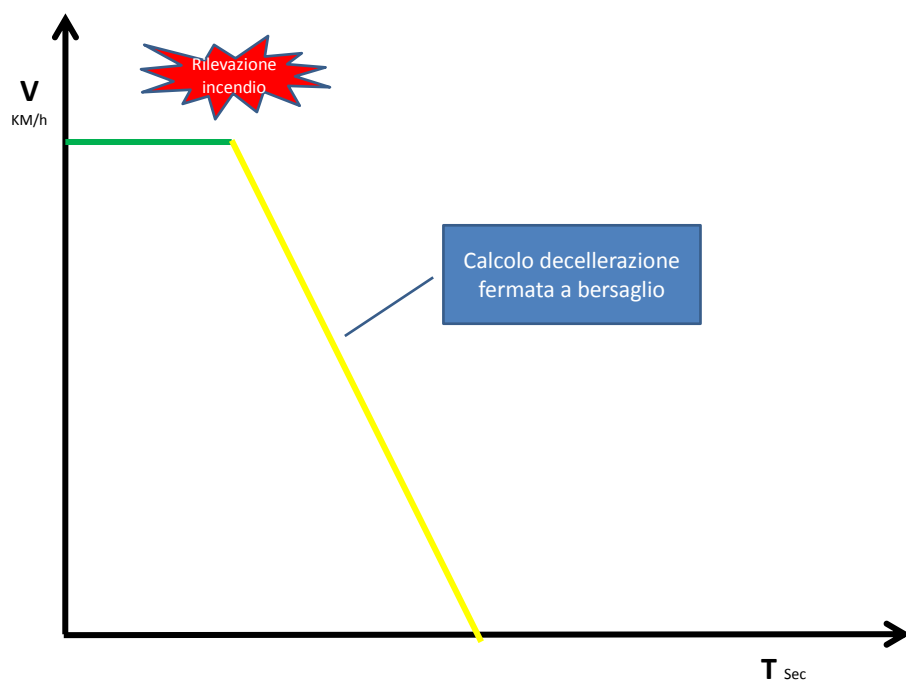


Figura 3. 3 Diagramma di trazione rappresentativo dell'arresto del convoglio fermata a bersaglio

Ipotizzando una velocità di marcia di 300 km/h al momento della rilevazione dell'anomalia e dell'inizio della procedura di arresto del veicolo con sistema di fermata a bersaglio si ottengono i seguenti tempi e spazi di arresto.

Tabella 3. 3 Calcolo dei tempi di arresto con fermata assistita in base alla distanza dai punti di esodo

<u>Decelerazione</u> (m/s^2)	<u>Tempo arresto</u> (s)	<u>Spazio arresto</u> (m)
1,93	43	1800
1,83	46	1900
1,74	48	2000
1,65	50	2100
1,58	53	2200
1,51	55	2300
1,45	58	2400
1,39	60	2500
1,34	62	2600
1,29	65	2700
1,24	67	2800

3.3.3 Analisi comparata

Da una prima analisi delle simulazioni di arresto del convoglio in galleria per velocità di esercizio prima del verificarsi dell'anomalia e delle conseguente procedura di arresto del convoglio presso un punto d'esodo pari a 300 km/h e con una decelerazione massima pari a 2 m/s^2 si evince che lo spazio e il tempo minimo di arresto del convoglio con frenata di emergenza è pari a 1736 metri e 42 secondi.

La procedura di arresto del veicolo con fermata assistita risulta sempre vantaggiosa rispetto all'utilizzo della marcia a vista a parità di distanza, come emerge dal grafico sotto riportato.

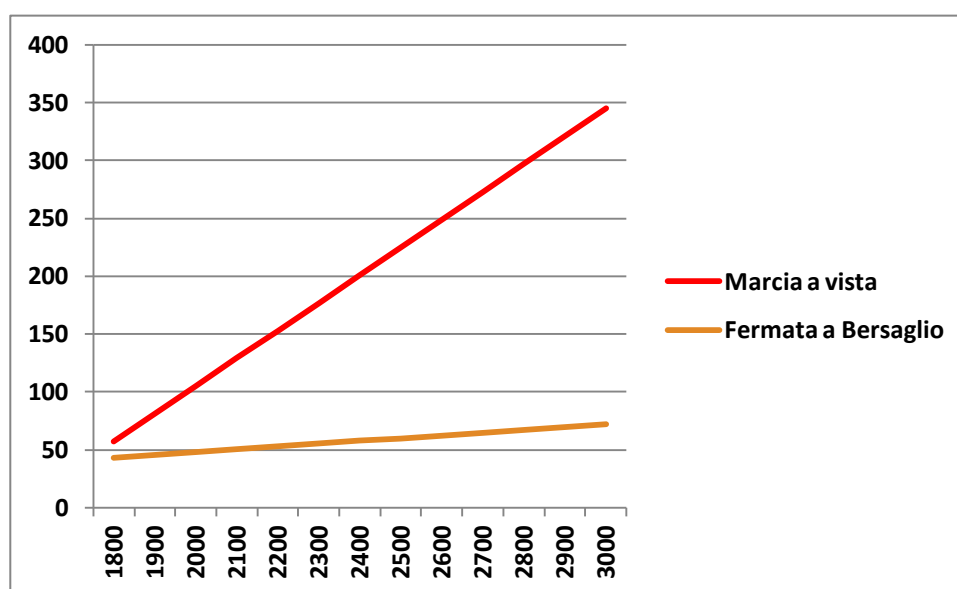


Figura 3. 4 Rappresentazione comparata dei tempi di arresto con le 2 modalità di fermata in base alla distanza del punto di esodo

Come si può notare, per distanze di poco superiori rispetto allo spazio minimo di arresto del convoglio, i tempi di arresto con le differenti procedure risultano vicini ma all'aumentare della distanza il divario in termini temporali tra l'utilizzo della fermata a bersaglio e la procedura tradizionale aumentare modo rilevante fino a comportare risparmi di tempo di quasi 4 minuti per distanze del punto d'esodo di 3 km rispetto al punto di attivazione della procedura di arresto del convoglio.

Tabella 3. 4 Valutazione delle differenze nei tempi di arresto con le 2 modalità di fermata in base alla distanza dal punto di esodo

Spazio	Tempo (a vista)	Tempo (a bersaglio)	Differenza
<i>(m)</i>	<i>(s)</i>	<i>(s)</i>	<i>(s)</i>
1800	57	43	14
1900	81	46	35
2000	105	48	57
2100	129	50	79
2200	153	53	100
2300	177	55	122
2400	201	58	143
2500	225	60	165
2600	249	62	187
2700	273	65	208
2800	297	67	230
2900	321	70	251
3000	345	72	273

La scelta tra quale sistema risulta preferibile non è scontata qualora non tutti i punti di esodo fossero dotati della tecnologia necessaria per l'utilizzo della fermata a bersaglio.

3.3.4 Conclusioni

Si può comprendere che la scelta se, in caso di incendio, fosse preferibile la fermata a bersaglio o la frenata di emergenza con marcia a vista dipende dai seguenti aspetti:

- posizione del veicolo e sua velocità di marcia all'interno della galleria;
- visibilità all'interno della struttura (si ricorda che in casi di visibilità molto bassa o con punti esodo scarsamente segnalati la marcia a vista richiede velocità anche molto inferiori ai 30 km/h);
- distribuzione dei punti di esodo all'interno del manufatto e loro dotazioni di sicurezza (in particolare quali sono dotati di sistema per effettuare la fermata a bersaglio).

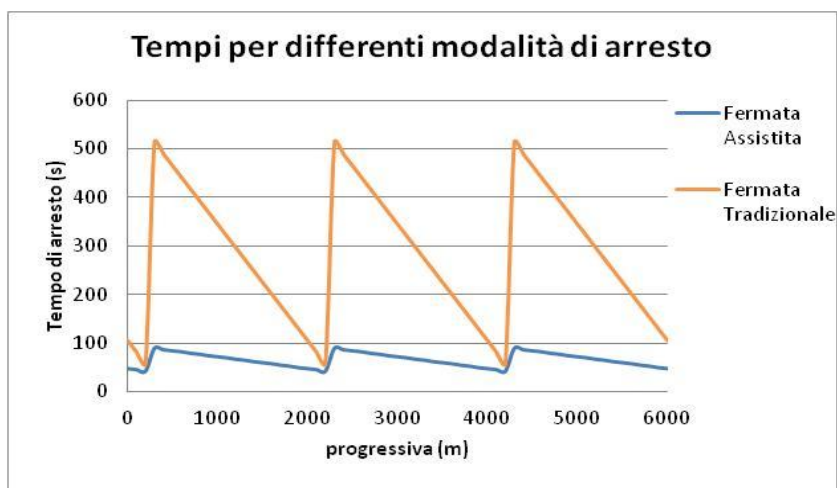


Figura 3. 5 Rappresentazione dei tempi di arresto con le 2 modalità di fermata ipotizzando un punto di esodo ogni 2000 metri.

Preso atto che per distanze paragonabili è sempre più vantaggioso (in termini di tempi necessari per portare i passeggeri nelle vicinanze di un luogo sicuro e per il confort degli stessi che sarebbero costretti a sopportare decelerazioni meno brusche) l'utilizzo della fermata assistita, diventa di non facile scelta qualora per portare il convoglio fino a un punto d'esodo dotato di fermata a bersaglio si rendesse necessario l'allungamento considerevole del tratto che il convoglio ferroviario percorrerebbe all'interno della galleria con incendio innescato.

Per definire quanto sarebbe il tratto aggiuntivo che potrebbe percorrere per utilizzare la fermata assistita senza causare perdite di tempo nell'evacuazione dei passeggeri è necessario considerare che tale valore dipende dalla lunghezza del tratto che il convoglio deve percorrere alla velocità di marcia a vista. Più è lungo questo tratto più diventa competitivo l'allungamento del percorso per arrivare verso un punto di esodo dotato di sistema d'arresto assistito.

Tale aspetto diventa maggiormente rilevante qualora per l'arresto del veicolo non si utilizzasse una decelerazione costante ma si consentisse al convoglio di percorrere i primi metri alla velocità di regime per poi far intervenire il sistema di frenata per esempio a una distanza di 1000 metri dalla fermata assistita.

Considerato che obiettivo ultimo dell'utilizzo delle differenti tecnologie non è quello di portare il convoglio nel minor tempo possibile presso un punto di esodo, bensì quello di minimizzare il rischio globale al quale sono esposte le persone presenti in galleria nel presente studio prevede una metodologia ricorsiva che massimizzando la sicurezza globale permette di individuare la tecnica di arresto migliore alla luce degli altri parametri considerati.

3.4 Modello di attivazione delle procedure di auto salvataggio

Quando si verifica un'anomalia a un convoglio ferroviario in galleria, quale per esempio un incendio, il passeggero, inizialmente impegnato in un normale viaggio, senza preavviso di trova costretto ad applicare procedure di auto salvataggio, quali per esempio l'evacuazione dal convoglio. Tale passaggio di attività non è rapido viene speso molto tempo per prendere decisioni e le scelte adottate spesso non si rivelano le più opportune. Una galleria è percepita dal passeggero come un luogo insicuro e molto spesso, l'istinto può portare i passeggeri a non abbandonare il convoglio.

Tipicamente il tempo che trascorre dall'innesco dell'incendio alla messa in sicurezza dell'utente viene suddiviso in 3 parti:

- fase di consapevolezza: tempo trascorso dall'innesco effettivo dell'incendio al suo rilevamento da parte dell'utente;
- fase di reazione: tempo impiegato per decidere l'azione più efficace;
- fase di evacuazione: tempo necessario per ripararsi in un luogo sicuro.

I tipici comportamenti degli utenti durante queste fasi sono:

- disorientamento e incredulità iniziali;
- perseveranza nella prosecuzione dell'azione precedentemente svolta;
- bassa propensione all'abbandono del convoglio, percepito ancora come luogo protetto;
- sottovalutazione dei pericoli connessi allo sviluppo di calore e gas tossici;
- lentezza e difficoltà nel riconoscimento delle uscite di sicurezza (per ignoranza o mancanza di chiarezza nella segnaletica).

I modelli di evacuazione che simulano il comportamento umano in galleria ipotizzano che l'utente si metta in salvo individualmente: gli addetti alla sicurezza del tunnel infatti riescono a intervenire solo dopo un certo tempo dall'accadimento dell'incidente, quando ormai la situazione potrebbe essere degenerata. È quindi legittimo pensare che l'utente debba pensare e agire autonomamente nei primi minuti dall'incidente.

Intuito il pericolo, i passeggeri coinvolti, tanto più se associato a un incendio, dovrebbero compiere le seguenti azioni, che rappresentano il comportamento più razionale da assumere:

- abbandono del vagone;

- allontanamento dal luogo dell'incidente in modo ordinato lungo il marciapiede presente a lato della massicciata;
- evacuazione dalla galleria alla prima uscita di emergenza disponibile.

Per studiare meglio i comportamenti umani in galleria, nel Gennaio 2002 il Ministero dei Trasporti Olandese ha realizzato una ricerca sul comportamento dell'utenza in una galleria stradale. Diversi automobilisti sono stati intervistati, altri sono stati coinvolti in finti incidenti di veicoli pesanti in galleria. In totale le simulazioni sono state 9, coinvolgendo quasi 500 automobilisti. Assumendo che il comportamento degli utenti del sistema ferroviario può essere assunto come paragonabile a quello degli automobilisti si può considerare che gli utenti rispondono molto passivamente, infatti pur avendo intuito il pericolo non fanno assolutamente nulla per i primi 5-6 minuti. Durante questo tempo cercano di capire cosa stia succedendo; osservano il comportamento degli altri, fino a quando l'utente più intraprendente abbandona il convoglio seguito a breve da tutti gli altri. Anche in caso di galleria invasa dal fumo gli utenti durante la simulazione hanno preferito inizialmente rimanere sul veicolo, percependo l'ambiente esterno come pericoloso, pur essendo il fumo evidente testimone di un incendio in atto. Un impianto di diffusione sonora aiuta a vincere la passività degli utenti, un semplice messaggio può innescare l'evacuazione. (Rainoldi, Maja, 2006 [26]).

Da queste considerazioni emerge chiara l'importanza di una corretta informazione agli utenti del sistema ferroviario, sia preventiva, ovvero creando familiarità con le procedure di auto salvataggio con apposite campagne informative, sia garantendo una corretta informazione in emergenza (attraverso la diffusione di messaggi sonori o con una corretta segnaletica) elementi che possono innescare comportamenti virtuosi che possono diminuire notevolmente le conseguenze di un incendio in una galleria ferroviaria.

Per stimare l'importanza di questi aspetti sulla sicurezza globale di una galleria ferroviaria è stato costruito un modello che stima il tempo di reazione dei passeggeri in base alla tipologia di dotazioni presenti in galleria o sul convoglio ferroviario.

$$T_{reazione} = \gamma \times I_{diffusione} + \tau_{reazione}$$

E 3. 10

Dove L'indice di diffusione (*I_{diffusione}*) assume i seguenti valori in base alle dotazioni presenti:

- 0 se l'illuminazione la segnaletica sono conformi ed è presente un sistema di diffusione sonora in emergenza;
- 1 se l'illuminazione e la segnaletica sono presenti ma non conformi;
- 2 se l'illuminazione e la segnaletica sono presenti ma non conformi e manca l'impianto di diffusione sonora;
- 4 se non risulta alcun dispositivo presente.

γ è un parametro di conversione dell'indice di diffusione stimato in 60 sec.

τ reazione è il tempo minimo di presa di coscienza degli utenti della situazione critica per la messa in atto delle procedure di auto salvataggio stimato (fonte AIPCR) in 120 sec.

3.5 Modello di stima delle conseguenze

Per poter valutare le conseguenze di un'anomalia, e in particolare di un incendio a un convoglio che percorre una galleria ferroviaria, è necessario conoscere l'evoluzione temporale che lo stesso può avere e gli effetti che questo può avere sulle condizioni di vivibilità all'interno della struttura. Grazie all'utilizzo di modelli è possibile stimare le conseguenze (valutate come numero di vittime) che deriverebbero da un incendio all'interno della galleria.

In seguito all'occorrenza di un incendio all'interno di una galleria possono liberarsi quantità notevoli di gas e di prodotti di combustione che per la conformazione geometrica della stessa possono muoversi solo lungo una direzione.

Per valutare aspetti connessi alla vivibilità in galleria si è ricorso alle simulazioni al computer tramite modelli fluidodinamici.

Grazie alla elevata potenza di calcolo degli elaboratori attuali è attualmente possibile simulare un incendio variando le caratteristiche del combustibile e la geometria della galleria per analizzare gli effetti sulle strutture e sulle persone coinvolte.

Si fornisce una rassegna dei fenomeni chimici e fisici che caratterizzano lo sviluppo e l'evoluzione di un incendio.

3.5.1 Metodi di descrizione di un incendio in galleria

Incendio

L'incendio vero e proprio è una lenta reazione esotermica che a partire da due componenti, il combustibile e il comburente; produce acqua e anidride carbonica, nonché prodotti secondari.

L'incendio è pericoloso per il forte calore emesso e perché i prodotti secondari di combustione sono in genere tossici per l'organismo, anche a basse concentrazioni.

Molte delle vittime di un incendio perdono la vita per avvelenamento da gas tossici, in particolar modo il *monossido di carbonio* che ha effetti quasi immediati, le restanti a causa dell'elevato calore assorbito dall'organismo con conseguenti ustioni esterne ed interne.

Curve di incendio

Per verificare la resistenza al fuoco dei materiali le normative dei singoli Stati prevede l'uso di curve di incendio *normalizzate*, cioè di funzioni matematiche che descrivono un ipotetico andamento della temperatura T in funzione del tempo t .

Esse vengono riportate in questa trattazione in quanto il loro andamento, sebbene sia espresso da una funzione analitica, è stato ricavato in seguito a numerose prove sperimentali. Si ritiene quindi che queste curve riescano a descrivere in modo sufficientemente accurato l'andamento temporale di un incendio, tenendo però ben presente che derivano da osservazioni di incendi all'aria aperta, i quali si comportano in modo differente dagli incendi in galleria.

Curva ISO 834

Questa curva simula la combustione di un materiale a base di cellulosa (legno, carta) è normalmente utilizzata nell'edilizia civile in quanto approssima bene la resistenza alle fiamme di tutto ciò che è presente in una abitazione: mobili, tessuti, *moquette*, ecc..

Oltre alla curva ISO-834, le singole normative nazionali prevedono ulteriori curve per stabilire il comportamento al fuoco dei materiali costruttivi: norma DIN 4102, norma BS 476, norma BS 7436, norma AS 1530, ecc.

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

E 3. 11

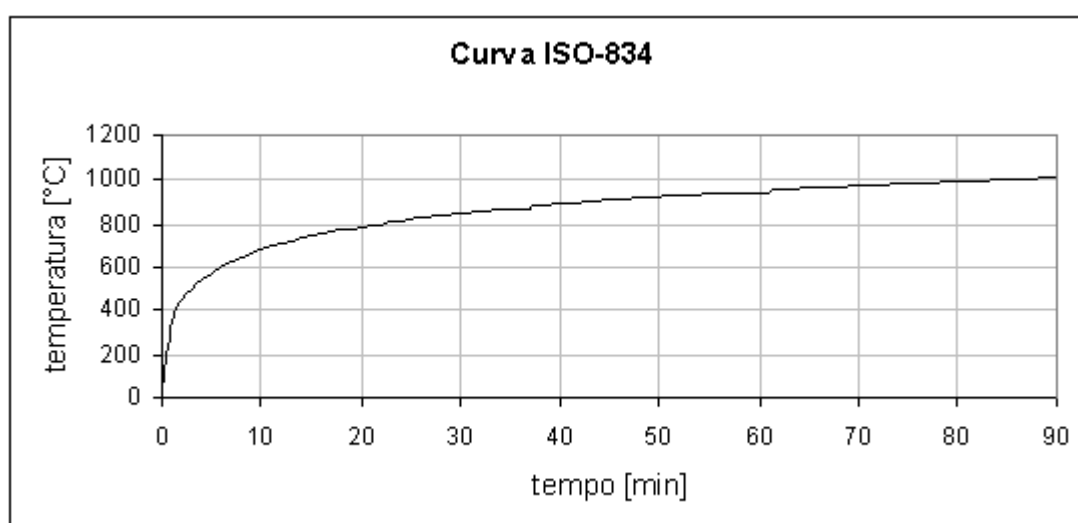


Figura 3. 6 Andamento della curva di incendio ISO-834 [26].

Curva HC (idrocarburi standard)

La curva HC (*HydroCarbon curve*) è utilizzata quando a bruciare è un prodotto petrolchimico: queste sostanze infatti producono una maggior quantità di calore e trasmettono la fiamma molto più velocemente rispetto ai materiali cellulosici.

La curva presenta un asintoto alla ordinata 1100 C° e una rapida crescita iniziale, a causa della veloce propagazione della fiamma tipica degli idrocarburi.

$$T(t) = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}).$$

E 3. 12

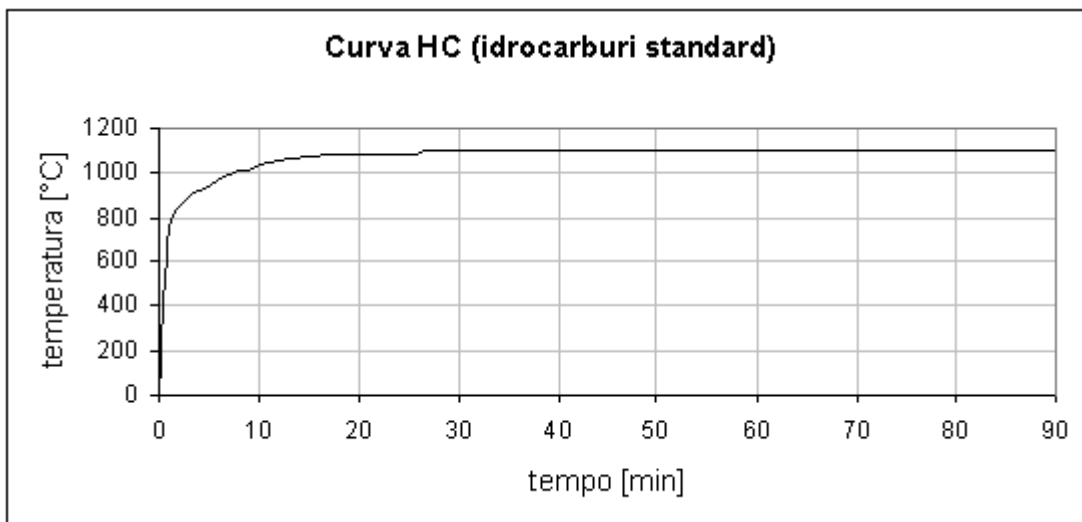


Figura 3. 7 Andamento della curva di incendio HC [26].

Curva HCM (idrocarburi modificata)

La curva HCM (*HydroCarbon Modified curve*) nasce dalla esigenza della normativa francese di disporre di una curva più restrittiva della precedente HC e dalla osservazione sperimentale di incendi idrocarburi che hanno superato la soglia asintotica dei 1100 C°. L'equazione è la medesima, ma ora l'asintoto è a 1300 C°.

$$T(t) = 20 + 1280 \cdot (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}).$$

E 3. 13

Curva RABT-ZTV

La curva RABT-ZTV è una spezzata sviluppata in Germania dal "*Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunnel*" come risultato finale dei test EUREKA 499.

La temperatura cresce molto rapidamente da 15 C° fino a 1200 C° in 5 minuti per poi rimanere costante per 30 minuti, a questo segue un raffreddamento che dura 110 minuti. L'andamento della spezzata RABT-ZTV è illustrato nella Figura 3. 9

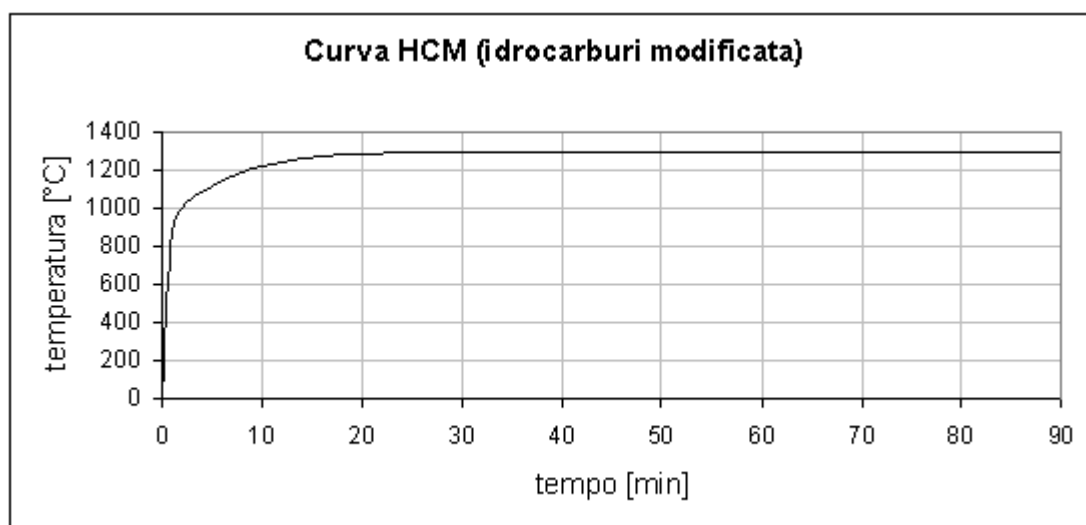


Figura 3. 8 Andamento della curva di incendio HCM [26]

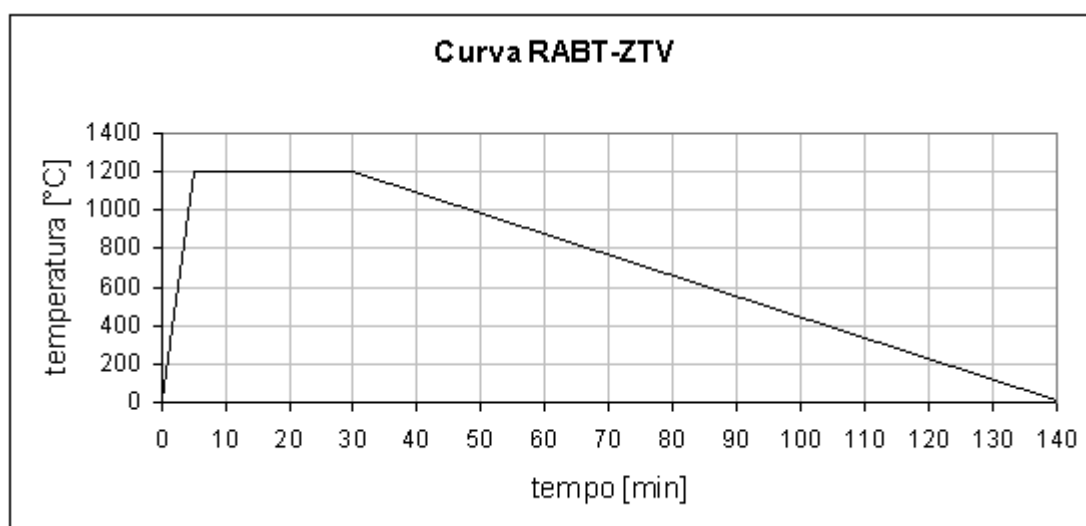


Figura 3. 9 Andamento della curva di incendio RABT-ZTV [26]

Curva RWS

La curva RWS (*RijksWaterStaat Tunnel Curve*) è stata sviluppata dal Ministero dei Trasporti Olandese ed è una spezzata che descrive il peggior scenario immaginabile su strada: uno sversamento di 50 m³ di combustibile che provoca un incendio da 300 MW per 2 ore. Si basa su una serie di test eseguiti dalla TNO in Olanda durante il 1979. La correttezza della RWS è stata confermata di recente durante i test in scala reale nel tunnel Runehamar in Norvegia.

Tabella 3. 5 Coordinate dei punti che definiscono la curva di incendio RWS

Tempo [min]	Temperatura [C°]
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200
180	1200

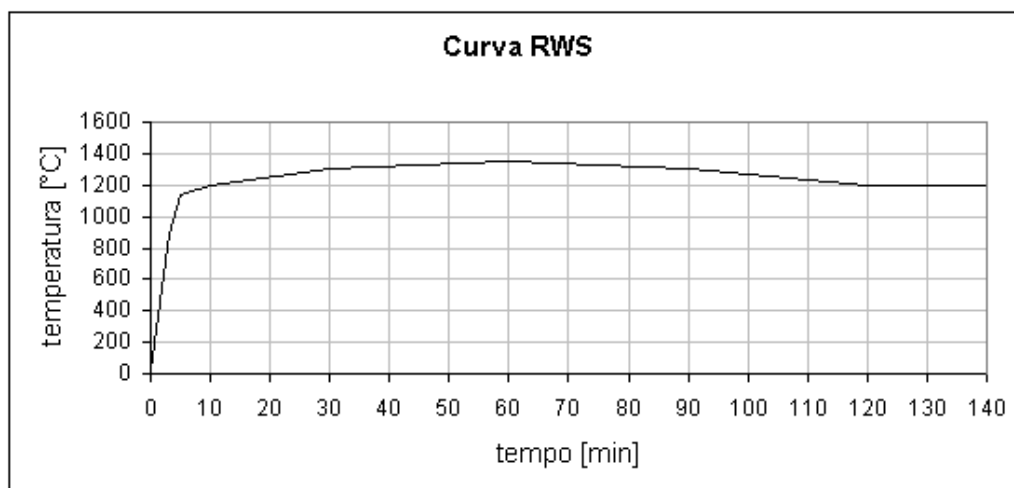


Figura 3. 10 Andamento della curva di incendio RWS [26]

Tra le curve RWS e HC sussiste la seguente differenza: la seconda descrive un incendio in un luogo relativamente aperto, con dispersione di calore verso l'esterno. La curva RWS si basa invece sulle temperature che ci si aspetta si generino in un luogo chiuso, come un tunnel, in cui la dispersione di calore per irraggiamento è pressoché nulla (Rainoldi, Maja 2005 [26])¹.

¹ Per una trattazione esaustiva della fisica di un incendio si rimanda a Maja R., Rainoldi G., Romanò D., Salimbeni R., *Il trasporto delle merci pericolose in galleria*, Politecnico di Milano – Dipartimento IN.D.A.CO. Unità di Ricerca D.I.S. - Sistemi di Mobilità Laboratorio Mobilità e Trasporti, 30/11/2006

3.5.2 Metodi di valutazione della vivibilità di una galleria durante un incendio

Gli effetti prodotti dagli inquinanti sull'organismo dipendono dal tempo di esposizione ad essi e dalla loro concentrazione locale. Un altro aspetto da non trascurare è la *sovrapposizione degli effetti* ovvero l'esposizione simultanea a più elementi nocivi, ognuno con la propria concentrazione o intensità.

I *modelli di vulnerabilità* cercano di descrivere in modo analitico questi fenomeni, partendo da dati sperimentali (su cavie animali).

Gli inquinanti e gli effetti nocivi di cui si tratta sono quelli tipicamente presenti in un incendio in galleria e precisamente:

- il calore assorbito per conduzione,
- il calore assorbito per irraggiamento,
- l'anidride carbonica,
- il monossido di carbonio,
- la carenza di ossigeno.

Gli elementi nocivi dovuti ad altri elementi tossici presenti durante un incendio, per esempio i cloruri, i solfuri e le diossine, pur essendo ben conosciuti non vengono presi in considerazione in quanto risulta pressoché impossibile, con i modelli di incendio attualmente disponibili, simulare la loro generazione e la loro propagazione.

Modello Probit

La funzione *Probit* è un metodo generalizzato che consente di ottenere, nota la concentrazione di una determinata sostanza e il tempo di esposizione a essa, la percentuale attesa di decessi a breve termine in una determinata popolazione esposta.

La probabilità di decesso Pr è legata alla concentrazione dell'inquinante C e al tempo di esposizione t dalla formula:

$$Pr = a + b_1 \cdot \ln(C) + b_2 \cdot \ln(t).$$

E 3. 14

Ponendo $b = b_2$ e $n = \frac{b_1}{b_2}$ si ottiene la più usata:

$$\text{Pr} = a + b \cdot \ln(C^n \cdot t).$$

E 3. 15

Dose inabilitante

Per valutare correttamente la *sovrapposizione degli effetti* dei vari elementi nocivi è utile introdurre il concetto di *Dose Frazionale Inabilitante* (in inglese *FED, Fractional Effective Dose*), ovvero il contributo che il singolo fattore tossico fornisce nei confronti della perdita globale di salute. La *FED* dipende dalla concentrazione, dal tempo di esposizione e dalla quantità inalata; il risultato è un numero *normalizzato*, ovvero rapportato all'unità, che rappresenta la perdita percentuale di salute.

La somma delle *FED* produce la *Dose Totale Inabilitante (TED, Total Effective Dose)*, un valore indice dello stato di salute dell'organismo. L'unità è il valore soglia che corrisponde allo svenimento, e quindi all'incapacità, dell'individuo. In termini matematici:

$$TED = \sum_{i=1}^n FED_i,$$

E 3. 16

in cui n è il numero di fattori nocivi considerati. La soglia di incapacità si raggiunge quando:

$$TED \geq 1.$$

Il modello di *Dose Inabilitante* proposto è quello sviluppato da Purser.

Assorbimento di calore per conduzione

Il calore assorbito per conduzione può causare svenimento e quindi morte per tre diversi motivi: ipertermia, ustioni cutanee e ustioni all'apparato respiratorio.

- L'ipertermia è un aumento della temperatura corporea: se il corpo umano supera i 42,5 °C per un lungo periodo di tempo le conseguenze sono fatali.
- Le ustioni cutanee sono lesioni provocate dal calore che agisce coagulando le proteine protoplasmatiche e danneggiando le cellule. Esse subentrano quando la temperatura dell'epidermide supera i 44,8 °C alla profondità di 0,1 mm, in questo caso si crea una *ustione di primo grado*. All'aumentare della temperatura e della

profondità di penetrazione del calore si creano ustioni di gravità maggiore, ovvero di *secondo e di terzo grado*. La gravità di un'ustione cutanea è legata alla superficie colpita, oltre che al *grado* proprio dell'ustione.

- Le ustioni all'apparato respiratorio, sono simili alle ustioni cutanee ma subentrano in un secondo momento, in quanto l'aria in ingresso nei polmoni è in parte raffreddata nel transitare nel naso e nella trachea.

Tra le tre conseguenze prodotte dal calore trasmesso per conduzione la più critica appare quindi l'ustione cutanea, in quanto ha dei tempi di risposta pressoché immediati. In ambiente secco la sudorazione permette alla pelle di asportare efficacemente il calore assorbito per cui l'organismo riesce a sopportare bene anche alte temperature

$$\begin{cases} t = \infty & T \leq 70 \\ t = \frac{5,33 \cdot 10^8}{T^{3,66}} & 70 < T < 150 \\ t \leq 600 & T \geq 150 \end{cases} \quad \text{E 3. 17}$$

Viceversa, in ambiente umido (100% di umidità) la sudorazione è inibita: già a 50 °C dopo poco tempo si riscontrano conseguenze letali per l'organismo.

I dati forniti sono relativi a un individuo medio e in condizioni da laboratorio, tuttavia molti altri fattori entrano in gioco nel determinare la resistenza al calore dell'organismo:

- tipo di attività: quiete, moto, ecc.,
- umidità dell'aria: l'aumento di questa inibisce la sudorazione e aumenta la conducibilità termica e quindi il calore ceduto all'organismo,
- velocità dell'aria: maggiore è questa maggiore è lo scambio termico tra la fonte di calore e l'organismo,
- isolamento termico degli abiti indossati.

La *Dose Frazionale Inabilitante* può essere calcolata nel seguente modo:

$$FED_{cond} = \frac{t}{e^{5,1849-0,0273T}} \quad \text{E 3. 18}$$

in cui:

- t [min] è il tempo di esposizione,
- T [°C] è la temperatura.

Assorbimento di calore per irraggiamento

Come noto il calore può essere trasmesso sotto forma di onde elettromagnetiche, il corpo umano, dal punto di vista fisico, si comporta come un *corpo grigio* con *emissività* prossima a 0,8.

Gli effetti della radiazione termica sul corpo umano sono principalmente le ustioni cutanee (gli organi interni sono protetti dall'esposizione diretta grazie al resto del corpo) e dipendono dall'intensità dell'irraggiamento e dal tempo di esposizione.

Persino brevi tempi di esposizione possono risultare fatali se la radiazione è sufficientemente elevata. Questa situazione può accadere a persone che si trovino all'interno di un *flash-fire* (si veda il paragrafo 0) o di una nube di vapore infiammabile soggetta al fenomeno *VCE*.

In galleria, nel caso di incendio limitato è facile fuggire dalla fonte di irraggiamento, in quanto questa coincide con la fiamma diretta; in incendi di dimensioni maggiori invece il calore viene emesso anche dai gas incandescenti che viaggiano scorrendo sull'intradosso della calotta.

Nel caso di incendio di idrocarburi, a causa dell'elevato potere calorifico degli stessi si può ritenere che la maggior parte dei decessi sia da attribuire all'irraggiamento.

I danni biologici sono legati alla quantità di energia assorbita, calcolata come il prodotto tra l'irraggiamento Q [W/m^2] e il tempo di esposizione t [s].

Tabella 3. 6 Espressioni del modello Probit che fornisce le probabilità di danno biologico in funzione della quantità di energia assorbita, calcolata come il prodotto tra l'irraggiamento Q [W/m^2] e il tempo di esposizione t [s].

Ustioni di primo grado:	$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln\left(t \cdot Q^{4/3}\right)$
Ustioni di secondo grado:	$Pr = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln\left(t \cdot Q^{4/3}\right)$
Letale:	$Pr = -36,38 + 2,5600 \cdot \ln\left(t \cdot Q^{4/3}\right)$

I dati sono conservativi in quanto sono riferiti alla pelle nuda, la presenza di vestiti influisce sicuramente su questi valori.

Per definire la *Dose Frazionale Inabilitante*, si definisce una curva LC_{50} per l'irraggiamento termico:

$$t = \frac{e^{7,72-1,30 \cdot \ln(G)}}{60}, \quad \text{E 3. 19}$$

in cui:

- t [min] è il tempo di esposizione,
- G [kW/m²] è il flusso di calore incidente.

Da questa si può quindi ricavare la *FED* come il rapporto tra i due membri della precedente equazione:

$$FED_{irr} = \frac{60 \cdot t}{e^{7,72-1,30 \ln(G)}}. \quad \text{E 3. 20}$$

Tuttavia dagli studi di Purser risulta che l'organismo resiste bene per lunghi periodi ad intensità fino a 2,5 kW/m² perciò appare opportuno correggere la precedente formula come segue:

$$\left\{ \begin{array}{ll} FED_{irr} = 0 & G \leq 2,5 \\ FED_{irr} = \frac{60 \cdot t}{e^{7,72-1,30 \ln(G)}} & G > 2,5 \end{array} \right. \quad \text{E 3. 21}$$

Assorbimento di anidride carbonica

Il principale effetto negativo procurato dall'anidride carbonica è l'*iperventilazione*², questa di per se non è dannosa, se non per il fatto che aumentando la quantità di aria inspirata aumenta di conseguenza anche la quantità di gas tossici assorbiti.

Per tenere conto dell'*iperventilazione*, alla *FED* dei singoli gas tossici si può applicare il seguente fattore correttivo:

$$VC = \frac{e^{0,1903X_{co_2}+2,0004}}{7,1}. \quad \text{E 3. 22}$$

L'anidride carbonica ad alte concentrazioni può produrre effetti tossici. La *Dose Frazionale Inabilitante* può essere calcolata nel seguente modo:

$$FED_{CO_2} = \frac{t}{e^{6,1623-0,5189X_{CO_2}}}, \quad \text{E 3. 23}$$

in cui:

- t [min] è il tempo di esposizione,
- X_{CO_2} [ppm] è la concentrazione dell'anidride carbonica.

Assorbimento di monossido di carbonio

Il monossido di carbonio (CO) è uno dei principali gas tossici prodotti durante un incendio ed è una delle principali cause di morte durante gli incendi.

Il monossido una volta nei polmoni si combina con l'emoglobina del sangue per formare la carbossiemoglobina (COHb). La presenza di questa molecola nel sangue riduce l'apporto di ossigeno agli organi generando un effetto narcotizzante.

La quantità di carbossiemoglobina nel sangue dipende dalla concentrazione di CO nell'aria, dalla durata di esposizione e dalla quantità di gas inalata.

Gli effetti dipendono da soggetto a soggetto: generalmente i bambini, gli anziani e chi soffre di problemi cardiaci tollerano concentrazioni minori di CO.

Considerando la quantità globale di emoglobina combinata si stima che la soglia di svenimento sia intorno al 30% di COHb, mentre la morte sopraggiunge intorno al 50%.

Il modello *Probit* che lega probabilità di decesso Pr , concentrazione C [ppm] e tempo di esposizione t [s] è:

$$Pr = -37,98 + 3,7 \cdot \ln(C \cdot t). \quad \text{E 3. 24}$$

La *Dose Frazionale Inabilitante* può essere calcolata nel seguente modo:

$$FED_{CO} = \frac{K \cdot X_{CO}^{1,036} \cdot t}{D}, \quad \text{E 3. 25}$$

in cui:

- $K = 8,2925 \times 10^{-4}$,
- X_{CO} [ppm] è la concentrazione del CO,
- t [min] è il tempo di esposizione,
- $D=30\%=0,3$ è la percentuale di COHb necessaria per lo svenimento.

Carenza di ossigeno

Lo svenimento per carenza di ossigeno avviene quando la concentrazione di O_2 nell'aria scende sotto il 10% (in condizioni normali è del 21%).

La *Dose Frazionale Inabilitante* può essere calcolata nel seguente modo:

$$FED_{O_2} = \frac{t}{e^{8,13-0,54(20,9-X_{O_2})}}$$

E 3. 26

in cui:

- t [min] è il tempo di esposizione;
- X_{O_2} [ppm] è la concentrazione dell'ossigeno.

(Rainoldi, Maja 2005 [26])

3.5.3 Costruzione del modello speditivo di valutazione delle conseguenze

In base a quanto sopradescritto, è stato elaborato un modello semplificato che permette mostrare l'evoluzione della temperatura durante un incendio di un vagone ferroviario all'interno di una galleria. Considerando i parametri di resistenza alla temperatura dell'uomo è poi possibile stimare in modo semplificato le conseguenze che deriverebbero per le persone presenti in galleria per tale aspetto.

I risultati di prove pratiche di incendio di veicoli ferroviari in galleria hanno prodotto i seguenti risultati con carico di fuoco 77000 MJ (carrozza ferroviaria).

Una carrozza ferroviaria sottoposta a prova, avente una dimensione longitudinale di 27 m, con innesco provocato in corrispondenza della estremità della carrozza rivolta verso l'ingresso del tunnel dal quale proveniva il flusso di ventilazione forzata di circa 0.5 m/s. Il lato opposto della stessa carrozza viene raggiunto dal fuoco incendiandosi completamente dopo circa 100 minuti

- Gli incendi delle motrici ferroviarie sviluppano, nella maggior parte dei casi, potenze variabili tra i 15 ed i 20 MW;
- valore massimo di temperatura variabile tra gli 800 ed i 900 °C e l'incremento termico massimo venne registrato dopo circa 100 minuti;
- la temperatura, lungo il tunnel, diminuisce su distanze relativamente brevi con situazioni più critiche sottovento.

Subito dopo tale tempo, furono registrate le temperature massime all'esterno della carrozza ferroviaria (probabilmente a causa della fuoriuscita delle fiamme attraverso finestrini o porte danneggiate).

Considerando come maggiormente rappresentative di un incendio di un convoglio ferroviario le curve RABT-ZTV e RWS che modellizzano l'andamento della temperatura come lineare nella prima fase successiva all'innesco, e adattata ai dati derivanti dalla prova pratica sopra riportata, l'andamento della temperatura nel tempo può essere approssimata come nel seguente grafico.

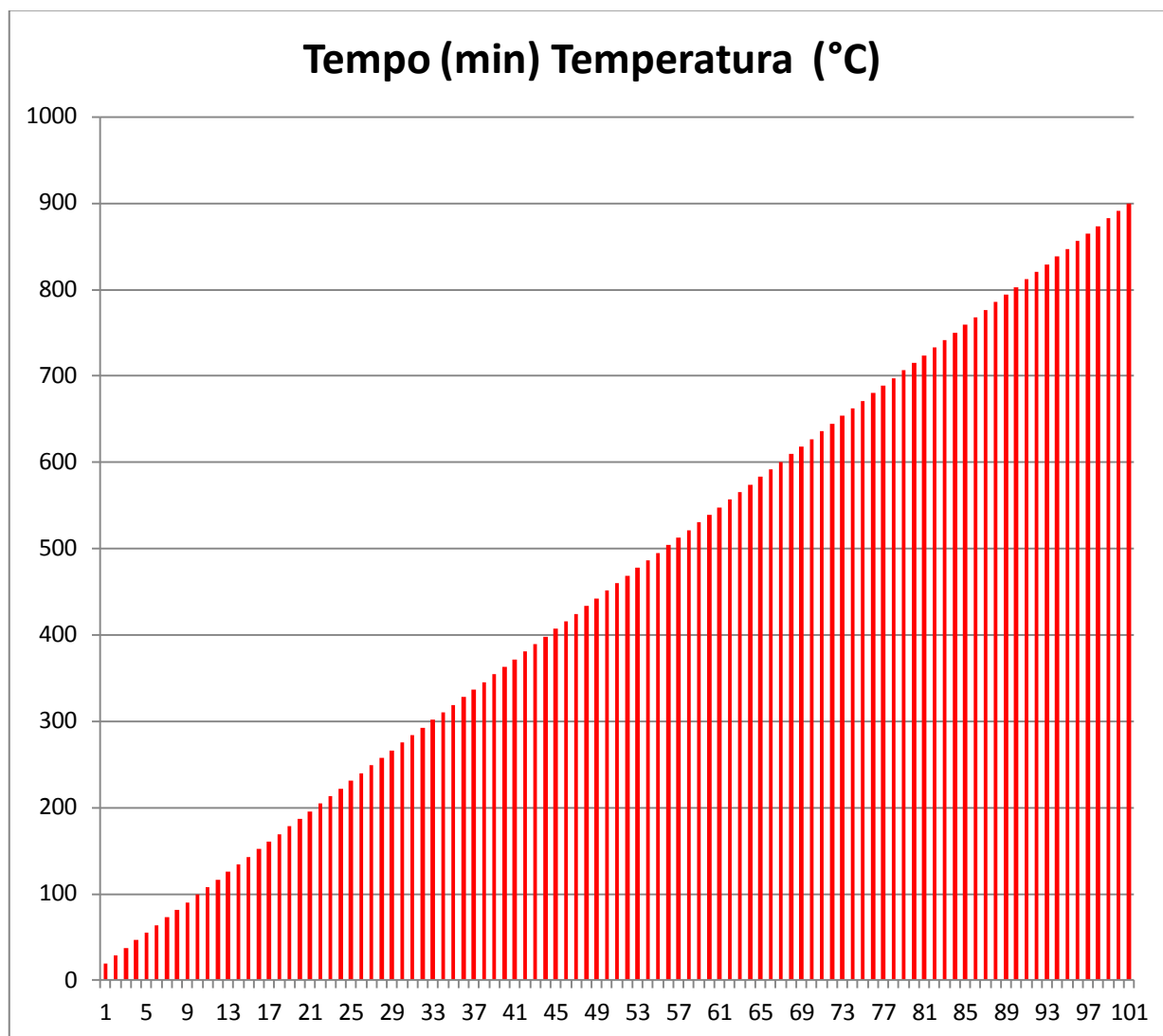


Figura 3. 11 Rappresentazione del modello semplificato di andamento della temperatura per l'incendio con carico di fuoco di 760 MJ di una carrozza ferroviaria

Le conseguenze, valutate in termini di vivibilità all'interno di una galleria in seguito a un incendio sono valutate attraverso questi parametri fisici la cui azione combinata può portare allo svenimento e alla successiva morte dell'individuo in galleria.

In particolare, considerando solo il parametro temperatura, in base ai modelli di resistenza umana descritti e ad altri dati riscontrabili nella letteratura di settore, relativamente all'effetto delle correnti termiche convettive, si riportano i seguenti valori per il "tempo di vivibilità" (o di durata) a diverse temperature costanti:

- 140°C ⇒ 5 minuti;
- 115°C ⇒ 20 minuti;
- 70°C ⇒ 60 minuti;
- 50°C ⇒ 3 – 5 ore

Ipotizzando una propagazione lineare della temperatura e preso atto che dopo 100 minuti si arriva ad avere la completa combustione del vagone con temperature che possono raggiungere i 900°C (Mazziotti, 2002 [29]) possiamo ipotizzare il numero di fatalità che si possono verificare per questo fattore critico per i differenti scenari.

3.6 Modello di valutazione dei soccorsi

Sull'evoluzione dello scenario di rischio derivante da un incendio in una galleria ferroviaria ha un effetto rilevante sulla mitigazione delle conseguenze il tempestivo intervento delle squadre di soccorso che agiscono sui seguenti aspetti:

- agevolare l'esodo delle persone presenti in galleria, soprattutto per le persone con limitata capacità motoria;
- intervento sull'incendio evitando che si inneschino fenomeni di auto innesco fino alla completa combustione del convoglio.

L'efficacia delle operazioni di soccorso è però condizionata alla tempestività di intervento, infatti su scenari con elevate temperature potrebbero rendere inefficaci i soccorsi o in alcuni casi, come verificato nel caso di incendio all'interno del traforo del Monte Bianco, la temperatura può superare quella di flashover e impedire ai soccorritori stessi di avvicinarsi al convoglio incendiato.

Il flashover è un fenomeno di combustione in cui il materiale contenuto in un'area chiusa si incendia quasi contemporaneamente, in conseguenza di un focolaio iniziale. Se l'incendio non viene domato in tempo il calore irradiato che si è sprigionato fa aumentare la temperatura di tutti gli altri oggetti presenti nell'ambiente, che rilasciano gas infiammabili per il fenomeno della pirolisi. Alla temperatura di autoignizione tali gas si autoincendiano, pertanto oggetti anche distanti dal focolaio iniziale iniziano a bruciare. Il flashover si produce a partire da temperature ambiente di 600 °C.

Anche a temperature più basse di quella di flashover può risultare difficile per le squadre di soccorso, anche se munite di tutti i dispositivi di protezione individuale prescritti, avere un operatività ottimale. Per questo motivo per temperature superiori a 250°C è stata ipotizzata una zona di intervento critico

Considerando l'ipotesi di evoluzione della temperatura ipotizzata in precedenza si può considerare l'efficacia delle operazioni di soccorso come illustrato nella seguente figura:

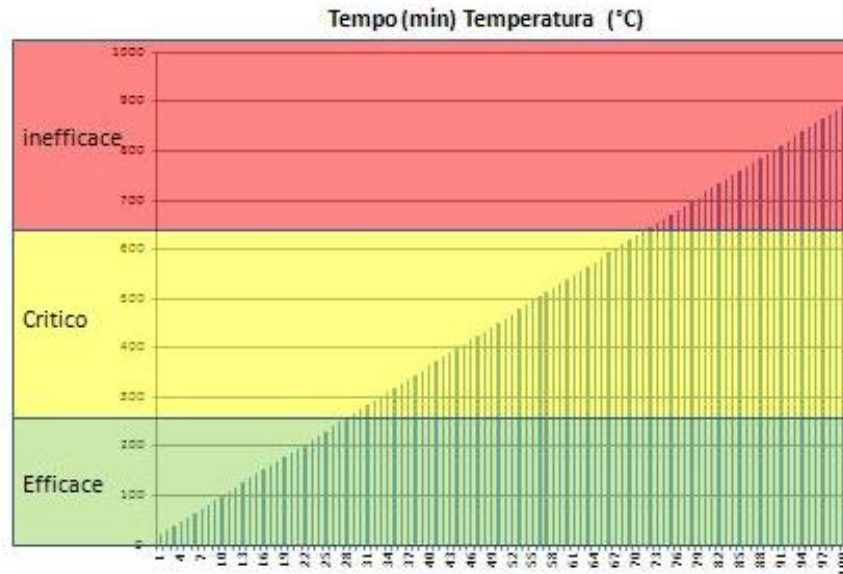


Figura 3.12 Rappresentazione delle fasce di intervento dei soccorsi in caso di incendio

Il tempo di intervento dei soccorsi dipende dai seguenti aspetti:

- Tempo di attivazione dei soccorsi (T_a);
- Tempo necessario per la più vicina squadra di soccorso per recarsi nella parte di galleria interessata dall'incendio (T_{per});
- Capacità operativa delle squadre di soccorso (T_{op}) che dipende dalle dotazioni della squadra stessa, dalla tipologia di galleria e dalle sue dotazioni di sicurezza (es dotazioni della galleria con idranti come previsto da normativa).

$$T_{soccorso} = T_{allertamento} + T_{avvicinamento} + T_{intervento} \quad E 3. 27$$

Il tempo di allertamento dipende dalle tecnologie di videosorveglianza da sistemi di diagnostica interni al convoglio ferroviario e dalle procedure del piano di emergenza.

$$T_{allertamento} = T_{rilevazione\ anomalia} \times I_{procedure} \quad E 3. 28$$

dove:

- $T_{rilevazione\ anomalia}$: vedi paragrafo 3.2

L'indicatore di valutazione delle procedure ($I_{procedure}$) assume i seguenti valori

- α se esiste una procedura automatizzata di allertamento delle squadre di soccorso al verificarsi di un'anomalia

- β se esiste una procedura concordata con i soccorritori con linea dedicata e informazioni precodificato;
- γ se non esiste nessuna procedura e l'allertamento avviene con i normali canali.

Si può immaginare un tempo minimo di attivazione dei soccorritori per procedure automatizzate pari al tempo di Rilevazione anomalia per sistemi di allertamento automatizzati ($\alpha = 1$).

Nel caso in cui non fosse presente un sistema automatizzato di allertamento dei soccorsi ma fossero precodificati messaggi di allertamento rapidi ed esaustivi tra il personale di bordo o meglio ancora la sala operativa del gestore della galleria e i soccorritori si può immaginare un tempo raddoppiato di attivazione dei soccorsi ($\beta = 2$).

Se non esistesse nessuna procedura per la quale, contestualmente all'attivazione del sistema di arresto del convoglio parte la chiamata verso le squadre di soccorso il tempo di attivazione è pari al tempo di arresto del veicolo presso il punto d'esodo maggiorato di un ulteriore penalità pari al raddoppio del tempo di rilevazione anomalia ($\gamma = 2 + [T_{arrestoconvoglio}]$).

Il tempo di avvicinamento delle squadre di soccorso al punto della galleria dove è fermo il treno è funzione della distanza del più vicino presidio di soccorso, dalla tipologia di percorso (tortuosità, dimensione carreggiata e traffico) che deve percorrere e dalla modalità di ingresso dei veicoli di soccorso alla galleria (punti esodo raggiungibili direttamente dai veicoli di soccorso, sedime ferroviario percorribile con veicoli gommati, utilizzo di veicoli intermodali o carrelli speciali). In base a queste considerazioni è possibile costruire un modello semplificato di calcolo speditivo del tempo di avvicinamento dei soccorsi al treno in emergenza.

$$T_{avvicinamento} = \frac{\text{distanza} \times I_{\text{tortuosità}}}{\text{Velocità Media}}$$

E 3. 29

La distanza è quella tra il più vicino presidio di soccorso e il punto d'esodo dove si è arrestato il treno, in base a questo qualora fosse presente h24 una squadra antincendio presso i luoghi sicuri il tempo di avvicinamento risulterebbe nullo. Qualora non fosse rispettata questa condizione il tempo di viaggio si ottiene imponendo una velocità media per il percorso minimo che si interpone tra l'ingresso in galleria (nel luogo dove staziona il treno o nel punto di accesso più vicino), e nel caso in cui non fosse censito un percorso

nel piano e non fossero comunicati con precisione gli accessi ai soccorritori si può ipotizzare un'ulteriore penalizzazione in termini di tempo pari a 3 volte il tempo di avvicinamento. Nel caso infine non fosse possibile accedere direttamente alla galleria con veicoli antincendio, i soccorritori si troverebbero costretti ad abbandonare i veicoli all'imbocco della galleria e percorrere lungo il marciapiede (o se non presente lungo la massicciata) il tragitto che li separa dal treno a piedi trasportando il materiale necessario per le operazioni di soccorso.

In base a queste considerazioni è stato individuato un indice di tortuosità (*Itortuosità*) che sintetizza questi aspetti all'interno del modello di calcolo del tempo di avvicinamento. In particolare *Itortuosità* assume i seguenti valori:

- 1 se il percorso di avvicinamento è tutto su strade primarie con carreggiata larga (per esempio Autostrade, SS e SP);
- 1,5 se almeno il 33% del percorso incide su strade comunali;
- 3 se la via di accesso dei soccorritori alla galleria non è opportunamente segnalato e non è stato predisposto un piano concordato di accesso;
- 6 se non esistono vie di accesso con veicoli gommati alla galleria.

Infine la qualità d'intervento può essere valutata anche in base alla dotazioni a disposizione delle squadre di soccorso. In particolare l'assenza di dispositivi quali per esempio idranti possono diminuire notevolmente l'efficacia delle operazioni di messa in sicurezza dell'area in emergenza. Tale capacità operativa è stimata nel presente modello come un tempo equivalente aggiuntivo che va ad aggiungersi a quello stimato. In pratica l'assenza di dispositivi è rappresentata come un tempo più lungo per ottenere la medesima efficacia dell'intervento di una medesima galleria nella quale sono presenti le dotazioni indispensabili.

$$T_{\text{intervento}} = K_{\text{intervento}} \times I_{\text{dotazioni}}$$

E 3. 30

dove

- *Kintervento* è una funzione delle risorse disponibili per le squadre di soccorso in relazione a uomini e mezzi che possono intervenire, nel caso ogni presidio sia dotato delle risorse necessarie in termini di uomini e mezzi la costante assume valore 1.

- *Idotazioni*: rappresenta la qualità delle dotazioni interne alla galleria che devono aggiungersi a quelle di base, valutate con *Kintervento*, rappresentativo del fatto che la tipologia di intervento in ambiente confinato comporta un'ulteriore difficoltà di lavoro per le squadre di soccorso. Viene esplicitato come un aggravio di tempo per avere un intervento di ugual efficacia. Sono stati individuati i seguenti aspetti con le rispettive penalità temporali
- 0 se le dotazioni sono conformi a quanto previsto nella direttiva;
 - 300 s. se sono presenti dotazioni di sicurezza ma non conformi alla direttiva;
 - 900 s. se sono assenti dotazioni antincendio;
 - 3600 s se non esistono dotazioni antincendio e non è possibile avvicinarsi con veicoli di soccorso all'incendio. In questo caso molto spesso risulta impossibile l'intervento di squadre di soccorso.

Di conseguenza il tempo di soccorso può essere rappresentato nella seguente forma:

$$T_{\text{soccorso}} = T_{\text{rilevazione anomalia}} \times I_{\text{procedure}} + \frac{\text{distanza} \times I_{\text{tortuosità}}}{\text{Velocità Media}} + K_{\text{intervento}} \times I_{\text{dotazioni}}$$

E 3. 31

L'intervento dei soccorritori ha influenza sulla velocità di evacuazione dei passeggeri e sull'evoluzione dello scenario dinamico dell'incendio. Mentre il primo aspetto sarà sviluppato nel paragrafo 3.7, l'effetto delle operazioni di messa in sicurezza della galleria da parte delle squadre di soccorso può essere così schematizzata.

Influenza dei soccorsi sull'andamento della temperatura

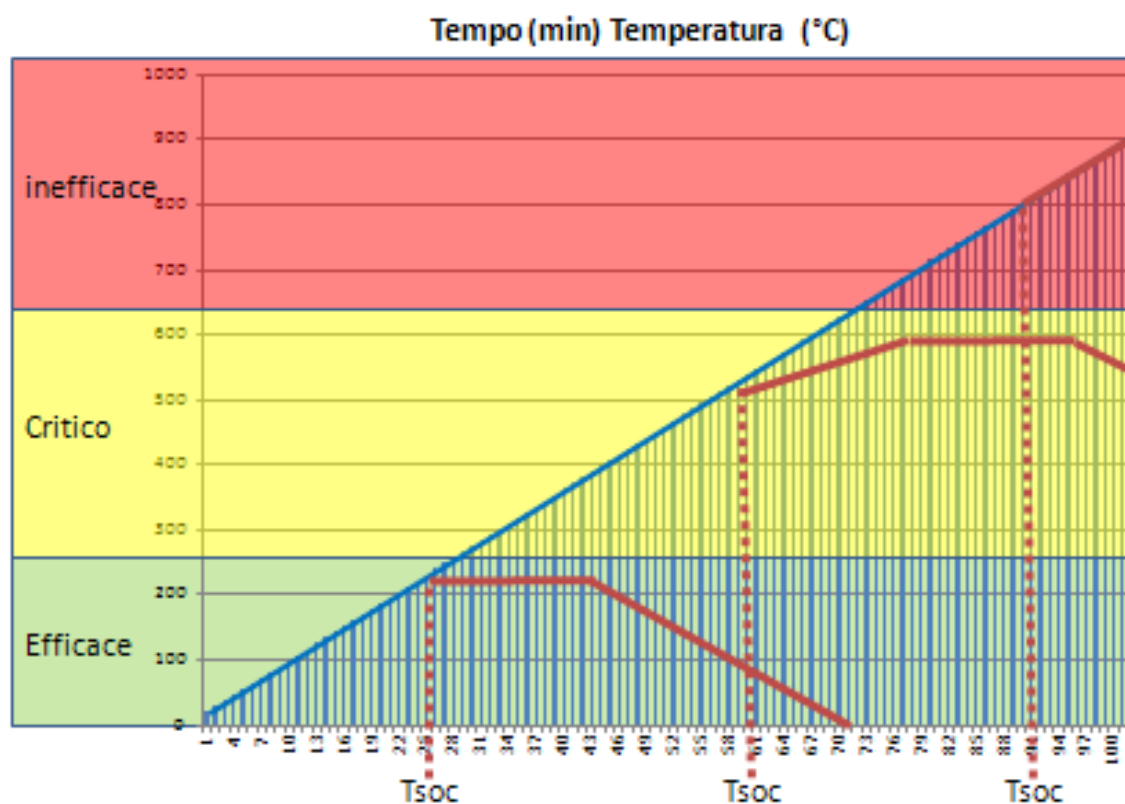


Figura 3. 13 Rappresentazione del modello semplificato di andamento della temperatura per l'incendio con carico di fuoco di 760 MJ di una carrozza ferroviaria con intervento delle squadre di soccorso

Come si nota in Figura 3. 13 è rappresentato l'andamento della temperatura per l'incendio con carico di fuoco di 760 MJ di una carrozza ferroviaria con rappresentato in colore azzurro l'andamento libero della temperatura e con colore rosso l'evoluzione che il medesimo incendio avrebbe con l'intervento delle squadre di soccorso con i seguenti valori ($T_{soccorso}$: 25 minuti; $T_{soccorso}$ 60 minuti e $T_{soccorso}$ 90 minuti).

Come si può notare nel primo caso l'intervento dei soccorsi avviene nella zona di operatività efficace. L'andamento della temperatura segue quello della curva RABT-ZTV. In realtà l'intervento delle squadre antincendio non riesce immediatamente ad interrompere l'innalzamento della temperatura (come invece avviene per l'evoluzione naturale dell'incendio) ma, in base al fatto che $T_{soccorso}$ considera anche il tempo equivalente necessario per ottenere la completa operatività delle squadre antincendio si può semplificare l'andamento della temperatura come mostrato in figura. Quando $T_{soccorso}$ ricade nella zona critica invece, le condizioni ambientali in cui operano i

soccorritori e l'evoluzione in fase avanzata dell'incendio non consentono alle squadre antincendio di operare in modo completamente efficace. Il modello di evoluzione della temperatura prevede in questo caso nella curva RABT-ZTV una fase più graduale della diminuzione dell'incremento della temperatura inserendo una fase in cui la temperatura cresce con inclinazione pari alla bisettrice tra l'andamento costante e l'evoluzione naturale dell'incendio. Se durante questa fase si superasse la temperatura di flashover la temperatura riprenderebbe ad evolvere in modo naturale rendendo totalmente inefficace l'intervento dei soccorsi, nel caso questo non succedesse l'andamento della temperatura seguirebbe quello schematizzato nelle curva RABT-ZTV.

Infine, come si evince dalla figura, qualora i soccorritori operassero con T_{soccorso} che comporta temperature superiori a quelle di flashover le squadre antincendio, non potendo operare, non hanno alcun effetto sull'evoluzione naturale dell'incendio.

3.7 Modello di evacuazione

Per poter valutare le conseguenze di un incidente ferroviario all'interno di una galleria è necessario poter stimare come gli utenti del sistema di trasporto possono applicare le procedure di auto salvataggio recandosi, nel minor tempo possibile presso i luoghi sicuri. Per fare ciò è necessario elaborare un modello d'esodo. In particolare in caso di scenario caldo, come per esempio in caso di incendio a un convoglio, le condizioni di vivibilità all'interno della galleria degradano in modo a volte rapido.

Infatti, nel caso di incendio di materiale rotabile, l'esodo avviene in presenza di fattori di rischio (irraggiamento, CO, ecc.): in tal senso il modello di esodo non può limitarsi a fornire una misura della velocità di deflusso in funzione delle dimensioni delle vie di fuga e delle misure di facilitazione, ma deve considerare anche le condizioni di visibilità/vivibilità lungo il percorso.

Considerando che l'entità del danno atteso è fondamentale nel calcolo del rischio e rappresenta una discriminante nella individuazione degli scenari critici, i risultati del modello di esodo non sono funzionali unicamente allo step di calcolo delle conseguenze ma costituiscono dati fondamentali per l'intero processo

Esistono diversi modelli presenti nella letteratura tecnica, tipicamente sviluppati per descrivere l'evacuazione da edifici, come ad esempio il modello di H. E. —Budll Nelson e F. W. Mowrer (SFPE Handbook), correlano tramite leggi lineari velocità di movimento degli esodanti S e densità di affollamento D lungo le vie di fuga:

$$S = k - akD$$

E 3. 32

dove

- S : velocità di movimento;
- D : densità di persone lungo la via di fuga;
- k : costante (m/s) dipendente dalle caratteristiche del percorso;
- a : area media occupata da una persona, pari a 0,266 m²/pers.

Lungo il percorso di esodo è definito un flusso specifico, F_s , da cui, moltiplicando per la larghezza effettiva W_e del percorso, si ottiene il flusso di esodo complessivo di persone F_c :

$$F_s = S \times D$$

E 3. 33

dove

- F_s : flusso specifico;
- D : densità di persone lungo la via di fuga

$$F_c = F_s \times W_e$$

E 3. 34

dove:

- F_c : flusso complessivo;
- F_s : flusso specifico;
- W_e : larghezza della via di fuga.

Gli andamenti della velocità di esodo sono riportati nella Figura seguente:

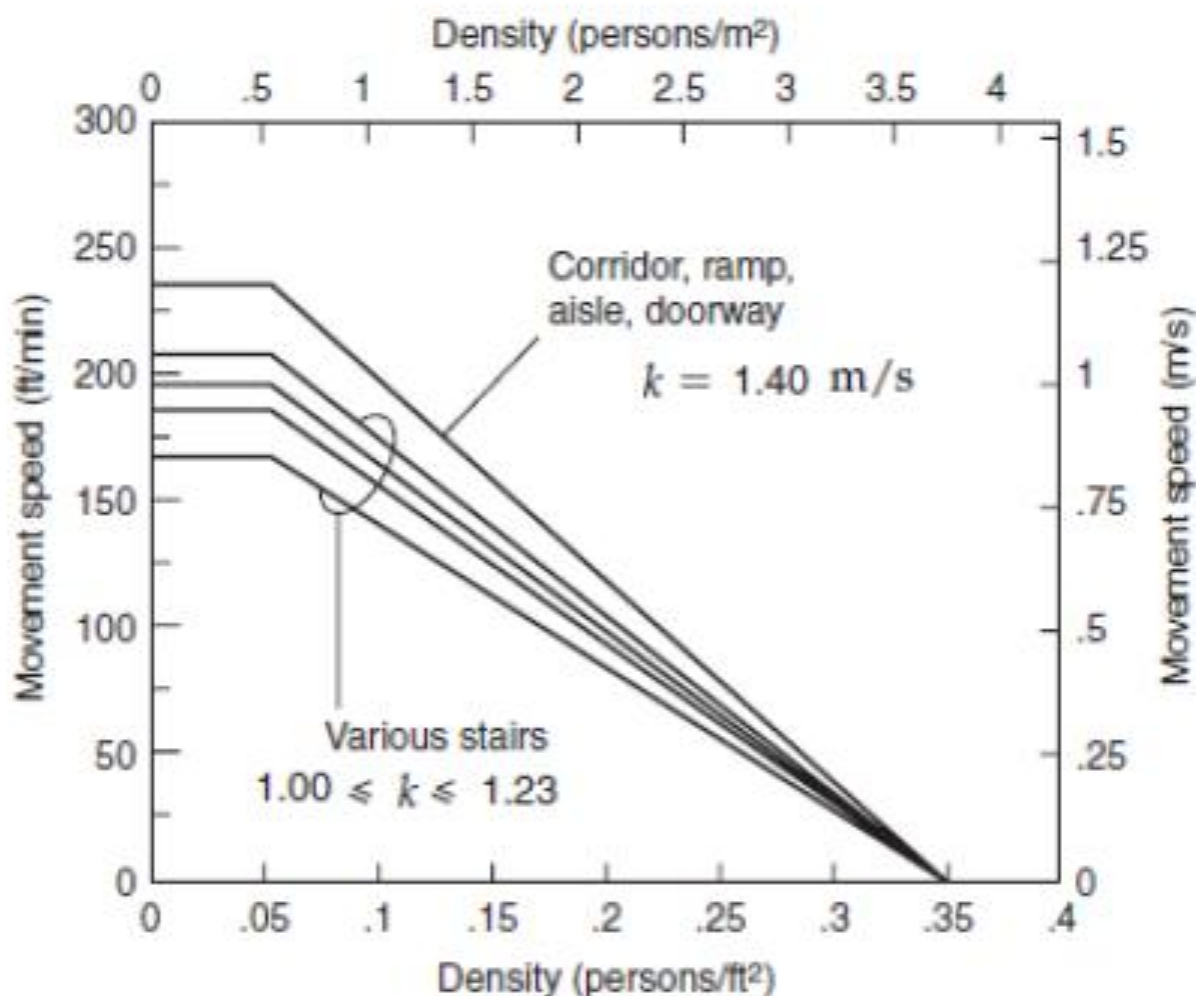


Figura 3. 14 Velocità in funzione della densità di persone: per densità inferiori a 0,5 pers/m² la velocità di esodo risulta pari a circa 1,19 m/s; per valori di densità superiori, la velocità decresce linearmente fino ad arrivare al valore nullo [42].

Ai fini della descrizione della dipendenza tra velocità e densità di persone tale modello può essere considerato valido anche per l'ambito ferroviario, ma va integrato con ulteriori correlazioni che includano tutte le variabili di influenza.

Ad esempio, il modello descritto non tiene conto delle riduzioni di velocità che possono derivare da condizioni di visibilità sfavorevoli, che si verificano talvolta in galleria a causa delle alte densità del fumo. A tale proposito esistono diversi studi citati ad esempio anche dalla normativa ISO/TR 13387 e dai manuali tecnici NFPA dedicati alla fire engineering, che quantificano l'effetto della densità di fumo sulla visibilità e quindi sulla velocità di esodo.

La Figura 3. 15 illustra l'andamento della velocità in funzione della visibilità, espressa in metri:

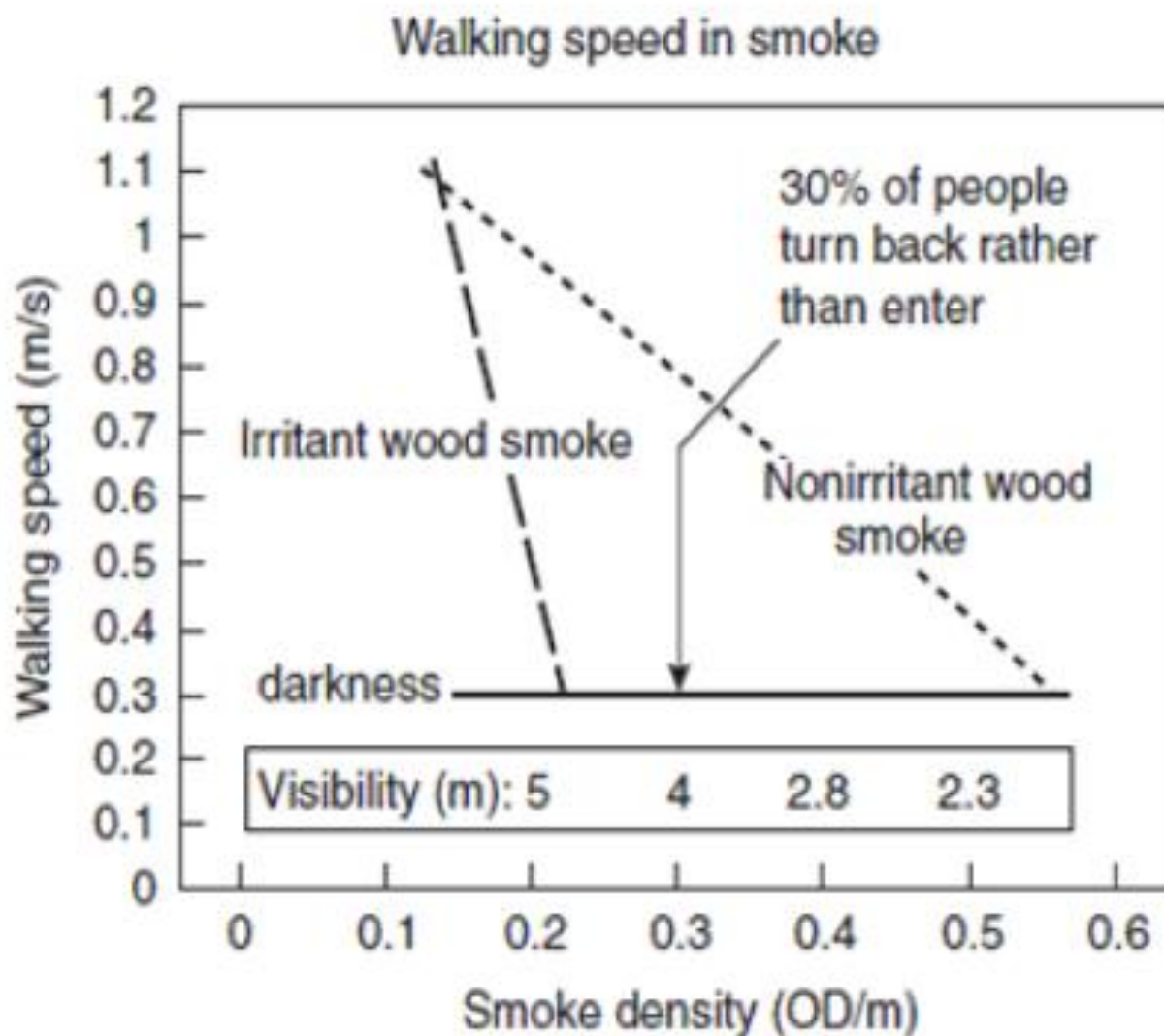


Figura 3. 15 Velocità in funzione della densità di fumo: il valore minimo della velocità è pari a 0,3 m/s, nel caso di completa oscurazione del percorso (*darkness*) e nei casi di visibilità inferiori a 5 m (*irritant smoke*) o inferiori a 2,3 m (*non irritant smoke*) [42]

L'implementazione di tale correlazione è stata realizzata suddividendo il marciapiede di esodo in nodi (moduli di estensione pari all'area antistante coppie di carrozze) e imponendo per ciascun nodo che la velocità degli esodanti sia la minima tra quella calcolata tramite il modello di Nelson e quella valutata confrontando le curve velocità/visibilità, in funzione della distanza dal focolaio.

Un ulteriore aspetto da considerare nell'adattamento al settore ferroviario di un modello per l'evacuazione da edifici è la maggiore probabilità di congestione che si può

verificare in galleria, date le dimensioni dei percorsi di esodo, caratterizzati da forti asimmetrie (larghezza minima pari a 0,5 m e lunghezza fino a 4 km). Per risolvere tali problematiche, sono stati applicati al modello i principi base di teoria delle code, ponendo ciascun modulo in relazione al successivo mediante equazioni di controllo che regolano il flusso lungo la sequenza, vincolando l'ingresso di esodanti in un nodo alla disponibilità di uno spazio almeno pari all'ingombro medio di una persona ($0,266 \text{ m}^2/\text{pers}$) (Ventura 2011 [42]).

Come spiegato in precedenza l'avvento dei soccorritori ha influenza sulle velocità di evacuazione per i seguenti aspetti:

- La presenza di soccorritori infonde sicurezza nelle persone presenti in galleria che di conseguenza possono eseguire le operazioni di auto salvataggio in modo più rapido.
- I soccorritori, con il loro intervento possono facilitare l'esodo alle persone con ridotta mobilità, si fa notare che la presenza di tali persone oltre a comportare un tempo di evacuazione più lungo per loro possono rallentare anche le persone con capacità di movimento superiore comportando un generale abbassamento della velocità di fuga attestandosi ai valori della persona più lenta.
- Qualora ci fosse scarsa visibilità, i soccorritori, abituati ad operare in tali condizioni possono condurre i passeggeri verso i luoghi sicuri in modo più rapido.

Preso atto delle considerazioni sopra riportate il modello di calcolo del rischio globale in emergenza considera l'influenza dei soccorritori durante un'evacuazione nel seguente modo.

Se $T_{\text{soccorso}} > T_{\text{evacuazione}}$ non si ha nessuna influenza.

$$T_{\text{evacuazione Fin}} = T_{\text{evacuazione}}$$

E 3. 35

Viceversa se T_{soccorso} risulta minore di $T_{\text{evacuazione}}$ si stima l'aumento della velocità d'esodo dei passeggeri presenti in galleria come una diminuzione del tempo di evacuazione del 25%. Tale aumento di velocità si verifica dall'istante successivo all'intervento dei soccorsi. Di conseguenza il nuovo tempo di evacuazione è così definito.

$$T_{\text{evacuazione Fin}} = T_{\text{soccorso}} + K (T_{\text{evacuazione}} - T_{\text{soccorso}})$$

E 3. 36

3.8 Costruzione di un modello integrato di valutazione del rischio in galleria.

Una volta analizzati gli aspetti che influenzano il rischio globale all'interno di una galleria ferroviaria, valutati quelli che caratterizzano ogni elemento e proposto modelli semplificati in grado di descrivere ogni componente del rischio studiata, è necessario individuare una metodologia in grado di considerare simultaneamente ogni aspetto per fornire una valutazione complessiva della sicurezza globale di ogni infrastruttura.

Per fare ciò è necessario analizzare criticamente l'interazione tra ogni sottomodello ed individuare per ognuno di essi i dati di ingresso specifici di ogni infrastruttura per ottenere il rischio totale.

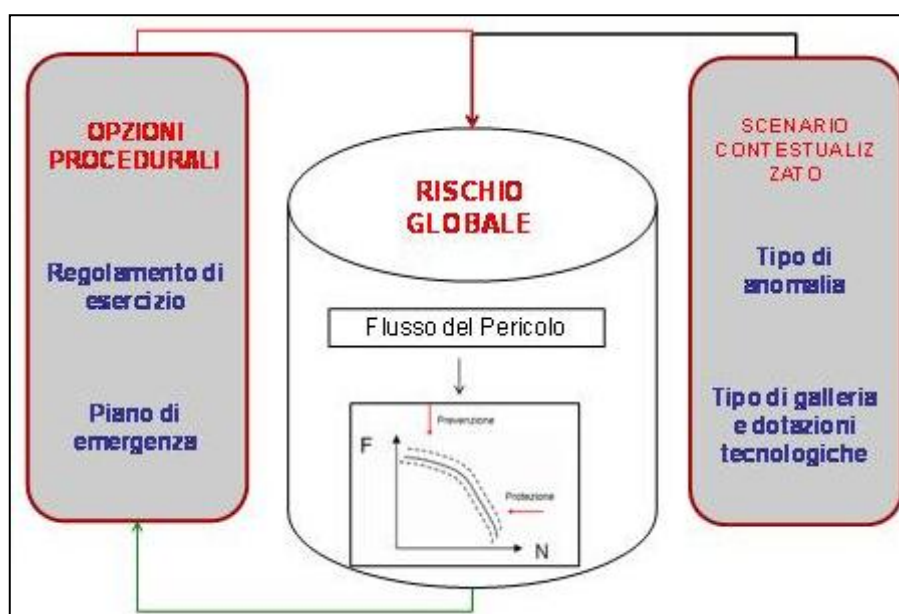


Figura 3. 16 Contributo delle componenti tecnico – strutturali e procedurali nella definizione del rischio globale

La valutazione del rischio, così come previsto dai riferimenti normativi, prevede lo studio della frequenza di incidente e l'analisi delle conseguenze derivanti da quest'ultimo. Nel modello integrato proposto i sottomodelli sopradescritti interagiscono secondo lo schema riportato per ottenere il rischio globale

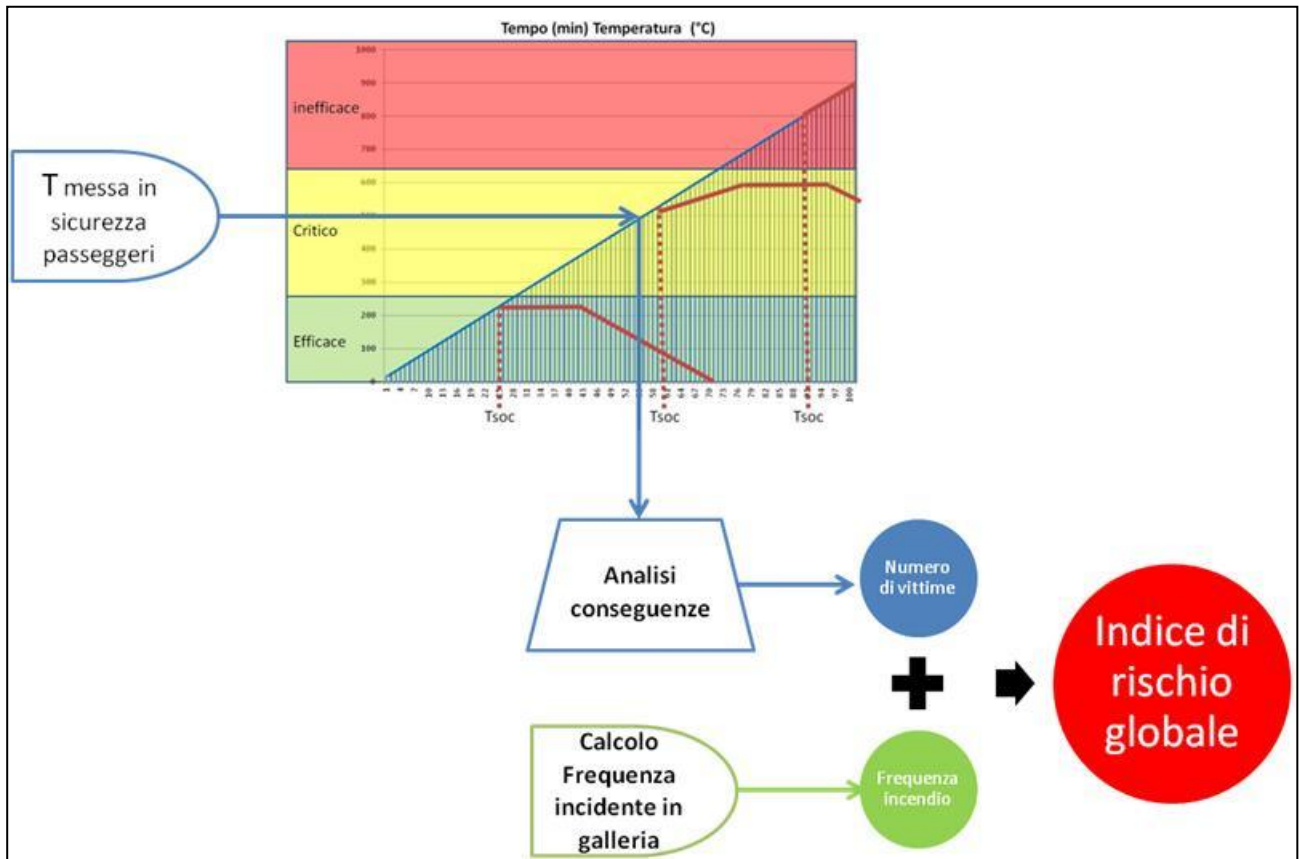


Figura 3. 17 Schema composizione modello integrato di valutazione del rischio Globale.

Il Calcolo del tempo necessario per la messa in sicurezza dei passeggeri è così definito:

$$T_{sicurezza\ passeggeri} = f(I_{attivazione}, T_{arresto}, I_{diffusione}, T_{evaquazioneFin})$$

Esplicitando i sottomodelli descritti si ottiene:

$$T_{sicurezza\ passeggeri} = \frac{\alpha_{rilevazione}}{2 \times I_{attivazione}} + T_{arresto} + (\gamma \times I_{diffusione} + \tau_{reazione} + T_{soccorso} + K(T_{evaquazione} - T_{soccorso}))$$

E 3. 37

Il modello di evoluzione dinamica dell'incendio è quello rappresentato nel grafico con evidenziata l'influenza delle squadre di soccorso mentre il modello di analisi delle conseguenze è quello reperito in letteratura e valutato su test reali di resistenza al calore. Il calcolo della frequenza di incidente in galleria, nel caso di incendio del convoglio senza svio o urto contro un ostacolo è il seguente:

$$F_i = P_{og} \times F_{it}$$

E 3. 38

In base al modello generato è possibile verificare quali parametri organizzativi e tecnico strutturali hanno influenza sull'indice di rischio globale. Nel prossimo capitolo verranno esaminati questi aspetti validandoli su casi reali.

Capitolo 4

Analisi e validazione del modello

Il seguente capitolo descrive i parametri di ingresso al modello e la cui combinazione contribuisce alla stima dell'indice di rischio globale. I parametri saranno suddivisi per tipologia: infrastrutturali, tecnologici e procedurali. Il modello sarà applicato a due gallerie reali più una galleria che rispetta i requisiti minimi fissati dalla normativa. Verrà poi svolta un'analisi di sensitività del rischio globale e saranno individuate le interrelazioni tra ogni componente del modello. In base ai risultati ottenuti saranno individuate le raccomandazioni utili alla redazione di un Piano di emergenza Esterno.

Nel capitolo vengono quindi descritti:

- Analisi dei parametri che definiscono il modello integrato di valutazione del rischio
- Analisi di casi di studio – incendio di un convoglio ferroviario in galleria;
- Analisi delle conseguenze;
- Analisi critica dei risultati;
- Adattamento del modello a sistemi antincendio reperiti in letteratura.

4.1 Analisi dei parametri che definiscono il modello integrato di valutazione del rischio

Alla luce del modello integrato presentato nel precedente capitolo è possibile individuare i dati di ingrosso del modello e suddividerli per tipologia.

Modello	Caratteristiche strutturali	Caratteristiche esercizio	dot. Convoglio	dot.galleria	dot soccorso	Procedure
Frequenza	Lunghezza (Tempo)	Velocità (Tempo), n° convogli	caratteristiche antincendio (Fit)			
T Rilevazione Anomalia			Rivelatore incendio (lattivazione)	rilevatore incendio / fumi (lattivazione)		segnalazione anomalia (lattivazione)
T arresto	lunghezza - presenza luoghi sicuri (S)	Velocità (V)		Sistema di arresto assistito		
T Autosalvataggio			diffusione sonora (I diffusione)	diffusione sonora segnaletica illuminazione (I diffusione)		
T soccorso					Dot soccorritori tempo di intervento (I dotazioni)	attivazione soccorsi (lattivazione)
T evacuazione	Larghezza marciapiede (We) dist. luogo sicuro (S)			ventilazione illuminazione (S: velocità di movimento)	Tempo di intervento	
Valutazione conseguenze	caratteristiche volta		resistenza incendio convoglio	ventilazione impianti spegnimento	intervento dei soccorsi	

Figura 4. 1 Elenco degli aspetti considerati nel modello integrato suddivisi per tipologia

In particolare si sottolinea che i parametri che vanno a influenzare la frequenza di un incendio di un convoglio in galleria dipende principalmente dal numero di veicoli transitanti in galleria e dalla tipologia di convoglio circolante (alcune caratteristiche costruttive influenzano la probabilità di incendio dello stesso).

Alla luce di quanto riportato è possibile individuare un pacchetto di azioni che possono essere messe in atto nel caso si rendessero necessarie misure di mitigazione del rischio nella galleria.

E' inoltre evidente che ogni intervento a favore di sicurezza comporta un impegno economico o una diminuzione di prestazioni del servizio, la possibilità di applicare

determinate azioni dipende dalle caratteristiche strutturali e dal contesto territoriale in cui è posizionata. Attraverso l'analisi dei risultati dell'indice di rischio globale rispetto alle azioni intraprese è possibile evidenziare le interdipendenze tra i differenti aspetti che influenzano il rischio nel modello evidenziando le differenti possibilità di azione per la mitigazione del rischio.

4.2 Analisi di casi di studio – incendio di un convoglio ferroviario in galleria

Per verificare l'efficacia del modello di valutazione della sicurezza globale in galleria è stato applicato su 2 gallerie reali e su una immaginaria conforme con i requisiti minimi stabiliti dalla normativa.

Per analizzare la problematica è stato individuato come scenario principale l'incendio di un convoglio all'interno della galleria senza impatti con la struttura o altri veicoli e senza svio. Tale scenario lascia aperte tutte le possibilità di soccorso e di arresto del convoglio presso un punto di esodo. In particolare permette di analizzare le due modalità di avvicinamento al punto di esodo utilizzando sistemi con arresto assistito o utilizzando le procedure tradizionali con marcia a vista.

4.2.1 Gallerie in esame

Le due gallerie analizzate nel presente studio sono di tipologia differente, la prima (che di seguito denominiamo galleria A) è di nuova costruzione e di lunghezza rilevante, nella quale esistono punti di esodo intermedi, alcuni dei quali dotati di sistema di arresto assistito. La seconda (galleria B) è rappresentativa della maggior parte delle gallerie presenti sulle linee non ad alta velocità, di lunghezza superiore ai 3 km e di costruzione non recente. Nello studio non sono state considerate alcune tipologie di gallerie, ancora presenti in numerose linee secondarie, dove le caratteristiche costruttive (limiti di sagoma, assenza di marciapiede e ventilazione forzata) renderebbero impossibile valutare molti aspetti legati alla gestione ottimale dell'emergenza.

I dati utili per l'applicazione del modello sono riportati nella seguente tabella e sono raggruppati per tipologia di fase della gestione emergenziale. In base ai dati sotto riportati sarà di seguito possibile analizzare ogni sottomodulo utilizzato.

	Galleria B	Galleria A
Condizioni al contorno	Lunghezza	18204
	pendenza max	15
	Presenza sistema di ventilazione	Controllo fumi nella finestra
Autosalvataggio	Caratteristiche strutturali galleria	Doppio binario naturale
	Presenza sistema di spegnimento	nelle nicchie idranti UNI 45, il valore di pressione nominale PN 16
	modalità di arresto del convoglio ferroviario presso il punto di esodo	Assistita finestra cartone, tradizionale cunicoli VVF
	punti sicuri	Punti di esodo alle seguenti progressive - al km 69+302, lunga m 266. - km 73+697, - km 80+214. - al km 81+560
	Segnaletica di emergenza	Impianto illuminazione in emergenza con cabina enel diffusione sonora
	vie di fuga e loro dimensione	marciapiede 70 cm - Segnaletica demergenza
	Tortuosità della via d'esodo fino a cielo aperto	da imbocchi
	Sistema di rivelazione anomalie	no
	modello di allertamento soccorsi	si
	Allertamento	Distanza galleria dal più vicino presidio VF
Presenza di un piazzale d'attesa nei pressi dell'uscita		si
Possibilità di ingresso alla gallerie con veicoli di soccorso		NO - solo veicoli ferroviari
Dotazioni di ausilio ai soccorsi e possibilità di allestimento di un PMA		si (imbocco NORD)
Attivazione	via d'accesso al tunnel	da imbocco
	Velocità massima	150 km/h
	Flusso medio giornaliero	89 treni
Frequenza	% merci pericloose	16
		Accesso a galleria con veicoli si -piazzola elisoccorso
		SI - video sorveglianza più centro gestione emergenza
		si
		300
		239

4.2.1 Calcolo della probabilità di accadimento

La frequenza d'incendio di un treno in galleria è definita come:

$$Fi = Pog \times Fit \quad E 4. 1$$

dove

- Pog: probabilità che la galleria sia occupata da un treno

$$Pog = \frac{Ng \times Tg}{T} \quad E 4. 2$$

dove

- Ng: numero di treni che transitano nella galleria nel tempo T [esempio treni / giorno];
- Tg: tempo di percorrenza in esercizio della galleria per un treno [minuti];
- T: Tempo di riferimento [anno];
- Fit: Frequenza di incendio di un treno [incendi/anno].

$$Fit = \frac{Ni}{Ts} \quad E 4. 3$$

dove

- Ni: Numero di incendi che si verificano in media in Ts;
- Ts: Tempo di riferimento (Es: vita utile di un treno).

Si riporta nella tabella sottostante i valori calcolati per le gallerie in esame.

Tabella 4. 1 Risultati calcolo frequenza incendio per le 2 gallerie

	Galleria A	Galleria B
VT [Treni/giorno]	239	89
L [km]	18,2	3,7
Velocità [km/h]	300	150
tempo [Min]	3,64	1,48
Tempo totale annuo [min]	5292	801
Pog	0,60	0,09
Fit [incendi/anno]	0,00001	0,00001
Fi [incendi/anno]	0,000006	0,000001

4.2.2 Valutazione di sistemi di rilevazione anomalia

Si ipotizza che entrambe le gallerie siano percorse dai medesimi convogli. A titolo di esempio, e per la successiva analisi di sensitività si calcolano i possibili tempi di rilevazione anomalia.

$$TRilevazione\ Anomalia = \frac{\alpha\ rilevazione}{2 \times lattivazione}$$

E 4. 4

Dove l'indice di attivazione "*lattivazione*" assume i seguenti valori:

- 0,25 in caso di assenza totale di dispositivi di rilevazione anomalia;
- 1 in caso di assenza di dispositivi ma con presenza di sistemi di allertamento manuale (quali per esempio pulsanti di emergenza o interfono a bordo dei convogli);
- 2 sistema di rilevazione automatizzato.

Mentre $\alpha\ rilevazione$ è il tempo minimo di rilevazione incendio stimato per esempio pari a 120 s.

Di conseguenza *TRilevazione Anomalia* può assumere i seguenti valori:

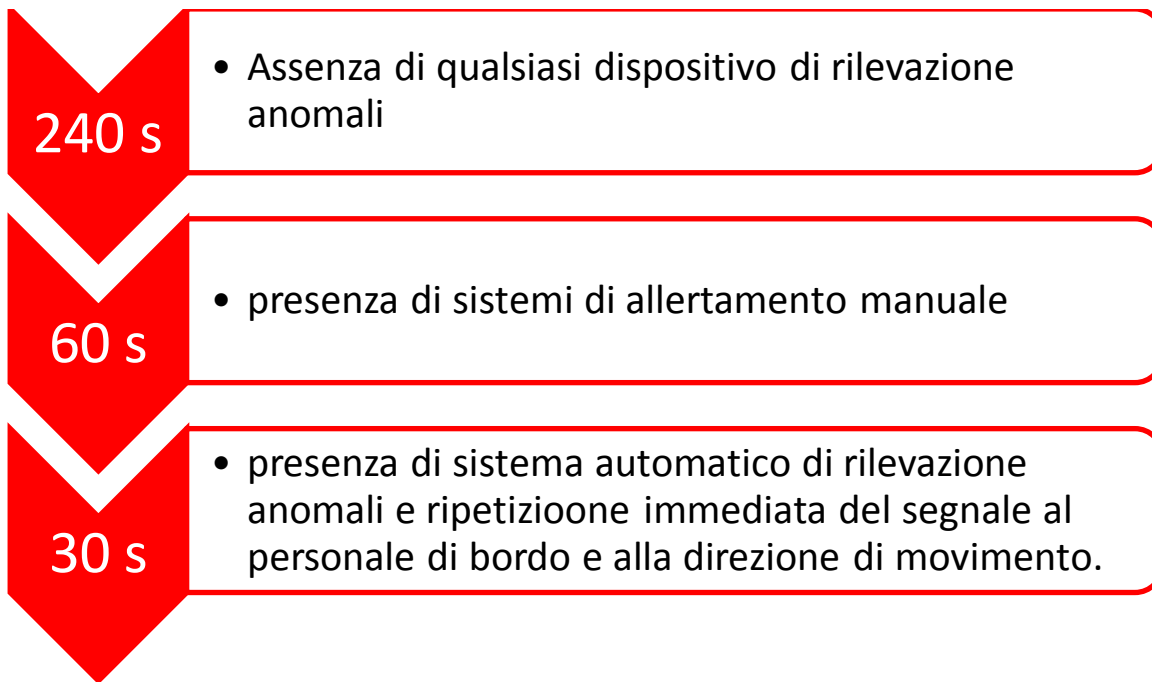


Figura 4. 2 Valori di *TRilevazione Anomalia* in secondi

Si ricorda che i sistemi di rilevazione anomalia dipende dalla tipologia di veicoli in transito e non dalle dotazioni tecnologiche all'interno della galleria. In caso di incendio i sensori all'interno del convoglio possono rilevare con tempi più brevi un principio di incendio mentre, la strumentazione all'interno della galleria, quale per esempio telecamere o opacimetri riescono a riconoscere l'anomalia solamente a valle della produzione di discrete quantità di fumo che fuoriescono dalla carrozza. Di conseguenza, ipotizzando che le 2 gallerie siano percorse dai medesimi treni, dotati di sistemi di allertamento manuali si può stimare per entrambe le gallerie un tempo di attivazione pari a 60 secondi.

4.2.3 Arresto convoglio in emergenza

Il tempo di arresto di un convoglio ferroviario in emergenze dipende dai seguenti aspetti:

- Velocità di marcia;
- Posizione del veicolo all'attivazione della procedura di arresto;
- Posizionamento dei punti di esodo all'interno della galleria e loro dotazione (presenza di punti di esodo con sistema di arresto assistito).

Le gallerie considerate nello studio presentano aspetti strutturali differenti. Infatti la galleria A è dotata di punti di esodo interni alla stessa raggiungibili dai veicoli di soccorso e di una finestra della lunghezza del convoglio dotata di un sistema di ventilazione trasversale

mentre nella galleria B non sono presenti punti di esodo e qualora praticabile il convoglio dovrebbe continuare la corsa per arrestarsi nelle vicinanze del piazzale di posizionato all'uscita dalla stessa.

4.2.4.1 Scelta della migliore modalità di arresto per la galleria A

Nella galleria A invece sono presenti 6 punti di esodo che permettono contestualmente l'accesso dei soccorritori con veicoli di soccorso, di questi solamente uno dotato di sistema di arresto assistito e ventilazione trasversale. Si mostra nel dettaglio le dotazioni della galleria:



Figura 4. 3 Andamento altimetrico galleria A

La galleria A si sviluppa dal km 64+655 al km 82+859 per m 18.204.

La galleria ha una finestra 2 al km 69+302, lunga di m 266. La pendenza della finestra è del 13,93% circa. Questa galleria, dal punto di esodo 3 al 4, ha un cunicolo di servizio ed emergenza, che sviluppa m 9298, scavato con fresa ed un ramo di m 1349 scavato in tradizionale per un totale di m 10.647. Gli imbocchi di questo cunicolo sono tre:

- n°3 al km 73+697;
- n° 4 al km 80+214;
- n°5 , al km 81+560.

Inoltre il tratto finale della galleria dal km 81+560 al km 82+859 è costruito in artificiale, a paratie. L'andamento planimetrico della galleria è a schiena d'asino ed a corda molle, con un tratto in ascesa dall'imbocco nord del 2,27 per mille per m 2109,86, del 7,56 per mille per 3411,97 m, ed un tratto di discesa verso l'imbocco sud del 15 per mille per 12.046, 36 m, del 9,22 per mille per 437,82 m ed un tratto finale in ascesa verso l'imbocco sud del 13,21 per mille per m 198,16.

Tabella 4. 2 progressiva dei punti di esodo per la galleria A

Nome	Progressiva Km
1	64+655
2	69+302
3	73+697
4	80+214
5	81+560
6	82+859

Dei punti di esodo solamente la finestra 2 è dotata di un sistema di ventilazione e aspirazione fumi in emergenza mentre le altre finestre sono principalmente punti di accesso dei soccorritori che possono arrivare fino al sedime ferroviario con veicoli gommati.

La finestra 2 è dotata di un sistema di arresto assistito del convoglio.

Nella galleria in oggetto il Regolamento di esercizio non specifica quando risulta opportuno adottare l'arresto tradizionale presso uno qualsiasi dei punti d'esodo o quando, magari anche comportando un allungamento dello spazio da percorrere è più utile utilizzare la fermata assistita proseguendo fino alla finestra 2. Per valutare questi aspetti è stato scelto come scenario principale l'incendio di un convoglio all'interno della galleria senza impatti con la struttura o altri veicoli e senza svio. Tale scenario lascia aperte tutte le possibilità di soccorso e di arresto del convoglio presso un punto di esodo. In particolare sono state analizzate le due modalità di avvicinamento al punto di esodo utilizzando sistemi con arresto assistito o utilizzando le procedure tradizionali con marcia a vista.

Immaginando la situazione più sfavorevole rispetto alla fermata assistita possiamo considerare che al verificarsi dell'incendio il convoglio effettua una frenata di emergenza e si arresta nella zona sicura n° 6 al km 81+560. Considerando che lo spazio di arresto è superiore ai 1800 m. la procedura di arresto doveva partire 800 metri prima dell'imbocco della galleria. Dirigere il convoglio fino alla finestra 2 (69+302) comporta un aumento di viaggio di circa 12+260 km. Considerando che nella versione ottimale il convoglio potrebbe procedere a velocità di regime per poi effettuare una fermata con decelerazioni simili a quella di emergenza in questo caso la perdita di tempo sarebbe di meno di 3 minuti. Applicando una decelerazione più dolce anche ipotizzando un raddoppio del tempo perso consideriamo un aumento di tempo di 6 minuti

Considerando che la scarsa visibilità comporta un aumento del tempo di evacuazione di circa 30 minuti, si può valutare che, per la galleria A, nella condizione in cui l'arresto tradizionale è più favorevole rispetto a quella assistita, nella stima finale dei tempi di evacuazione delle persone presenti sul convoglio l'applicazione della fermata assistita presso la finestra 2 comporta nel complesso la diminuzione di 24 minuti rispetto al punto d'esodo n° 5.

In base alle considerazioni fatte, per la galleria A, il regolamento di esercizio dovrebbe prevedere l'applicazione senza discrezionalità della procedura di arresto assistita.

4.2.4.2 Calcolo dei tempi di arresto per le 2 gallerie in esame

Per poter verificare l'apporto dell'arresto del convoglio nelle due gallerie bisogna considerare lo scenario di un guasto al treno con incendio. Al momento dell'innesco dell'incendio si verifica un malfunzionamento nel locomotore che comporta una decelerazione dello stesso (non programmata) pari a 1,5 m/s fino all'arresto del convoglio esattamente al centro della galleria.

Tabella 4. 3 Tempi di arresto del convoglio per le due gallerie in esame

	V [km/h]	d [m/s ²]	Tempo [s]
Galleria A	300	1,5	56
Galleria B	150	1,5	28

4.2.4 Attivazione delle procedure di auto salvataggio

Richiamando il sottomodulo spiegato nel capitolo 4 si ottiene:

$$T_{reazione} = \gamma \times I_{diffusione} + \tau_{reazione} \quad E 4.5$$

dove

- l'indice di diffusione (*Idiffusione*) assume i seguenti valori in base alle dotazioni presenti:
 - 0 se l'illuminazione la segnaletica sono conformi ed è presente un sistema di diffusione sonora in emergenza;
 - 1 se l'illuminazione e la segnaletica sono presenti ma non conformi;
 - 2 se l'illuminazione e la segnaletica sono presenti ma non conformi e manca l'impianto di diffusione sonora;
 - 4 se non risulta alcun dispositivo presente.
- γ è un parametro di conversione dell'indice di diffusione stimato in 60 s.
- $\tau_{reazione}$ è il tempo minimo di presa di coscienza degli utenti della situazione critica per la messa in atto delle procedure di auto salvataggio stimato (fonte AIPCR) in 120 s.

Galleria A: l'impianto di illuminazione, la segnaletica e la diffusione sonora sono conformi, quindi per questa tipologia di galleria *Idiffusione* è nullo e di conseguenza i tempi di reazione siano ottimali ovvero pari a 2 minuti.

Galleria B: non esiste un impianto di diffusione sonora e l'impianto di illuminazione non è conforme, esiste la segnalazione delle nicchie di salvataggio ma in caso di incendio di grosse dimensioni non sono la soluzione ottimale e risulta opportuno permettere l'esodo delle persone presenti fino all'imbocco della galleria più vicino. Si ritiene che tali mancanze possono causare delle perdite di tempo delle persone presenti in galleria nella messa in pratica delle corrette procedure stimate in letteratura tra i 2 e i 5 minuti (PIARC per veicoli stradali).

Idiffusione : 2

Viste le carenze tecniche si valuta un aggravio in termini di tempo pari a 240 secondi pari quindi a 4 minuti.

4.2.5 Evacuazione

Per valutare le prestazioni in termini di tempi di evacuazione si ipotizza l'arresto di un convoglio nel quale sono presenti 350 persone suddivise equamente in 10 carrozze (lungo 26 metri)

GALLERIA A

La galleria ha impianto di ventilazione in emergenza alla finestra, il marciapiede è largo 70 cm (non conforme con la direttiva europea e italiana).

Ipotizzato che l'incendio non comporti fumi che possono pregiudicare la visibilità

$FC = 0,490849$, da cui deriva un tempo di 11 minuti circa

Nel caso la presenza di fumi rendesse la visibilità inferiore ai 3 metri

$FC = 0,261786$, da cui deriva un tempo di 22 min circa.

E' necessario considerare che nella galleria A sono presenti, oltre agli imbocchi 4 luoghi sicuri dove è garantito l'accesso al tunnel dei soccorritori e l'eventuale esodo delle persone presenti in galleria. Tra queste una finestra di lunghezza 266m (pari circa a quella di un convoglio ferroviario) situata a 4647m dall'imbocco Nord e 12258 m dall' imbocco Sud nella quale è presente un sistema di ventilazione semitrasversale che dovrebbe scongiurare lo sviluppo di fumi e la diffusione di calore con tempistiche tali da pregiudicare l'evacuazione delle persone e i soccorsi. In generale l'evacuazione del convoglio fermo in prossimità di un punto sicuro dovrebbe concludersi dell'arco di 13 minuti, nel caso di visibilità limitata con un tempo massimo di 24 minuti considerando i 2 minuti stimati come tempo di reazione ottimale.

GALLERIA B

La galleria non ha impianto di ventilazione in emergenza, il marciapiede è largo 50 cm (non conforme con la direttiva europea e italiana)

nel caso in cui l'incendio non comporti fumi che possono pregiudicare la visibilità

$FC = 0,235224$ da cui deriva un tempo di 24 min circa.

A questa stima deve poi essere aggiunta il tempo di percorrenza della distanza tra il punto dove il convoglio è fermo e l'imbocco più vicino della galleria. Su questo è da considerare che a distanze notevoli la visibilità può risultare compromessa, ma nelle vicinanze dell'imbocco la velocità di evacuazione può incrementare notevolmente.

Nel caso la presenza di fumi rendesse la visibilità inferiore ai 3 metri

$FC = 0,10692$ da cui deriva un tempo di 54 min circa.

Come si può notare le condizioni di visibilità pregiudicate comportano una perdita di tempo massima stimata in circa 30 minuti. Tale aspetto risulta molto rilevante in considerazione della completa assenza di sistemi di ventilazione d'emergenza all'interno della galleria.

In base a quanto stimato e ai tempi di reazione e di messa in atto delle tecniche di auto salvataggio si può ipotizzare una evacuazione dal convoglio di circa 30 minuti per eventi in cui il fumo non pregiudica la visibilità e in un ora qualora la visibilità scendesse sotto i 5 metri. A questi tempi deve aggiungersi il tempo in cui le persone presenti in galleria raggiungono l'imbocco, bisogna però considerare che raggiunta una distanza sufficiente dall'incendio le condizioni di vivibilità all'interno del tunnel non comportano elevata criticità. Inoltre è necessario considerare che, qualora nel convoglio si trovassero persone con elevate difficoltà motorie, che possono anche essere conseguenti all'evento incidentale, tali persone non sono in grado di mettere in atto procedure di auto salvataggio e per mitigare le conseguenze dell'incendio su di loro è indispensabile l'intervento tempestivo di soccorritori addestrati.

Galleria ipotetica che considera la larghezza marciapiede conforme alla direttiva

$FC = 0,588363$ da cui deriva un tempo di 10 minuti circa

Nel caso la presenza di fumi rendesse la visibilità inferiore ai 3 metri

$FC = 0,346096$ da cui deriva un tempo di 17 min circa

A questi vanno aggiunti circa 2 minuti stimati come tempi di reazione delle persone presenti in galleria.

Si riporta un estratto del modello di calcolo dei tempi riportati.

Tabella 4. 4 Risultati del calcolo del tempo di evacuazione nelle gallerie in esame

Galleria B			Galleria A			Requisiti minimi			
larghezza	0,5		larghezza	0,7		larghezza	0,75		SENZA FUMO
Lunghezza	500		Lunghezza	500		Lunghezza	500		
numero di persone	350		numero di persone	350		numero di persone	350		
N carrozze	10		N carrozze	10		N carrozze	10		
L carrozza	26		L carrozza	26		L carrozza	26		
area	lunghezza	286,5	area	lunghezza	286,7	area	lunghezza	286,75	
	larghezza	0,5		larghezza	0,7		larghezza	0,75	
		143,25			200,69			215,0625	
Densità		2,443281	Densità		1,743983	Densità		1,627434	
velocità		0,55	velocità		0,75	velocità		0,85	
V effettiva	0,235224		V effettiva	0,490849		V effettiva	0,588363		
Tempo	1487,941		Tempo	713,0504		Tempo	594,8711		
	24,79901			11,88417			9,914518		

Galleria B			Galleria A			Requisiti minimi			
larghezza	0,5		larghezza	0,7		larghezza	0,75		CON visibilità ridotta
Lunghezza	500		Lunghezza	500		Lunghezza	500		
numero di persone	350		numero di persone	350		numero di persone	350		
N carrozze	10		N carrozze	10		N carrozze	10		
L carrozza	26		L carrozza	26		L carrozza	26		
area	lunghezza	286,5	area	lunghezza	286,7	area	lunghezza	286,75	
	larghezza	0,5		larghezza	0,7		larghezza	0,75	
		143,25			200,69			215,0625	
Densità		2,443281	Densità		1,743983	Densità		1,627434	
velocità		0,25	velocità		0,4	velocità		0,5	
V effettiva	0,10692		V effettiva	0,261786		V effettiva	0,346096		
Tempo	3273,47		Tempo	1336,97		Tempo	1011,281		
	54,55783			22,28283			16,85468		

I tempi calcolati sono quelli relativi al passaggio da un immaginario cancello di uscita posto nei pressi del binario dove il treno è arrestato. Tale tempistica è dunque verificata qualora il convoglio si fermi in corrispondenza di un punto di esodo. Nel caso il convoglio si fosse fermato in un punto della galleria distante da un punto d'esodo ai tempi calcolati deve essere aggiunto il tempo per i passeggeri per raggiungere il punto d'esodo camminando lungo il marciapiede. Bisogna considerare che all'aumentare della distanza dal convoglio incendiato la temperatura decade rapidamente e le condizioni di vivibilità in galleria migliorano rapidamente.

Considerando la velocità di fuga lungo il marciapiede un normale passeggero dovrà percorrere (si ipotizza una velocità di esodo elevata pari a 1 m/s considerato che tale deflusso avviene in una posizione dove gli effetti negativi dell'incendio sono fortemente mitigati).

Tabella 4. 5 Tempi di marcia dei passeggeri presenti in galleria

	Distanza [m]	Tempo [min]
Galleria A	60	1
Galleria B	1830	30,5

L'arresto al centro della galleria risulta essere quello più penalizzante per la galleria B, se si considerasse per la galleria A anziché l'arresto al centro nel punto più distante tra 2 punti di esodo lo spazio da percorrere per i passeggeri può arrivare a 3250 m che comporterebbe un tempo di circa 55 minuti per arrivare fino al più vicino punto d'esodo (condizione peggiore galleria A che presenta una distanza massima di 6,5 km tra 2 vie di fuga consecutive).

Tabella 4. 6 Tempi di marcia dei passeggeri presenti in galleria con convoglio fermo a centro galleria

	Distanza [m]	Tempo [min]
Galleria A	3250	54,2
Galleria B	1830	30,5

4.2.6 Valutazione dei soccorsi

Il tempo di intervento dei soccorsi dipende dai seguenti aspetti:

- Tempo di attivazione dei soccorsi (T_{al});
- Tempo necessario per la più vicina squadra di soccorso per recarsi nella parte di galleria interessata dall'incendio (T_{per});
- Capacità operativa delle squadre di soccorso (T_{op}) che dipende dalle dotazioni della squadra stessa, dalla tipologia di galleria e dalle sue dotazioni di sicurezza (es dotazioni della galleria con idranti come previsto da normativa).

$$T_{\text{soccorso}} = T_{\text{allertamento}} + T_{\text{avvicinamento}} + T_{\text{intervento}}$$

Nel caso in esame possiamo calcolare i seguenti tempi:

Galleria A

$$T_{\text{allertamento}} = T_{\text{rilevazione anomalia}} \times I_{\text{procedure}} = 240 \text{ s} \times 2 = 480 \text{ s} = 8 \text{ min}$$

$$T_{\text{avvicinamento}} = \frac{\text{distanza} \times I_{\text{tortuosità}}}{\text{Velocità Media}} = 35 \text{ minuti}$$

$$T = 23 \text{ min};$$

$$I_{\text{tortuosità}} = 1,5;$$

$$T_{\text{dotazioni}} = 300 \text{ sec} = 5 \text{ min};$$

$$T_{\text{soccorso}} = 48 \text{ min.}$$

Ne deriva il seguente andamento della temperature.

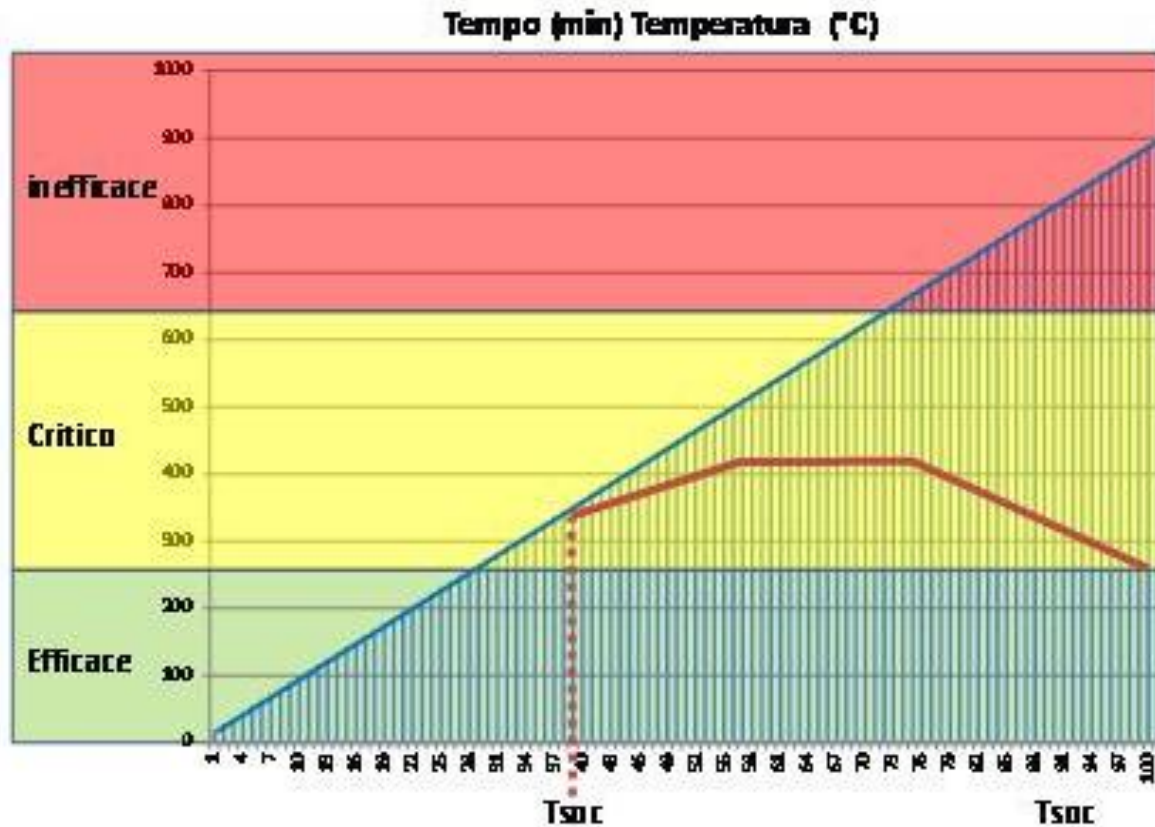


Figura 4. 4 Rappresentazione dell'andamento della temperatura con intervento delle squadre di soccorso per la galleria A

Galleria B

$$T_{allertamento} = T_{rilevazione\ anomalia} \times I_{procedure} = 240\text{ s} \times 2 = 480\text{ s} = 8\text{ min}$$

$$T_{avvicinamento} = \frac{\text{distanza} \times I_{tortuosità}}{\text{Velocità Media}} = 26\text{ minuti}$$

$$T_{dotazioni} = 300\text{ s} = 5\text{ min};$$

$$T_{soccorso} = 39\text{ min};$$

Ne deriva il seguente andamento della temperature

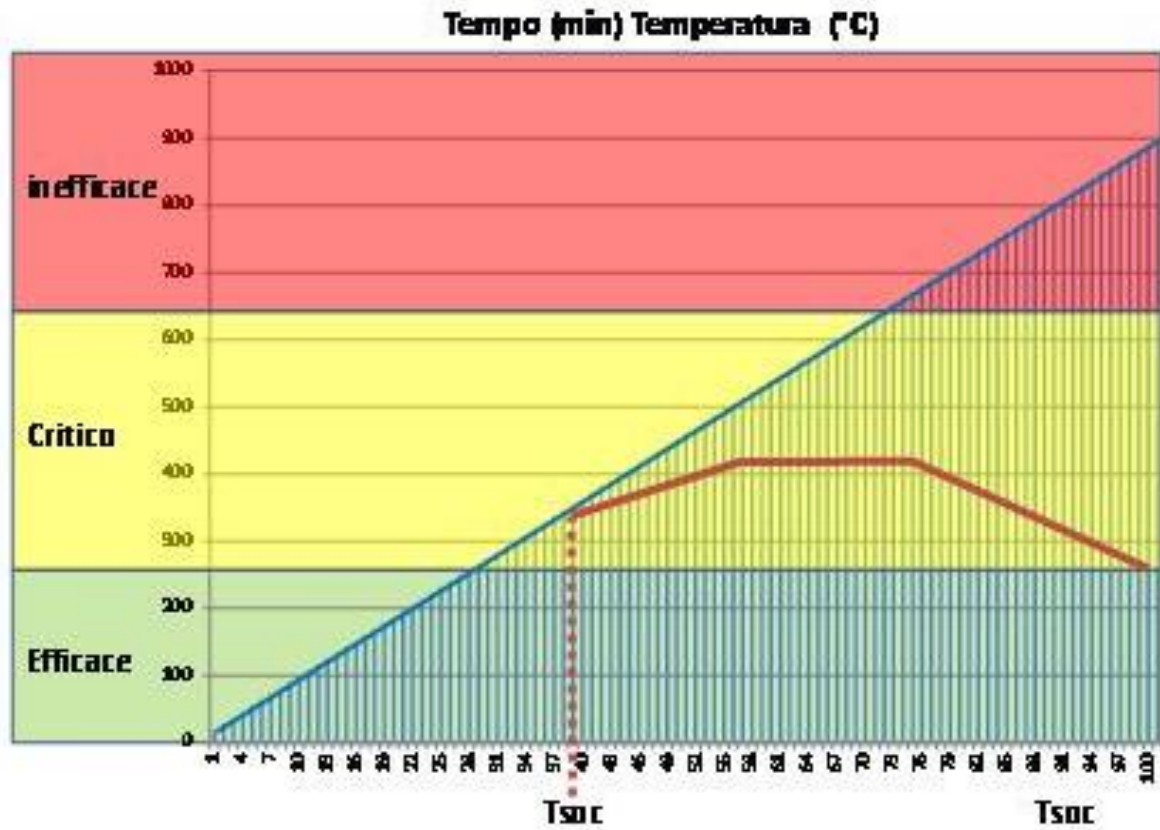


Figura 4. 5 Rappresentazione dell'andamento della temperatura con intervento delle squadre di soccorso per la galleria B

4.2.7 Stima delle conseguenze

Calcolo conseguenze con buona visibilità

Galleria A

Buona visibilità :

- T evaq = 14 min;
- Temperatura max = 143 °C;
- Temperatura min = 20 °C;
- Temperatura media = 81,5 °C.

Ne consegue che per portare alla morte un passeggero dovrebbero passare 17 minuti, di conseguenza non si registrano fatalità per questo scenario.

Galleria B:

Buona visibilità :

- T evaq =30 min;
- Temperatura max = 284 °C;
- Temperatura min = 20 °C;
- Temperatura media= 152 °C.

Dopo circa 14 minuti la temperatura raggiunge i 140°C di conseguenza dopo 19 (5 minuti di tempo di esposizione) minuti si può immaginare che le persone presenti non sopravvivrebbero.

Considerando i 5 minuti di tempo di reazione considerando la velocità effettiva è 14 minuti, si salverebbero 198 persone e ne conseguono 152 fatalità.

Se la galleria fosse dotata di sistema di diffusione sonora e di altri strumenti di ausilio alle persone presenti per l'applicazione corretta delle procedure di auto salvataggio il tempo di reazione potrebbe scendere a 2 minuti, in questo caso il tempo disponibile per allontanarsi dalla zona rischiosa sale a 17, ne consegue che si salverebbero 240 persone. La sensitività, per lo scenario considerato relativa alla corretta comunicazione è di 42 fatalità evitate.

In questo caso il tempo di arrivo dei soccorritori è superiore a quello di evacuazione, di conseguenza il loro intervento non ha alcun effetto sul salvataggio delle persone.

Galleria conforme con la direttiva

Buona visibilità :

- T evaq = 12 min;
- Temperatura max = 126 °C;
- Temperatura min = 20 °C;
- Temperatura media = 73 °C.

Ne consegue che per portare alla morte un passeggero dovrebbero passare 17 minuti, di conseguenza non si registrano fatalità per questo scenario.

Calcolo conseguenze con cattiva visibilità

Galleria A

Cattiva visibilità:

T evaq =24 min. di conseguenza 19 min. considerando i 5 minuti di sopravvivenza

Tabella 4. 7 Valutazione conseguenze galleria A con scarsa visibilità

T reazione [min.]	2
T evaq [min.]	25
Temperatura max [°C]	240
Temperatura min [°C]	20
Temperatura media [°C]	130

Si salvano 220 persone.

Galleria B:

Cattiva visibilità: T evaq =60 min.

Tabella 4. 8 Valutazione conseguenze galleria B con scarsa visibilità

T reazione [min.]	5
T evaq [min.]	60
Temperatura max [°C]	548
Temperatura min [°C]	20
Temperatura media [°C]	284

Si salvano 90 persone.

In questo caso se la comunicazione fosse data in modo tempestivo si sarebbero salvate 110 persone.

Con l'intervento dei soccorritori la temperatura massima non è di 548°C ma si attesta a 410 °C, inoltre il tempo di evacuazione non risulterebbe più di 60 minuti ma utilizzando la formula corretta

$$T_{evaquazione\ Fin} = T_{soccorso} + K (T_{evaquazione} - T_{soccorso})$$

Risulterebbe

$$T_{evaquazione\ Fin} = 39 + 0,75 (60 - 39) = 54,75 \text{ approssimato a } 55 \text{ minuti}$$

Galleria conforme con la direttiva

Cattiva visibilità:

Tabella 4. 9 Valutazione conseguenze galleria conforme alla direttiva con scarsa visibilità

T reazione [min.]	2
T evaq [min.]	19
Temperatura max [°C]	187
Temperatura min [°C]	20
Temperatura media [°C]	103,5

Si salvano 290 persone.

4.2.8 Risultati conclusivi

Considerando lo scenario incendio a convoglio ferroviario con 350 passeggeri nelle 2 gallerie e interfacciando la probabilità con le conseguenze stimate otteniamo i seguenti risultati

In caso fosse garantita una buona visibilità

Galleria A: 6×10^{-6} – 0 vittime

Galleria B: 6×10^{-6} – 152 vittime

In caso fosse garantita visibilità inferiore ai 3 m

Galleria A: 1587677(XTa) o 5292 ore – 120 vittime

Galleria B: 120195 (XTa) o 801 ore – 260 vittime

4.3 Analisi delle conseguenze

L'applicazione del modello integrato su 2 casi reali permette di verificare le influenze dei differenti parametri del modello sulla sicurezza globale e di evidenziare le interrelazioni tra gli stessi.

Nel calcolare i tempi derivanti dalle differenti componenti considerate nel modello per la messa in sicurezza delle persone presenti all'interno della galleria si possono evincere facilmente le voci con maggior influenza sulla sicurezza totale.

Galleria A:

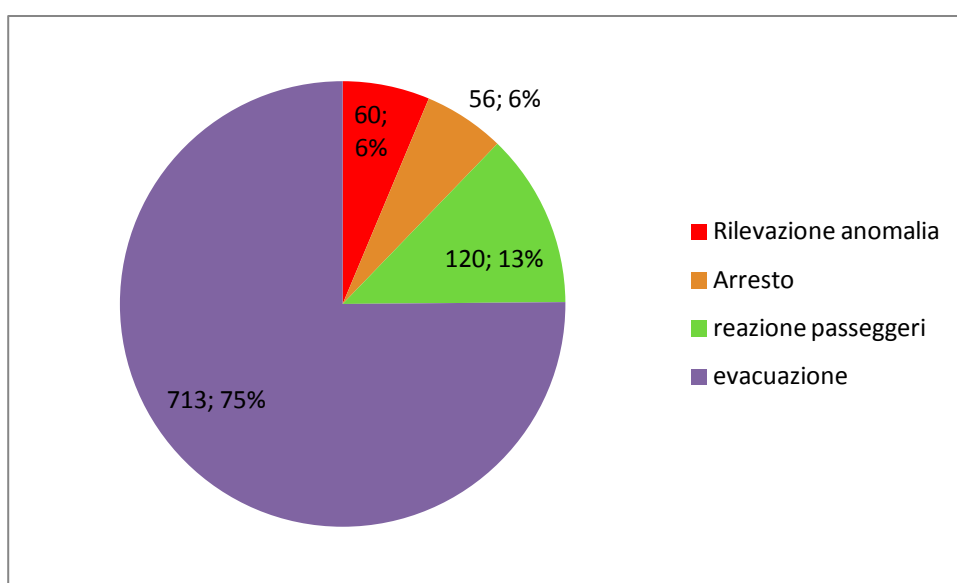


Figura 4. 6 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria A

Galleria B:

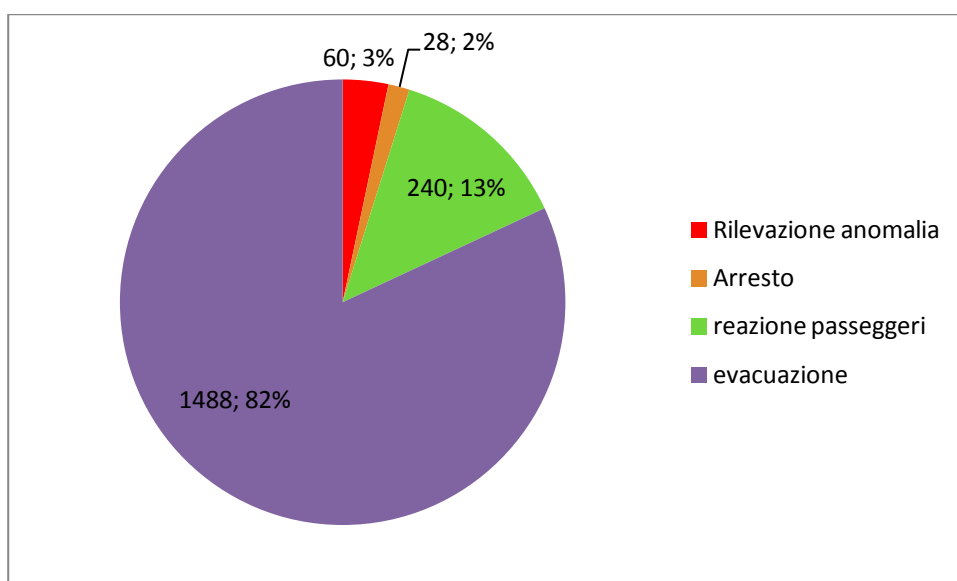


Figura 4. 7 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria B

Come si può notare la voce predominante nel tempo per la messa in sicurezza delle persone è il tempo di evacuazione vero e proprio. A questo tempo è necessario poi aggiungere il tempo che ogni passeggero deve percorrere lungo il marciapiede nel caso in cui il convoglio non fosse fermo nei pressi di un punto d'esodo. Visto che allo stato attuale la principale differenza tra le 2 gallerie è la larghezza del marciapiede si può notare l'influenza di questo aspetto sul tempo totale. L'aumento di 20 cm della larghezza del marciapiede comporta una sensibile diminuzione del tempo di evacuazione e di conseguenza alcuni aspetti, che nella galleria B hanno scarsa influenza nel tempo totale assumono maggior peso. L'incremento di 20 cm della larghezza della galleria comporta il dimezzamento del tempo di evacuazione vero e proprio e di conseguenza il raddoppio del tempo delle altre voci nel considerare l'influenza di queste sul tempo totale.

Se si considera una cattiva visibilità nelle gallerie i pesi delle differenti voci variano nel seguente modo:

Galleria A:

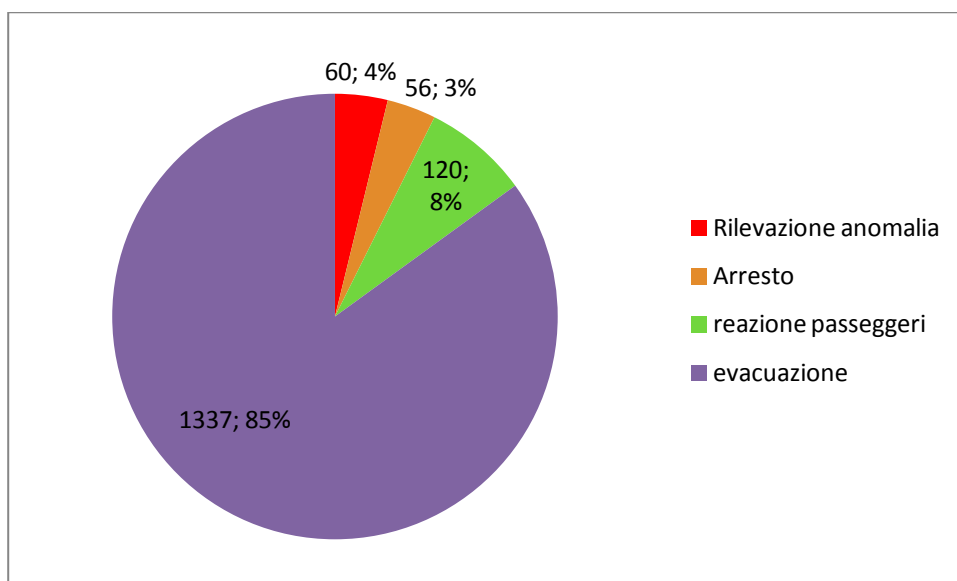


Figura 4. 8 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria A con scarsa visibilità

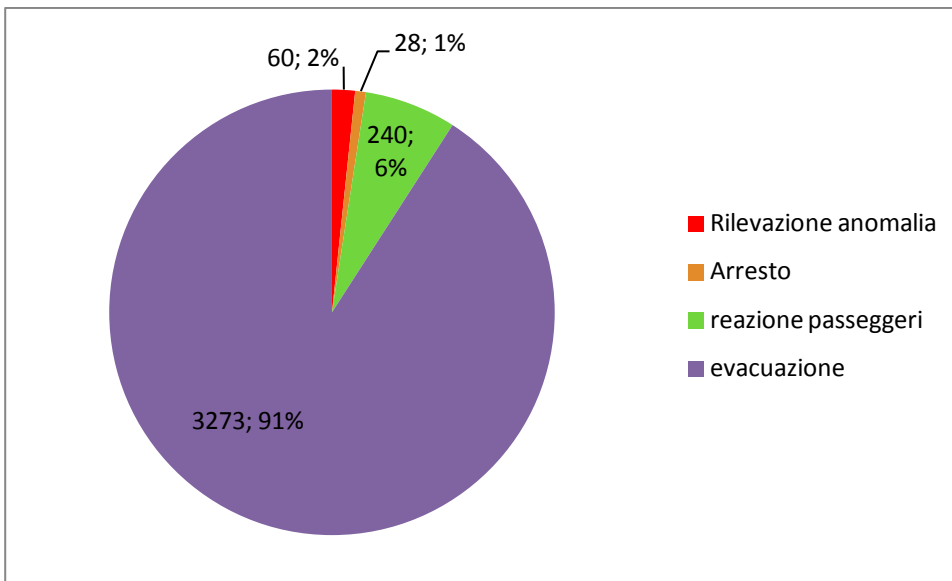
Gallerie B:

Figura 4. 9 Rappresentazione del Tempo di esodo suddiviso per componente nella galleria B con scarsa visibilità

Come si può notare la presenza di fumi in galleria comporta quasi il raddoppio dei tempi di evacuazione veri e propri. Anche per questo aspetto valgono le considerazioni fatte in precedenza che per la galleria B (marciapiede di 50 cm) nello scenario con scarsa visibilità raggiunge livelli per i quali il tempo in cui i passeggeri abbandonano il convoglio ha un peso pari circa al 91% sul totale. Di conseguenza altri sistemi procedurali o di attivazione di sistemi non convenzionali e non studiate nei metodi classici di analisi del rischio possono influire in piccola parte nella valutazione del rischio globale per tale tipo di scenario, viceversa, qualora le condizioni di evacuazione non fossero così critiche, l'influenza di aspetti considerati marginali, quali per esempio la presenza di un sistema di diffusione sonora, possono comportare incrementi consistenti nella sicurezza globale della galleria.

Sul tempo di evacuazione ha influenza anche l'intervento delle squadre di soccorso. Il modello prevede un aumento del flusso di evacuazione dei passeggeri presenti in galleria grazie alla sicurezza infusa dal personale di soccorso e dalle istruzioni impartite. Tale influenza è apprezzabile solo quando in tempo necessario per la squadre di soccorso per giungere nel luogo dove è fermo il convoglio non sia superiore del tempo necessario per l'ultima persona presente in galleria per mettersi in salvo.

Per le gallerie in esame possiamo notare che tale situazione si verifica solamente per la galleria B nello scenario più penalizzante ovvero quello con scarsa visibilità. In

questo caso, visto l'aumento della velocità d'esodo del 25% comporta sensibili diminuzioni nel tempo totale, nel caso in esame pari all'8,5%, maggiore quindi dell'influenza delle altre componenti del modello.

L'influenza del contributo dei soccorritori deve essere valutata anche in considerazione dell'influenza del loro intervento sull'evoluzione dello scenario di rischio. Come è stato spiegato nel modello. Se si considerano le 2 gallerie in esame si può notare che l'influenza dell'operato delle squadre di soccorso ha comportato un'evoluzione della temperatura differente da quella che si sarebbe verificata in caso di andamento libero dell'incendio.

In termini di salvaguardia dei passeggeri l'intervento dei soccorritori risulta efficace solamente quando permette di contenere la temperatura (e parallelamente gli altri aspetti che influenzano la resistenza umana all'interno della galleria ma che evolvono con dinamiche simili a quelle del calore sprigionato dall'incendio) a livelli tali da non causare il decesso dei passeggeri. L'intervento delle squadre di soccorso secondariamente, anche se non considerate nella valutazione delle conseguenze nello studio, hanno anche l'obiettivo di non determinare un incendio che può compromettere l'integrità strutturale della galleria.

L'aspetto critico per quanto riguarda l'intervento dei soccorsi riguarda il tempo necessario per l'avvicinamento dal più vicino presidio dei Vigili del Fuoco fino all'ingresso della galleria (che sia all'imbocco a se disponibile un ingresso intermedio all'interno della galleria tramite i punti d'esodo) risulta quello più rilevante rispettivamente con il 73% e 67% sul tempo totale.

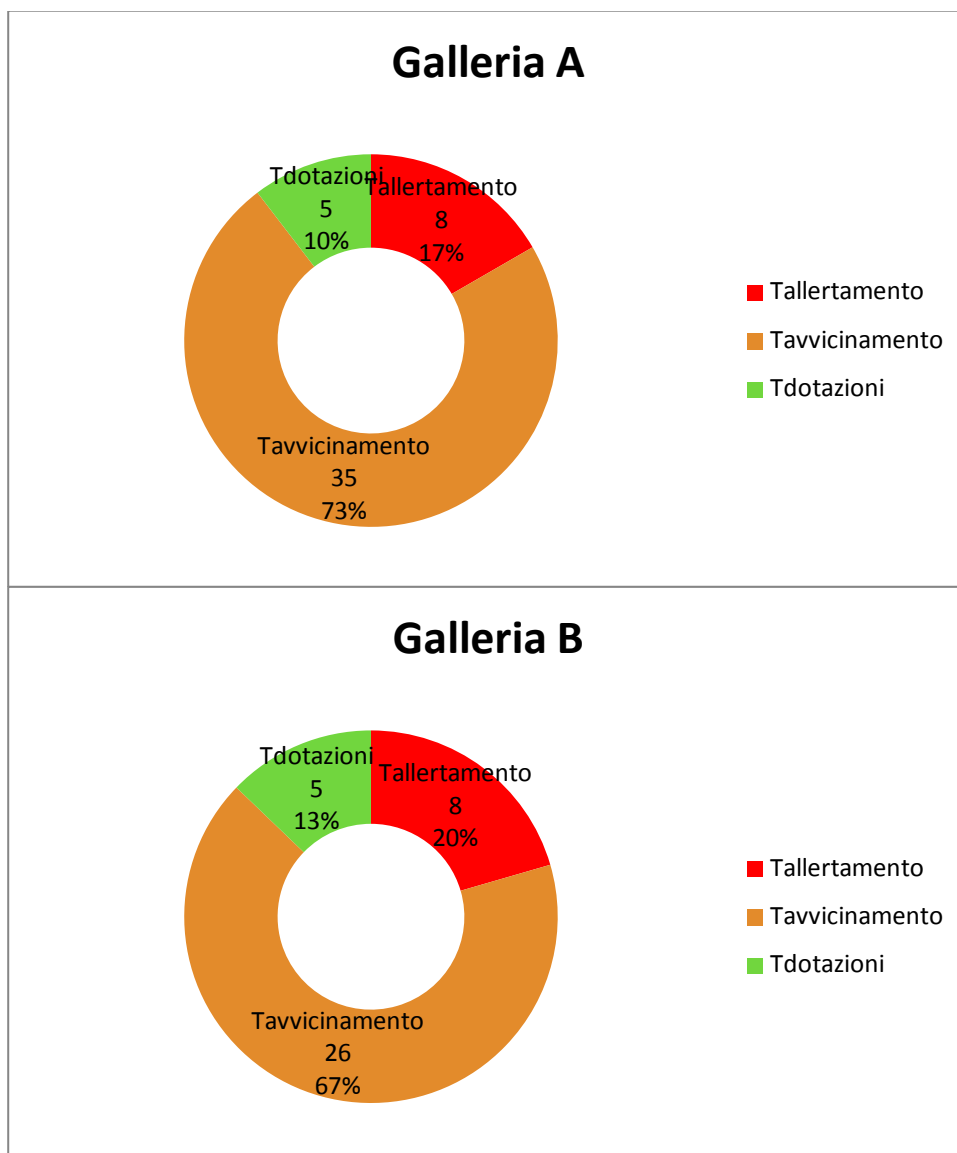


Figura 4. 10 Rappresentazione del Tempo di Soccorso diviso per le sue componenti

Qualora fosse presente un presidio di soccorritori presso la galleria l'efficacia dell'intervento dei soccorritori comporterebbe attività nella zona efficace di intervento e la temperatura risulterebbe per entrambe le gallerie a poco più di 100 °C. Considerando l'aumento della velocità d'esodo delle persone presenti in galleria si può affermare che le conseguenze in termini di perdita di vite umane risulterebbe fortemente limitata. L'utilizzo di sistemi automatizzati di spegnimento analogamente comporterebbero il medesimo effetto nel contenimento della temperatura ma nessun effetto sulla velocità d'esodo.

4.4 Analisi critica dei risultati per la modalità di arresto del convoglio in emergenza

Nel considerare quale opzione risulta più vantaggiosa in termini di sicurezza globale per i passeggeri non ci si può limitare a considerare solamente il tempo di arresto del convoglio nei pressi del punto di esodo ma anche gli altri aspetti che possono influenzare lo spostamento dei passeggeri verso un luogo sicuro o influenzare lo scenario evolutivo dell'evento critico.

In particolare, nel caso in cui i punti di esodo non fossero dotati dei medesimi dispositivi di sicurezza e con le stesse caratteristiche infrastrutturali è bene valutare tutti gli aspetti che possono agevolare l'auto salvataggio dei passeggeri.

In particolare appare necessario considerare:

- Larghezza del marciapiede: questo aspetto può influenzare la velocità di fuga dei passeggeri;
- Segnaletica di emergenza;
- Lunghezza e dimensione della via di fuga verso il luogo sicuro dalla galleria

Inoltre, considerando che nel convoglio potrebbero trovarsi passeggeri con limitate capacità motorie o che a causa dell'incidente fossero limitati nel muoversi liberamente. Per queste persone risulta importante valutare il tempo che i soccorritori impiegherebbero per arrivare e prestare il primo soccorso ai passeggeri.

In particolare appare necessario considerare:

- Distanza dal più vicino posto di soccorso;
- Possibilità di ingresso alla gallerie con veicoli di soccorso;
- Tortuosità della via d'esodo fino a cielo aperto;
- Presenza di un piazzale d'attesa nei pressi dell'uscita;
- Dotazioni di ausilio ai soccorsi e possibilità di allestimento di un PMA.

Queste considerazioni rendono evidente come il percorso di mitigazione del rischio globale non può essere ottenuto con la semplice ottimizzazione di un solo aspetto procedurale o tecnologico (per esempio con la corretta definizione del regolamento di esercizio) ma deve essere considerato il sistema nella sua globalità.

Infatti incrementi nella sicurezza in un aspetto specifico potrebbero avere effetti controproducenti in termini di mitigazione del rischio globale al quale sono esposti i passeggeri che transitano all'interno di una galleria.

4.5 Adattamento del modello a sistemi antincendio reperiti in letteratura

In lunghi tunnel europei, e in particolare per le gallerie della rete ferroviaria svizzera, si fa utilizzo di treni di spegnimento e soccorso dislocati in punti strategici della rete. L'utilizzo di tali convogli permette l'accesso alla galleria anche in assenza di collegamenti con la rete stradale e risulta di conseguenza particolarmente efficace permettendo ai soccorritori di poter raggiungere in modo abbastanza agevole il convoglio incendiato nella galleria e di garantire un intervento efficace delle squadre antincendio.

Si riporta nella figura sottostante l'immagine del convoglio antincendio utilizzato nella galleria Lötschberg



Figura 4. 11 Immagine del treno di soccorso in servizio presso la galleria del Lötschberg [fonte BLS Lötschbergbahn]

Il modello sviluppato nella tesi può essere facilmente adattato considerando l'utilizzo di tali sistemi di intervento delle squadre di soccorso calcolando il tempo di avvicinamento dei soccorritori (*Tavvicinamento*) in base alla tempistica con cui tale convoglio riesce ad arrivare nel luogo esatto dove è richiesto l'intervento. Ovviamente l'efficacia di tale sistema di intervento dipende in modo rilevante dal numero di treni antincendio presenti sulla rete e dalla dislocazione degli stessi.

L'utilizzo di questi sistemi su un territorio, quale per esempio quello italiano, che per caratteristiche geomorfologiche ha spesso imposto l'utilizzo di gallerie per garantire la circolazione ferroviaria potrebbe comportare notevoli criticità soprattutto se si dovesse valutare il rilevante impatto economico derivante dall'utilizzo di tali treni. Risulta infatti evidente che oltre alla spesa iniziale dovuta all'acquisto e all'estensione dei convogli, sugli stessi deve essere garantita un'adeguata manutenzione che consentirebbe, in caso di richiesta, la messa in utilizzo in tempi molto rapidi del convoglio, di conseguenza dovrebbe essere assicurata la presenza continuativa di squadre antincendio e di personale abilitato alla guida del convoglio. Va infine sottolineato che, essendo gli incendi in galleria eventi rari, tali persone risulterebbero in gran parte del tempo inutilizzate e di conseguenza, se non costantemente formati ed esercitati, non garantirebbero una reale efficacia d'intervento.

Altro sistema che in caso di incendio in galleria può contribuire in modo molto efficace al contenimento delle conseguenze dello stesso riguarda l'utilizzo di sistemi di spegnimento automatizzati, anche con l'utilizzo di impianti robotizzati in grado di intervenire in tempi molto ristretti contenendo l'evoluzione dello scenario d'incendio. Si mostra nell'immagine un esempio di sistema di spegnimento

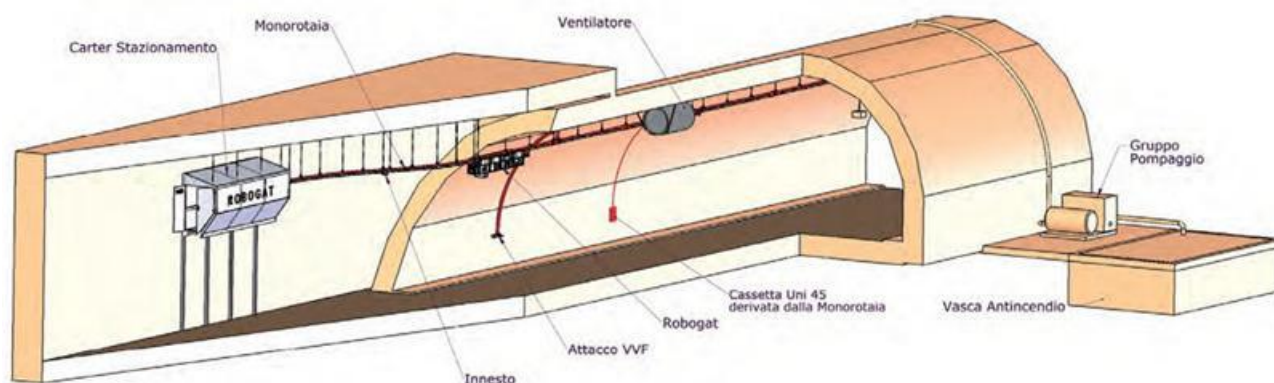


Figura 4. 12 Schema di Sistema di spegnimento automatizzato [fonte Robogat]

L'efficacia dell'utilizzo di tali sistemi è stato dimostrato in letteratura dallo studio (Abate 2010 [1]).

Il modello sviluppato nel presente studio può considerare l'influenza di tali andando a considerare il tempo di intervento del sistema di spegnimento al posto del *Tempo di Soccorso* (T_{soc}). Bisogna però prestare attenzione a considerare tale tempistica solamente per gli aspetti connessi all'andamento della temperatura in gallerie e alla presenza di fumi nella stessa, l'incremento di velocità di fuga delle persone presenti in galleria deve comunque essere valutata in base a tempo di soccorso spiegato nel modello.

Per quanto riguarda l'utilizzo di questi sistemi si sottolinea la necessità di programmare con molta attenzione l'intervento degli stessi per non rischiare di comportare, nella prima fase dell'intervento, un peggioramento delle condizioni di vivibilità interne alla galleria, che potrebbe in alcuni casi aggravare le conseguenze dell'incendio.

Capitolo 5

Linee guida per la pianificazione delle emergenze nelle gallerie

Il seguente capitolo descrive le componenti di un piano di emergenza di una galleria ferroviaria, andando ad individuare compiti e responsabilità e descrivendo, le interrelazioni tra le differenti componenti. Di seguito sono state evidenziate le relazioni sia tra le differenti componenti del sistema di soccorso che con quelle tecnico – strutturali della galleria e infine con le norme che regolano l'esercizio ferroviario nella galleria:

- Analisi dell'influenza delle componenti dei soccorsi sul rischio totale;
- Analisi dei ruoli e delle responsabilità dei differenti soggetti coinvolti;
- Definizione delle componenti di un piano e individuazione del modello di intervento;
- Linee guida per la redazione di Piani di Emergenza Esterna.

5.1 Analisi dell'influenza delle componenti dei soccorsi sul rischio totale

La pianificazione delle attività necessarie per garantire una risposta efficace in termini di gestione di un'emergenza all'interno di una galleria ferroviaria richiede l'interazione di più aspetti che incidono sull'obiettivo finale di salvaguardia della vita umana.

Come precedentemente spiegato nella valutazione del rischio globale gli aspetti tecnico strutturali e gli aspetti procedurali concorrono nella definizione del rischio globale. Tra le due componenti però non esiste un'indipendenza lineare e la calibrazione delle procedure di gestione dell'emergenza dipende dalle caratteristiche tecnico strutturali di ogni galleria.

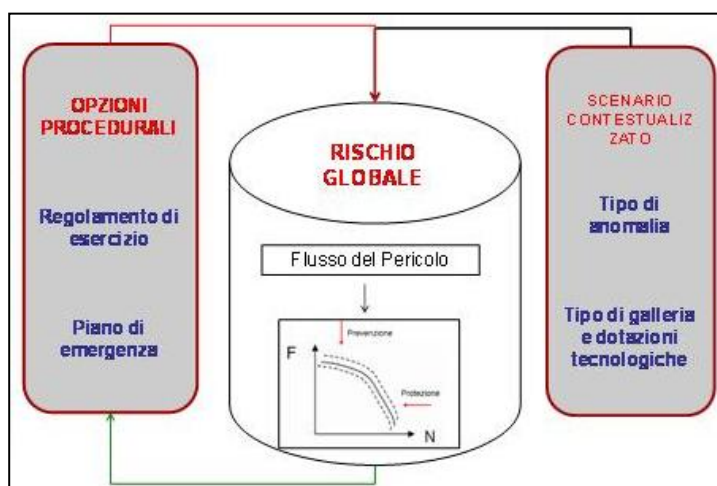


Figura 5. 1 Schema riassuntivo della valutazione del rischio in una galleria ferroviaria

Per ottenere la migliore prestazione in termini di soccorso le procedure di attivazione e le azioni da adottare per governare l'emergenza devono essere opportunamente calibrate in base alla situazione ambientale che i soccorritori sono chiamati ad affrontare.

Come evidenziato nell'analisi derivante dall'utilizzo del modello di calcolo del rischio globale su due gallerie reali si può notare che sulle conseguenze finali l'apporto maggiore è comportato da possibili carenze strutturali e impiantistiche (primo fra tutte la larghezza del marciapiede o la presenza di sistemi di ventilazione in emergenza). Come è facile

intuire su gallerie in esercizio risulta impossibile, o comunque fortemente diseconomico agire su questi aspetti in termini di mitigazione del rischio.

Seppur con impatti limitati in termini di mitigazione delle conseguenze dall'utilizzo del modello si può evidenziare che la corretta applicazione di procedure (per quanto possibile automatizzate e precodificate) possono avere effetti rilevanti comunque apprezzabili in termini di contenimento delle conseguenze.

Tra queste opzioni procedurali possiamo evidenziare 2 differenti componenti che agiscono in modo differente (seppur con forti legami tra di loro) sul salvataggio delle persone presenti all'interno della galleria.



Figura 5. 2 Schema delle azioni di mitigazione delle conseguenze in caso di incendio in galleria

Le attività propedeutiche all'attivazione delle corrette procedure di auto salvataggio dei passeggeri presenti all'interno della galleria hanno effetti marginali in termini di tempo se raffrontate all'influenza della larghezza del marciapiede o alla visibilità all'interno della galleria, infatti tali procedure vanno a incidere su aspetti che, in base alla tipologia di galleria e alle condizioni al contorno, concorrono per una percentuale compresa tra il 15% e il 30% sul totale del tempo necessario per la messa in sicurezza di tutte le persone presenti in galleria. D'altro canto il modello ha evidenziato che, seppur limitato in termini quantitativi, applicazione di corrette procedure di attivazione del sistema di governo dell'emergenza e d'informazione per gli utenti in difficoltà incidono nella parte più influente sulle conseguenze finali (essendo quelle propedeutiche a tutte le successive azioni) ha influenza rilevante sul numero di persone che riescono a mettersi in salvo. L'applicazione del modello ha mostrato come per la galleria B la diminuzione di 3 minuti (su un totale di 5) nel tempo di reazione delle persone presenti in galleria comporta il salvataggio di ben 42

persone su un totale di 350 presenti in galleria delle quali 240 messe in salvo. Tale esempio mostra chiaramente come il risparmio di tempo derivante dall'applicazione di procedure di allertamento risulta molto influente sulle conseguenze finali e diventa aspetto critico per l'applicazione di tutte le successive attività.



Figura 5. 3 Schema riassuntivo delle azioni di governo dell'emergenza conseguenti al verificarsi di un incendio in galleria

Discorso diametralmente opposto se si considera l'apporto dell'intervento dei soccorritori sulle conseguenze finali dell'incidente. L'apporto di tali attività ha grande influenza sull'evoluzione dello scenario critico (il modello analizza solo l'andamento della temperatura ma tale aspetto rappresenta con buona approssimazione anche gli altri fattori critici quali per esempio la presenza di ossigeno, monossido di carbonio e l'energia sprigionata per irraggiamento). Di conseguenza se all'innescio di un incendio fosse già presente una squadra di soccorritori munita di tutte le dotazioni necessarie per lo spegnimento dello stesso le conseguenze sarebbero fortemente contenute e nella maggior parte dei casi azzerate. Purtroppo tale condizione non risulta economicamente sostenibile, di conseguenza, per le gallerie analizzate, seppur di elevata potenzialità l'intervento delle squadre di soccorso, per scenari estremamente critici comporta importi non molto rilevanti in termini di salvataggio di vite umane. E' da sottolineare, anche per questo aspetto come la corretta attivazione del sistema di gestione dell'emergenza risulta attività propedeutica ed indispensabile per non rendere vana qualsiasi operazione

successiva. Per i casi reali analizzati il tempo necessario per muovere i soccorritori dal presidio più vicino alla galleria fino al luogo dove il treno è fermo ha influenza per una quota tra il 60% e l'80% sull'effetto finale in termini di contenimento del rischio, per questo motivo, qualora non fosse possibile, per casi particolarmente critici il posizionamento di squadre di soccorso nelle vicinanze della galleria, risulta quantomeno utile che nel piano di emergenza siano correttamente segnate le vie di accesso alla galleria e che, qualora al verificarsi dell'incidente il treno fosse ancora nella possibilità di muoversi, il convoglio fosse portato nel luogo di più veloce accesso dei soccorritori. Si rammenta che, come evidenziato dall'utilizzo del modello, quando il tempo per rendere operative le operazioni dei soccorritori fossero troppo lunghe il loro intervento perde completamente di efficacia, sia perché le persone che non si sono messe in salvo autonomamente non sono sopravvissute sia perché al di sopra della temperatura di Flash over risulta impossibile anche entrare dentro la galleria (anche con tutte i dispositivi di protezione individuale DPI prescritti).

Va inoltre considerata l'opportunità di dotare la galleria di sistemi di spegnimento degli incendi descritti nell'articolo (Abate2011 [1]), in questo caso, è possibile ottenere solamente l'influenza sull'evoluzione dello scenario critico senza avere un'influenza sull'autosalvataggio. Tali sistemi possono funzionare comunque condizionati al corretto sistema di rilevazione anomalia, arresto del convoglio e attivazione del sistema dei soccorsi spiegato.

Nel presente paragrafo è stata analizzata l'influenza dei soccorsi sulla mitigazione del rischio evidenziando le peculiarità delle due differenti componenti (autosavataggio e soccorso esterno) così come mostrate dall'utilizzo del modello di valutazione del rischio globale. Già da questa prima analisi si colgono numerose interdipendenze tra differenti componenti del sistema di governo di un'emergenza che saranno studiate nel dettaglio nei successivi paragrafi.

5.2 Analisi dei ruoli e delle responsabilità dei differenti soggetti coinvolti

In caso di anomalia il sistema ferroviario non si autoregola internamente ma, soprattutto nei casi in cui l'anomalia dovesse degenerare in emergenza, il sistema ferroviario, con l'insieme di tutte le tecnologie le componenti umane e le normative che ne regolamentano l'esercizio, è chiamato a interagire con l'ambiente esterno e in particolar modo a diventare una componente essenziale del più complesso sistema di gestione delle emergenze.



Figura 5. 4 Schema delle componenti del sistema di gestione delle emergenze in galleria

Preso atto dei differenti attori e della più complessa catena di comando che si attiva al conclamarsi di incidenti che determinano il coinvolgimento di un gran numero di persone o che possono determinare esplosioni o crolli, il modello di valutazione della sicurezza globale per una galleria ha evidenziato l'influenza di ogni componente sul rischio totale, facendo di conseguenza risaltare le interdipendenze tra le attività svolte in emergenza dai vari soggetti.

La prima interdipendenza evidenziata è quella tra il sistema dei soccorsi e il regolamento di esercizio ferroviario nonché dalle dotazioni tecnologiche della galleria e del materiale rotabile, infatti per una tempestiva attivazione dei soccorsi è necessario un apparato di rilevazione anomalia, e un sistema di trasferimento dell'allerta alla più vicina squadra di soccorso che indichi, tra le altre cose, il punto esatto dove il convoglio è fermo (tale posizione è conseguenza di azioni previste nel regolamento di esercizio ferroviario). Si mostrano nella seguente figura le componenti esterne al sistema dei soccorsi che possono influenzarne l'efficacia in emergenza.



Figura 5. 5 Schema delle azioni di mitigazione delle conseguenze in caso di incendio in galleria

Se si analizza invece l'evacuazione spontanea delle persone presenti nella galleria (auto salvataggio), anche questa dipende da differenti aspetti, procedurali e tecnologico / strutturali, nonché, come evidenziato dal modello di valutazione del rischio, dal possibile intervento di squadre di soccorso che possono agevolare la fuga (soprattutto per le persone con limitata mobilità) e contestualmente intervenire sullo scenario critico rendendo meno severe le condizioni di sopravvivenza all'interno della galleria.

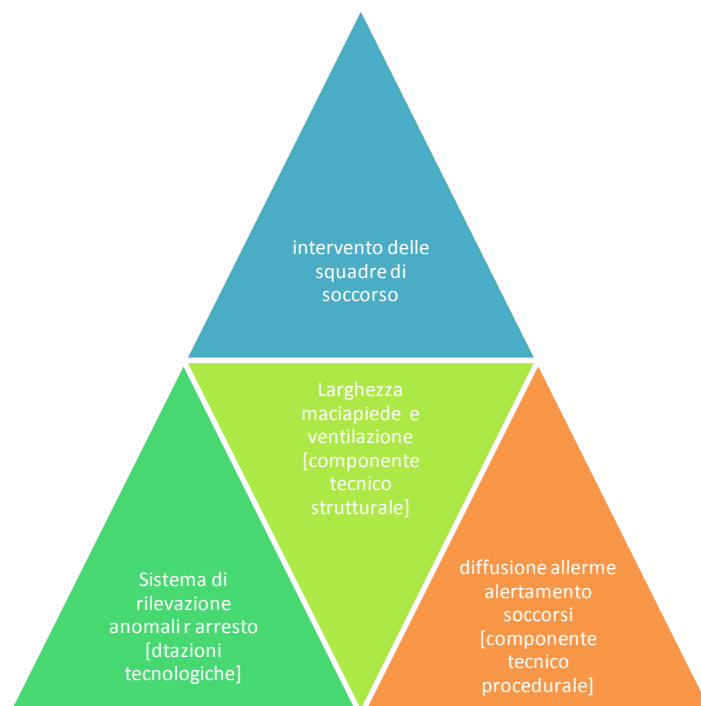


Figura 5. 6 Schema dell'influenza delle differenti componenti sulla mitigazione delle conseguenze in caso di incendio in galleria

Il modello di valutazione del rischio ha mostrato come la componente tecnico strutturale, rappresentata nella figura come l'elemento centrale, risulta quella più influente sulla velocità con cui i passeggeri riescono a mettersi in salvo, in questo senso i risultati mostrati dal modello sono supportati anche da considerazioni logiche, infatti l'assenza di marciapiedi e vie di fuga pregiudicherebbe qualsiasi forma di soccorso e auto salvataggio.

L'analisi svolta mostra d'altro canto, come, elementi tecnico strutturali, innestati sul contesto della galleria in esame, possono contribuire a migliorare le prestazioni in termini di sicurezza di una galleria. Se si considerano gallerie già in esercizio, difficilmente sarà possibile agire sulla struttura della stessa, risulta quindi indispensabile tarare le altre componenti che hanno conseguenze sul rischio globale per migliorarne le prestazioni fino a un livello considerato accettabile. Il modello di valutazione del rischio ha mostrato che, seppur in con influenza minore, la corretta applicazione delle procedure, la tempestiva comunicazione all'utenza e l'immediata rilevazione delle anomalie possono, a seconda degli eventi, diminuire le conseguenze in modo notevole. Come spiegato in precedenza, la componente esterna dei soccorsi, più delle altre componenti può avere effetti determinanti sulle conseguenze, ma richiederebbe un intervento quasi istantaneo al rilevamento dell'anomalia, prestazione non immaginabile per la stragrande maggioranza delle gallerie in esercizio.

5.3 Definizione delle componenti di un piano e individuazione del modello di intervento

Un piano di emergenza esterno di una galleria ferroviaria deve contenere tutte le azioni, messe in capo da tutti i soggetti interessati nella gestione di un'emergenza presente in galleria, specificando compiti e modello di attivazione. Per fare questo è necessaria una descrizione del manufatto oggetto di piano e una sintetica descrizione degli scenari incidentali che lo stesso è chiamato a governare. In particolare un Piano di Emergenza esterno di una galleria ferroviaria deve essere articolato secondo le seguenti attività

5.3.1 Descrizione delle caratteristiche della galleria

La conoscenza delle caratteristiche tecnico – funzionali, costituisce il primo passo verso la stesura di un piano di emergenza completo, poiché permette di informare e formare gli operatori e gli enti potenzialmente coinvolti, che in questo modo saranno informati in anticipo circa le condizioni della galleria nella quale sono chiamati ad intervenire.

La redazione di un piano di emergenza, infatti, prevede in primo luogo, un'analisi della struttura che fornisca le caratteristiche tecniche adottate in fase di progetto e di esecuzione, per meglio descrivere lo stato attuale e le dotazioni della galleria stessa. È necessario quindi valutare alcuni parametri geometrici della galleria come la lunghezza, il numero di fornici, il numero di binari, la pendenza trasversale e longitudinale, le dimensioni delle banchine ove presenti e tutti gli altri parametri che possano incidere sia sull'evoluzione dello scenario critico che sul lavoro delle squadre di soccorso.

Parallelamente a queste informazioni, occorre determinare i dispositivi e gli impianti presenti all'interno della galleria come la segnaletica, l'illuminazione, l'aerazione, l'impianto antincendio, le nicchie di sicurezza, la rete di chiamata d'emergenza, la videosorveglianza, la possibilità di diffondere messaggi sonori.



Figura 5. 7 Elenco schematico delle componenti descrizione della galleria

5.3.2 Individuazione degli scenari di incidente

La costruzione di uno scenario costituisce un compito particolarmente complesso, in quanto comporta lo sviluppo di un sapere "nuovo" sulla base di conoscenze già acquisite e rilevanti per il suo sviluppo.

Una corretta definizione degli scenari, permette quindi, al personale coinvolto nella gestione di un'emergenza, di essere preventivamente informato circa le tipologie di eventi incidentali che sarà chiamato a fronteggiare.

Il piano di emergenza di una galleria, infatti, prevede una fase operativa riguardante l'individuazione degli scenari di incidente potenzialmente riscontrabili. Questa procedura è fortemente legata ad un'analisi del rischio effettuata sulla medesima galleria, da cui emergono i possibili eventi che concorrono a provocare particolari situazioni critiche o di emergenza.

È importante sottolineare come da un'attenta analisi del rischio scaturisca un elenco di eventi rilevanti che possono influire e ripercuotersi sull'intero sistema di circolazione ferroviaria oggetto di studio. È opportuno conoscere e studiare le conseguenze causate da ogni evento al fine di poter definire un numero ragionevole di scenari incidentali che sono rappresentativi degli eventi stessi.

Il primo passo da compiere in questa fase, riguarda quindi una ricerca presso gli enti e le istituzioni coinvolte, di materiale che contenga valide informazioni in merito agli incidenti avvenuti all'interno della galleria. Mediante l'acquisizione di questi dati sarà quindi possibile definire le cause e le caratteristiche di ogni singolo evento incidentale, evidenziando le criticità presenti anche attraverso simulazioni di incendi al fine di valutare dinamicamente l'evoluzione dell'incidente.

Tali simulazioni dettagliate si basano su fluidodinamica computazionale (CFD) della concentrazione di sostanze micro e macro inquinanti all'interno della galleria in presenza di incendio di composti solidi e liquidi. La simulazione CFD fornirà anche profili e dinamiche evolutive della temperatura dei gas di combustione all'interno del tunnel.

Il tunnel deve essere descritto in dettaglio secondo opportuna grigliatura tridimensionale ed adattiva in grado di tenere conto del profilo altimetrico e curvilineo della galleria principale, dei tratti di uscita, dei condotti di aspirazione passivi ed attivi, delle soffianti (ventilatori) operanti ai regimi effettivamente disponibili all'interno del tunnel. Il codice di

calcolo e simulazione sarà inoltre in grado di tenere conto dell'effetto del particolato solido (soot) sulla cinetica e temperatura di combustione.

Elenco schematico delle componenti



Figura 5. 8 Elenco schematico della componente individuazione dello scenario incidentale

5.3.3 Redazione delle procedure di organizzazione dei soccorsi

Durante un'emergenza è fondamentale che gli operatori chiamati ad intervenire agiscano secondo delle procedure organizzative preventivamente definite. In caso di incidente è necessario che siano stati valutati a priori degli schemi e delle modalità di allerta che consentano agli operatori presenti in un Centro Operativo di poter agire nel modo più rapido possibile.

Nella gestione delle emergenze è importante sottolineare come la componente temporale dell'intervento, sia determinante nel ridurre le possibili conseguenze di un incidente (soprattutto in caso di incendio).

È opportuno definire un piano di soccorso interno alla struttura dell'ente gestore della galleria, (Piano Interno di Intervento e Soccorso) che deve essere attivato in caso di allarme o quando i punti di controllo presenti in galleria segnalano anomalie o situazioni critiche. Una volta rilevata l'anomalia, l'ente gestore deve essere in grado di configurare uno scenario ottimale che gli consenta ad esempio di utilizzare la segnaletica adeguata, di regolare la ventilazione, informare gli utenti ecc.

Inoltre dalla sala di controllo devono essere attivate le procedure di attivazione del Piano di Intervento e il flusso informativo conseguente.

Elenco schematico delle componenti



Figura 5. 9 Elenco schematico della componente modello d'intervento

5.4 Linee guida per la redazione di Piani di Emergenza Esterna

Una volta definiti gli elementi che influenzano il rischio globale associato al passaggio all'interno di gallerie ferroviarie e individuate le interrelazioni tra ognuna di esse, è possibile indicare un metodo per la realizzazione di piani di emergenza.

Nel paragrafo precedente sono state illustrate le componenti essenziali di un piano di emergenza, nel presente paragrafo, in base ai risultati emersi dal modello di valutazione del rischio, dalla sua applicazione su casi reali e, infine, dalla lettura critica dei risultati, è possibile individuare dei consigli e raccomandazioni utili alla redazione di un piano di emergenza esterna in una galleria ferroviaria.

La prima cosa da considerare se la galleria è in esercizio o in fase di progettazione. Come dimostrato dall'applicazione del modello esistono numerose interazioni tra la gestione emergenziale e le caratteristiche tecnico strutturali della galleria, di conseguenza sin dalle prime scelte costruttive, devono essere considerati aspetti legati alla sicurezza vista in termini globali. L'approccio multidisciplinare risulta un elemento fortemente rafforzativo della sicurezza all'interno della galleria stessa e permette di ottenere prestazioni migliori in termini di sicurezza globale con minor richiesta di risorse rispetto alla pianificazione con un quadro strutturale prestabilito.

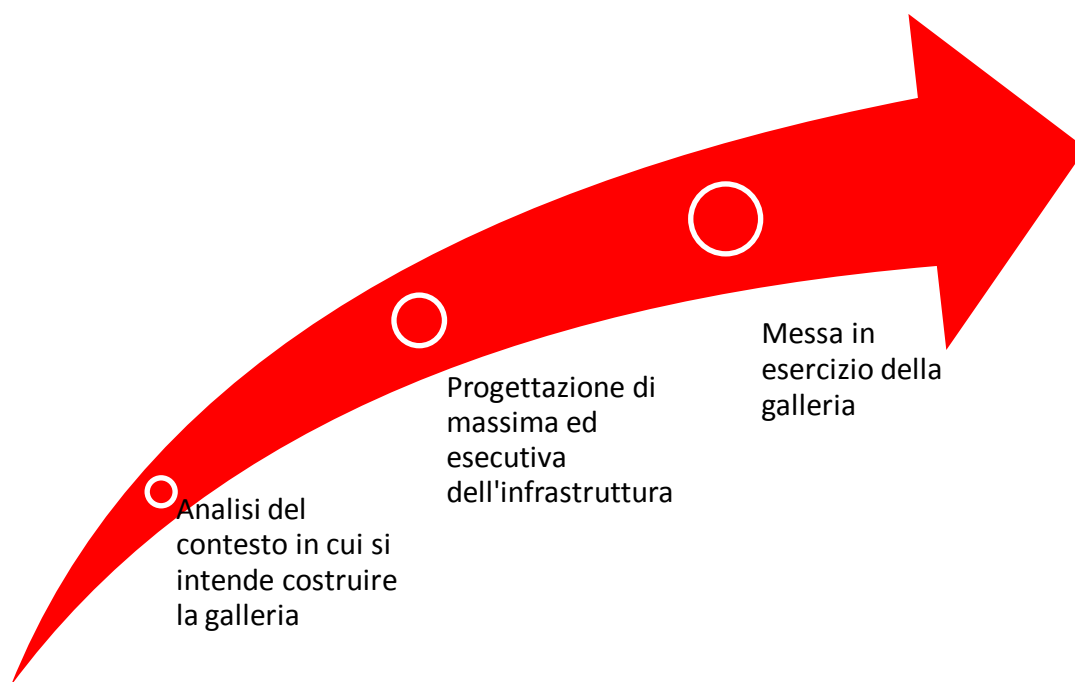


Figura 5. 10 Schema delle fasi di progettazione di una galleria

In tutte le fasi è necessario che le scelte costruttive siano soppesate sulle conseguenze che queste hanno sulla sicurezza globale. Dal punto di vista costruttivo si

sono evidenziati i seguenti aspetti come determinanti in termini di contenimento del rischio:



Figura 5. 11 Schema delle componenti tecnico strutturali che influenzano il rischio in galleria

Tali aspetti costruttivi devono essere valutati fin dal principio nel pacchetto di sistemi di sicurezza e di governo di un'emergenza, per poter individuare la combinazione meno impattante in termini economici che garantisce comunque una sicurezza accettabile dentro la galleria.

Oltre agli aspetti strutturali devono quindi essere valutati quelli tecnico organizzativi che influenzano il sistema di governo di un'emergenza.



Figura 5. 12 Schema delle componenti tecnico procedurali che influenzano il rischio in galleria

In particolare in ogni fase di vita della galleria (dalla progettazione all'esercizio) deve essere valutata l'influenza di qualsiasi scelta sul tempo necessario perché le persone presenti in galleria possano mettersi in salvo.

Tsicurezza passeggeri

$$= \frac{\alpha \text{ rilevazione}}{2 \times \text{Iattivazione}} + T_{\text{arresto}} + (\gamma \times \text{I} \text{diffusione} + \tau \text{ reazione}) + [T_{\text{soccorso}} + K (T_{\text{evacuazione}} - T_{\text{soccorso}})]$$

Se la galleria è già in esercizio è evidente che risulta impossibile prevedere interventi strutturali e che comunque, qualora fossero tecnicamente praticabili, richiederebbero risorse molto elevate e non paragonabili con gli interventi tecnico organizzativi. Di conseguenza la pianificazione delle emergenze risulta avere minori gradi di libertà e ciò che era in precedenza considerato come elemento di valutazione deve, in alcuni casi, essere considerato un vincolo.

In particolare, per gallerie già in esercizio, risulta molto difficile agire con azioni di mitigazione di T evacuazione in quanto dipendente esclusivamente da elementi tecnico strutturali.

Di conseguenza per l'ottenimento della combinazione di elementi ottimale per garantire la miglior sicurezza ragionevolmente praticabile per il passeggero è necessaria l'adozione di un sistema ricorsivo che minimizzi il rischio globale all'interno di una galleria.

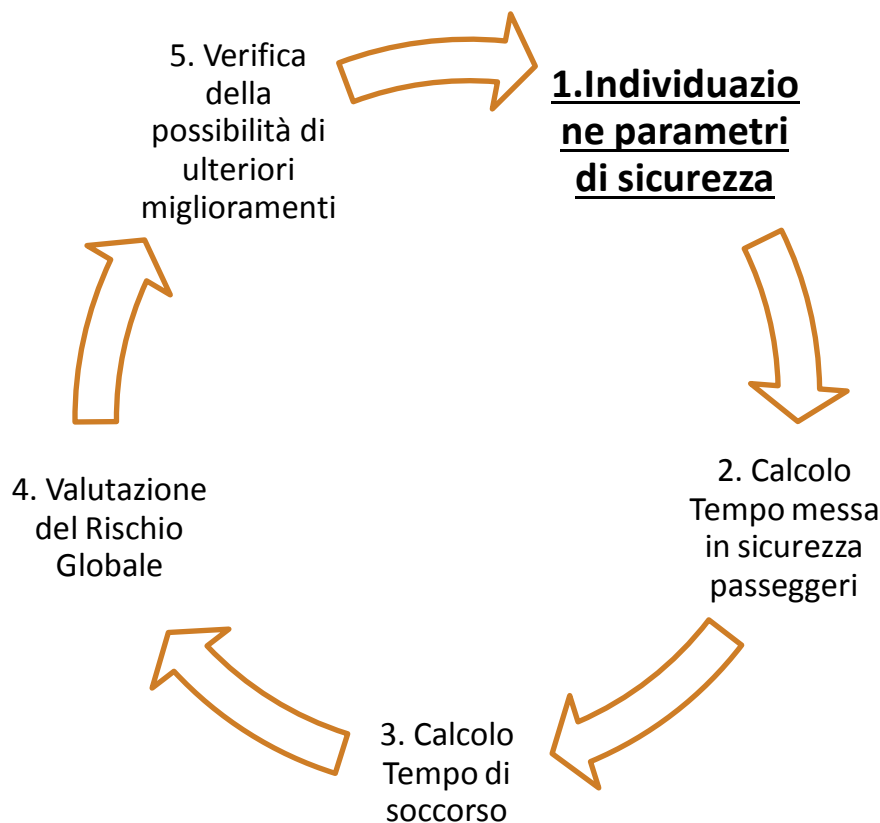


Figura 5. 13 Schema della procedura ricorsiva per la taratura degli elementi utili alla pianificazione di emergenza

Il ciclo continua fino all'ottenimento del minor rischio ottenibile in base alle risorse a disposizione.

In particolare un Piano di Emergenza deve elaborare le procedure e i sistemi necessari per garantire le operazioni di soccorso. L'efficacia del sistema di soccorso può venire valutata secondo la seguente formula:

$$T_{\text{soccorso}} = T_{\text{rilevazione anomalia}} \times I_{\text{procedure}} + \frac{\text{distanza} \times I_{\text{tortuosità}}}{\text{Velocità Media}} + K_{\text{intervento}} \times I_{\text{dotazioni}}$$

Anche in questo caso il Piano di Emergenza applicando un modello ricorsivo deve individuare il mix di variabili che garantisce un tempo di soccorso minore praticabile.

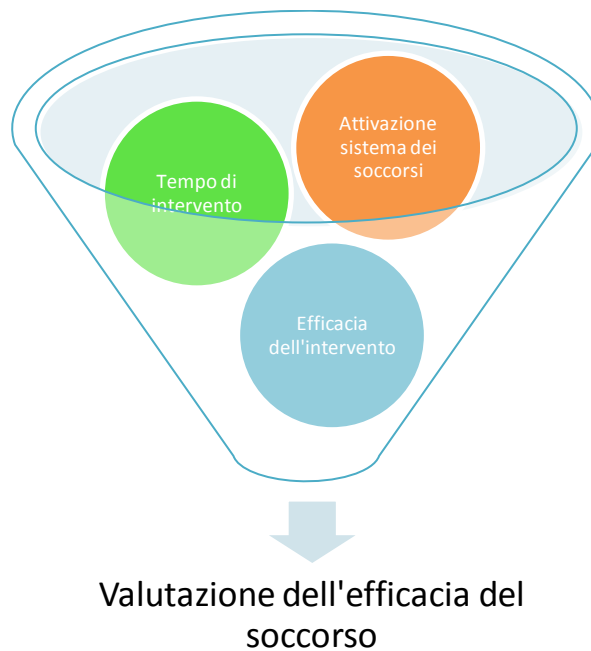


Figura 5. 14 Elementi che influenzano le prestazioni del sistema di soccorsi in caso di incidente in galleria

Infine nella valutazione del rischio globale deve essere valutata l'incidenza delle norme che regolano l'esercizio ferroviario sulle prestazioni di un Piano di Emergenza. In particolare tra le norme che regolano l'esercizio ferroviario, i seguenti aspetti influenzano le prestazioni della galleria in termini della sicurezza globale.

La velocità di transito di un convoglio all'interno di una galleria e la procedura di arresto dello stesso (fermata tradizionale o assistita) definiscono il tempo di arresto e il luogo dove devono essere prestati i primi soccorsi ai passeggeri,

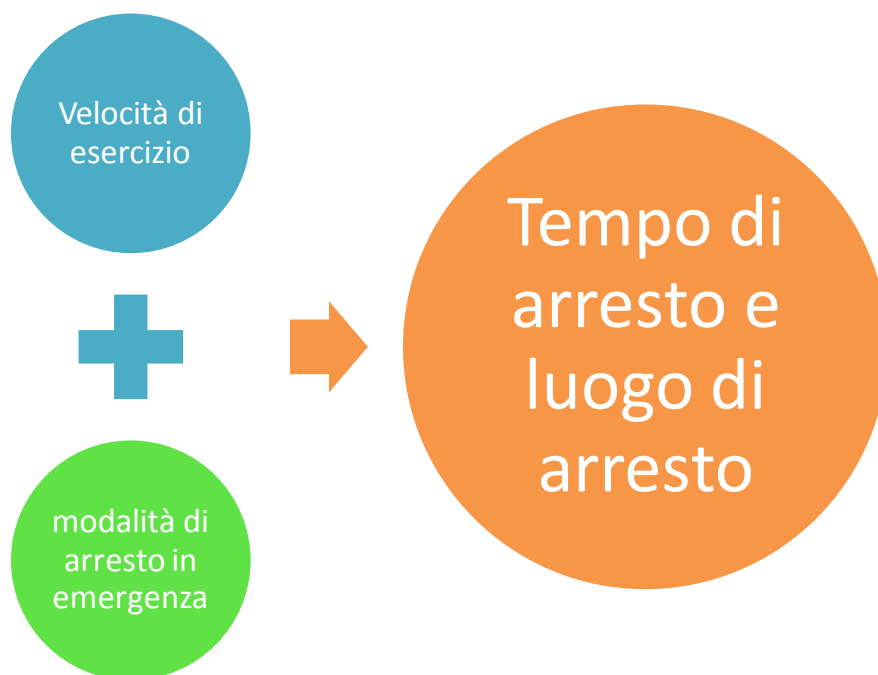


Figura 5. 15 Elementi del regolamento di esercizio che regola il transito di un convoglio in galleria che hanno influenza sulla pianificazione di emergenza

Come precedentemente mostrato anche questo aspetto non può essere valutato assestante, ma deve essere soppesato nella valutazione del rischio globale. Nel Capitolo 4 è stato illustrato su un esempio reale come a volte la prestazione migliore in termini di arresto del convoglio non coincide con la soluzione globale che consente di ottenere un minor tempo per la messa in sicurezza delle persone presenti in galleria.

Come dimostrato in precedenza, le attività necessarie per la mitigazione del rischio globale, sono un complesso di azioni, svolte da differenti soggetti, per i quali la sicurezza non è l'unico obiettivo di azione (per esempio l'esercizio ferroviario ha come obiettivo l'erogazione del servizio) a volte tra loro contrastanti che concorrono alla valutazione del rischio globale che possono essere riassunti nel seguente schema.

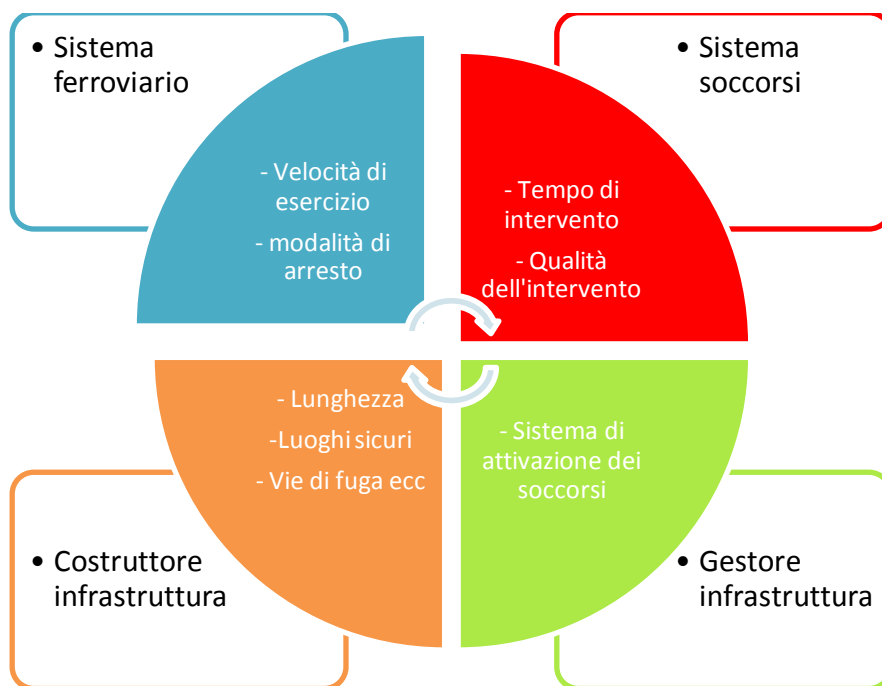


Figura 5. 16 Elenco schematico dei soggetti e delle azioni che hanno effetto sulla gestione delle emergenze in una galleria

La pianificazione congiunta di tutti questi aspetti risulta complicata in quanto ogni attore chiamato a partecipare ha obiettivi contrastanti. L'individuazione del mix di soluzioni più efficaci può minimizzare il costo globale per l'ottenimento della massima sicurezza ragionevolmente ottenibile. Tali attività devono essere svolte all'interno di un tavolo condiviso dei differenti attori chiamati a intervenire, ognuno dei quali può presentare le criticità di azione e le azioni praticabili. Una volta ottenuta la soluzione globalmente più efficace sarà poi possibile trovare delle misure compensative nel caso in cui risultasse più utile che stakeholders fosse chiamato a sopportare sforzi economici più onerosi rispetto agli altri.

Conclusioni

Risultati ed obiettivi raggiunti

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di trovare una metodologia per poter verificare l'incremento, in termini di sicurezza globale, dovuto all'applicazione di corretti metodi per la gestione delle emergenze. Per fare ciò è stata individuata una metodologia che, partendo dai sistemi maggiormente utilizzati per stimare il rischio in galleria ha permesso di valutare anche aspetti connessi con la gestione delle emergenze e l'attivazione del sistema dei soccorsi. Per fare ciò sono stati costruiti 7 sottomodelli che descrivono i vari aspetti che influenzano il rischio in galleria, alcuni di essi sono stati reperiti in letteratura, mentre quelli descrittivi degli aspetti connessi con la gestione delle emergenze sono stati sviluppati appositamente. La combinazione dei sottomodelli sviluppati permette di valutare il rischio globale connesso al transito di convogli nelle gallerie ferroviarie.

Il modello sviluppato è stato poi testato su due gallerie reali, differenti per lunghezza, caratteristiche costruttive e dotazioni di sicurezza presenti, tale applicazione ha dato la possibilità di valutare l'influenza di ogni componente sul rischio globale. L'utilizzo del modello ha permesso inoltre di evidenziare le interdipendenze tra le diverse azioni da svolgere durante la gestione di un'emergenza rendendo palese, per esempio, quanto un tempestivo sistema di diagnosi di un'anomalia e un'istantanea attivazione del sistema dei soccorsi possono influire in modo molto rilevante nel contenimento delle conseguenze in caso di incendio. Infatti l'analisi sulle gallerie pilota ha mostrato che il tempo di rilevazione anomalia e attivazione delle procedure di gestione dell'emergenza (attivazione dei soccorsi e messa in pratica delle procedure di autosalvataggio) può pesare fino al 25% del tempo totale di messa in sicurezza dei passeggeri. Il modello ha inoltre evidenziato come l'efficacia dell'intervento delle squadre di soccorso è fortemente condizionato dal tempestivo allertamento delle stesse, elemento che dipende sia dalle procedure di allertamento dei soccorsi che dalle dotazioni tecniche che gli stessi possono utilizzare in galleria per un peso di circa il 33% del tempo totale di intervento dei soccorsi.

La costruzione dei sottomodelli, esplicitando quali sono gli elementi infrastrutturali, tecnologici e organizzativi che caratterizzano ognuno di essi, ha permesso inoltre di valutare gli effetti sul rischio globale di tutte le componenti di una galleria e di poter individuare la combinazione di essi che rende minimo il rischio.

In conclusione la valutazione degli effetti, anche indiretti, che ogni componente può avere sul rischio globale, ha permesso di concentrare l'attenzione sugli aspetti interconnessi con la gestione delle emergenze e di individuare indicazioni utili all'elaborazione di Piani di Emergenza.

In particolare il presente lavoro di tesi ha evidenziato una metodologia che, coniugando aspetti scientifici caratteristici dell'analisi del rischio con procedure e metodologie tipiche della pianificazione di Protezione Civile, ha evidenziato i punti di contatto e gli elementi da valutare per ottenere una mitigazione del rischio globale in una galleria. Il presente lavoro ha inoltre evidenziato come aspetti normativi, quali ad esempio il regolamento di esercizio ferroviario e l'organizzazione dei soccorsi in galleria possono fornire prestazioni più efficienti solamente attraverso un'analisi coerente e congiunta delle decisioni, rendendo evidente che solo attraverso un approccio multidisciplinare è possibile ottenere un sistema di contenimento del rischio efficiente.

Da tali considerazioni deriva la necessità di considerare aspetti connessi con la gestione delle emergenza ancor in fase di pianificazione di massima di una galleria e non solamente come elemento propedeutico alla messa in esercizio della stessa. L'utilizzo del modello ha inoltre dimostrato che la pianificazione congiunta di tutti gli aspetti che influenzano il rischio risulta complicata in quanto ogni attore chiamato a partecipare può avere obiettivi contrastanti. L'individuazione del mix di soluzioni più efficaci può minimizzare il costo globale per l'ottenimento della massima sicurezza ragionevolmente ottenibile. Tali attività devono essere svolte all'interno di un tavolo condiviso dei differenti attori chiamati a intervenire, ognuno dei quali può presentare le criticità di azione e le azioni praticabili. Una volta ottenuta la soluzione globalmente più efficace, sarà poi possibile trovare delle misure compensative nel caso in cui un portatore di interessi fosse chiamato a sopportare sforzi economici più onerosi rispetto agli altri.

Valutazione dei limiti e prospettive future di applicazione della metodologia proposta

Il modello di valutazione del rischio globale elaborato ha avuto come obiettivo quello di condensare aspetti fin ora considerati separatamente all'interno di un unico processo di valutazione del rischio. Per questo motivo si è privilegiato, nell'ambito dello studio, l'individuazione di una metodologia che permette di considerare in un unico modello

aspetti afferenti a discipline diverse ma che hanno comunque effetto nella valutazione del rischio. Di conseguenza non si è concentrata l'attenzione dello sviluppo dettagliato di ogni sottomodello costituente il modello globale. Alcuni sottomodelli, reperiti in letteratura e riguardanti aspetti già utilizzati nelle normali procedure di analisi del rischio quali ad esempio il calcolo della probabilità di incendio e la valutazione delle conseguenze di un incendio sulla vita umana sono stati utilizzati in modo semplificato per non appesantire il lavoro di costruzione del modello e permettere comunque di testarne l'utilità. Altri aspetti innovativi, quali ad esempio l'attivazione dei soccorsi e il calcolo dei tempi di reazione delle persone presenti in galleria contengono all'interno valutazioni qualitative, dettate principalmente da analisi di incidenti reperiti in letteratura, che potrebbero comunque essere sviluppati nel dettaglio e validati con l'utilizzo di test pratici.

Le prospettive future dello studio, grazie ai risultati emersi nella presente tesi che dimostrano di poter considerare il rischio all'interno della galleria in modo interdisciplinare, e di poter di conseguenza valutare aspetti collegati con la gestione delle emergenza fino ad ora considerate separatamente dall'analisi del rischio, diventa quella di raffinare ogni singolo sottomodello e di validare ogni sua componente con test pratici in modo da eliminare ogni aspetto di soggettività nella valutazione del rischio e poter, in questo modo, ottenere misurazioni quantitative dello stesso realmente confrontabili.

A valle di queste attività sarà possibile utilizzare il modello come un vero e proprio sistema di supporto alle decisioni di ausilio alla pianificazione esterna delle emergenze nelle gallerie ferroviarie.

Ringraziamenti

Al termine del lavoro di tesi desidero ringraziare il professor Gabriele Malavasi, che mi ha seguito in modo scrupoloso, mi ha spronato a continuare quando le difficoltà sembravano rendere difficile il proseguimento di questa ricerca. Ringrazio il Laboratorio di Mobilità e Trasporti del Politecnico di Milano, tutte le persone che ci lavorano e in particolare il professor Roberto Maja. Con loro ho lavorato per nove anni e ho avuto la possibilità di apprendere gli elementi che sono stati la base di partenza di questo lavoro di tesi. Ringrazio il professor Claudio Podestà, che mi ha sempre incoraggiato a tenere viva la curiosità scientifica e la voglia di studiare anche quando gli impegni lavorativi portavano in altre direzioni. Ringrazio il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri perché mi ha lasciato la possibilità di proseguire le mie attività di ricerca parallelamente ai compiti di ufficio e perché mi ha dato la possibilità di comprendere le problematiche che si affrontano durante emergenze reali, riuscendo a coniugare aspetti scientifici con la reale operatività in emergenza. Infine ringrazio la mia famiglia, Daniela, e tutte le persone che mi sono state vicine durante questi anni densi di cambiamenti.

Bibliografia

- [1] Abate L., Brllomia G., *Valutazione comparata delle conseguenze sulla sicurezza di un incendio in galleria. Un approccio sistemico, in funzione degli impianti di spegnimento disponibili*. Quaderno AIPCR (Associazione Mondiale della Strada) Gestione del Rischio Operativo nell'esercizio delle Strade, 2010.
- [2] Accattatis F., Malavasi G., Sarace F., Saporito M., Castriota I., Cutrera G., Margarita G., *Rischio nei sistemi ferroviari: studio di metodologie applicative*, 2012.
- [3] Adrian V. Gheorghea, Birchmeiera J., Vamanub D., Papazoglouc I., Kroger W., *Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support*, 2005.
- [4] ANAS, *Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente*, 2009.
- [5] ANAS, *Direttive per la sicurezza nelle Gallerie Stradali*, Circolare del 8 Settembre 1999, n. 7735.
- [6] Arcangeli M., *Valutazione del rischio nei sistemi di trasporto*, Tesi di dottorato XXIV Ciclo del corso di dottorato in infrastrutture e trasporti – Università La Sapienza di Roma.
- [7] Boer L.C., *Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel*, Soesterberg, TNO Report, 2002.
- [8] Bongiana R., *Dispensa di "Sistemi di distanziamento e protezioni di linea nella circolazione ferroviaria"* del corso di Terminali di Impianti di Trasporto, Politecnico di Milano.
- [9] Borghetti F., Gandini P., *Individuazione di metodi e raccomandazioni a supporto della generazione di scenari di rischio incidentale nelle gallerie stradali e ferroviarie*, Impianto normativo gallerie ferroviarie, Dipartimento IN.D.A.CO. Unità di Ricerca D.I.S. - Sistemi di Mobilità Laboratorio Mobilità e Trasporti, 2012.
- [10] Bongiana R., *Dispensa di "Il sistema europeo di controllo-comando dei treni (ETCS)"* del corso di Terminali di Impianti di Trasporto - Politecnico di Milano.
- [11] Carvel R.O., Beard A.N., Jowitt P.W., *How much do tunnels enhance the heat release rate of fire?*, Edinburgh, Department of Civil and Offshore Engineering, Heriot-Watt University, 2001.
- [12] Carvel R.O., Beard A.N., Jowitt P.W., *A method for making realistic estimates of the heat release rate of a fire in a tunnel*, Edinburgh, Department of Civil and Offshore Engineering, Heriot-Watt University, 2001.
- [13] Cox R.A., *Accidental LPG Releases - Discharge, Dispersion, Ignition, and Potential Effects on People and Buildings*, Conference on Risk and Safety Management in the Gas Industry, Hong Kong, 1993.
- [14] Focaracci A., *La via italiana al progetto della sicurezza in galleria*, Quaderno AIPCR (Associazione Mondiale della Strada) Gestione del Rischio Operativo nell'esercizio delle Strade, 2010.
- [15] Guarascio M., *Soccorrere in sicurezza nei cantieri delle grandi opere infrastrutturali*, Vigili del Fuoco Soccorso in sicurezza, 2002.

- [16] Kennedy W.D., *Critical velocity: past, present and future*. Londra, contribution to the One Day Seminar Smoke and Critical Velocity in Tunnels, 1996.
- [17] Knoflacher H., Pfaffenbichler P. C., Nussbaumer H. "Quantitative Risk Assessment of Heavy Goods Vehicle Transport through Tunnels - the Tauern Tunnel Case Study" 1st International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 8-10 April 2002 PIARC.
- [18] Knoflacher H., Pfaffenbichler P.C., Nussbaumer H., *Quantitative Risk Assessment of heavy goods vehicle transport through tunnels - the Tauern Tunnel case study* Institute for Transport Planning and Traffic Engineering, Vienna University of Technology, Austria, 2002.
- [19] Knoflacher H., Pfaffenbichler P. C. "A Comparative Risk Analysis for selected Austrian Tunnels" International Conference „Tunnel Safety and Ventilation" 2004, Graz PIARC.
- [20] Hymes I., *The physiological and pathological effects of thermal radiation*, United Kingdom Atomic Energy Authority, 1983.
- [21] La Torre F., Domenichini L., *L'analisi del Rischio, Premessa Essenziale alle Soluzioni Progettuali*, Università di Firenze Dipartimento di Ingegneria Civile Dipartimento CMIC.
- [22] Lemaire A.D., van de Leur P.H.E., Kenyon Y.M., *Safety Test: Evaluation measurements of the behaviour of smoke and heat in the Benelux Tunnel* TNO Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk, 2002.
- [23] Leonardi S., Spinelli M., *Sicurezza dei Tunnel Ferroviari*, 2009.
- [24] Maja R., *Dispensa di Circolazione e sicurezza ferroviaria del corso di Teoria e Tecnica della Circolazione*, Politecnico di Milano.
- [25] Maja R., *Dispensa di "Elementi di circolazione e sicurezza ferroviaria"* del corso di Tecnica ed Economia dei Trasporti, Politecnico di Milano.
- [26] Maja R., Rainoldi G., Romanò D., Salimbeni R., *Il trasporto delle merci pericolose in galleria*, Politecnico di Milano – Dipartimento IN.D.A.CO. Unità di Ricerca D.I.S. - Sistemi di Mobilità Laboratorio Mobilità e Trasporti, 2006.
- [27] McGrattan K.B., Forney G.P., *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2004.
- [28] Manca D., Brambilla S., Caragliano S., *Un modello matematico basato sull'analisi multicriteriale per la valutazione del rischio improvviso o montante*, Dipartimento CMIC – Politecnico di Milano.
- [29] Mazziotti L., *Gli Incendi in Galleria: un Problema anche per le squadre di soccorso*, atti convegno Vigili del Fuoco Soccorso in sicurezza, 2002.
- [30] OECD, *Safety in Tunnels. Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels Paris*, 2001.
- [31] Pacilio N., Sacripanti A., "Tunnel Intelligenti - Gallerie dinamiche e analisi di rischio variabile nel tempo", ENEA, Roma, 2001.
- [32] Persson M., *Quantitative Risk Analysis procedure for the fire evacuation of a road tunnel* Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2002.
- [33] PIARC, *Fire and smoke control in road tunnel*, 1999.

- [34] PIARC, *Raccomandazioni del gruppo di esperti sulla sicurezza nelle gallerie stradali - Relazione finale*, 2001.
- [35] PIARC, *Examples of application of the QRA Model (UK, Austria, France)*.
- [36] Purser D. A., *Toxicity Assessment of Combustion Products and Modeling of Toxic and Thermal Hazards in Fire*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 1988.
- [37] Rainoldi G., Bruglieri M., Maja R., Marchionni G. "Safety in hazardous material road transportation: state of the arte and emerging problems" Advanced Technologies and Methodologies for Risk Management in the Global Transport of Dangerous Goods" - pubblicazione supportata da "The Nato Science for Peace and Security Programme", 2008.
- [38] Rainoldi G., Proietti Silvestri G., Maja R., Borghetti F., *SISTEMA –ovvero l'organizzazione della Protezione Civile per il governo e la mitigazione del rischio trasporti*– Quaderno AIPCR (Associazione Mondiale della Strada) Gestione del Rischio Operativo nell'esercizio delle Strade, 2010.
- [39] Savvides A., Han C.C. and Srivastava M.B., "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors", 7th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Roma, 2001.
- [40] Southworth F., "Regional Evacuation Modeling: A State-of-the-Art Review".
- [41] TNO, *The GREEN BOOK – Methods for determination of possible damage*, 1992.
- [42] Ventura A., Caiazzo P., *Analisi del rischio e modelli di esodo da gallerie ferroviarie*, Atti del convegno Sicurezza ed Esercizio Ferroviario – Innovazione e nuove sfide nei sistemi ferroviari, Università la Sapienza Roma, 2011.
- [43] Worm E., *Human behaviour influencing tunnel safety*, L'Aia, Ministero dei Trasporti Olandese, 2002.
- [44] Pesut M., "Safety in rail tunnels" UNECE publication, 2003.
- [45] Engineering Safety Management (The Yellow Book) Volumes 1 and 2 Fundamentals and Guidance Published by Rail Safety and Standards Board on behalf of the UK rail industry Issue 4.
- [46] Unione Europea, Libro bianco "La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte".
- [47] VVF Aosta, *Procedura operativa per incendi in galleria*, Aosta, 2005.

Legislazione

- [48] Legge 13 luglio 1999, n. 226 (Gazzetta Ufficiale n. 163 del 14 luglio 1999): *“Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 13 maggio 1999, n. 132, recante interventi urgenti in materia di protezione civile”*.
- [49] Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 6 dicembre 1999, n. 7938 (Gazzetta Ufficiale n. 57 del 9 marzo 2000): *“Sicurezza della circolazione nelle gallerie stradali con particolare riferimento ai veicoli che trasportano materiali pericolosi”*.
- [50] Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 5 giugno 2001 (Gazzetta Ufficiale n. 217 del 18 settembre 2001): *“Sicurezza nelle gallerie stradali”*.
- [51] Direttiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 Aprile 2004 relativa ai *Requisiti Minimi di Sicurezza per le gallerie della Rete stradale transeuropea*.
- [52] Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 14 settembre 2005 (Gazzetta Ufficiale n. 295 del 20 dicembre 2005): *“Norme di illuminazione delle gallerie stradali”*.
- [53] D.Lgs. 5 ottobre 2006, n. 264 (Gazzetta Ufficiale n. 235 del 9-ottobre 2006 - Serie Ordinaria n. 195) *“Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea”*.
- [54] Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 28 ottobre 2005 (Gazzetta Ufficiale n. 83 del 8 aprile 2006): *“Sicurezza nelle gallerie ferroviarie”*.
- [55] Dir.P.C.M. 6 aprile 2006, *Coordinamento delle iniziative e delle misure finalizzate a disciplinare gli interventi di soccorso e di assistenza alla popolazione in occasione di incidenti stradali, ferroviari, aerei ed in mare, di esplosioni e crolli di strutture e di incidenti con presenza di sostanze pericolose*.
- [56] Direttiva del Capo Dipartimento della Protezione Civile del 02/05/2006 *“Indicazioni per il coordinamento operativo di emergenze dovute a incidenti stradali, ferroviari, aerei e in mare, a esplosioni e crolli di strutture e a incidenti di carichi pericolosi, che possano coinvolgere un elevato numero di persone”*.
- [57] Commissione Europea [notificata con il numero C(2007) 6450] (2008/163/CE) *“specifica tecnica di interoperabilità concernente la sicurezza nelle gallerie ferroviarie nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità”*.
- [58] Dir.P.C.M del 3 dicembre 2008 *“Organizzazione e funzionamento di SISTEMA presso la Sala Situazione Italia del Dipartimento della Protezione Civile”*
- [59] Dir.P.C.M del 3 dicembre 2008 concernente *“Indirizzi operativi per la gestione delle emergenze”*.