

Sommario

1	Introduzione sui problemi degli incendi nelle gallerie stradali	4
1.1	Introduzione al problema	4
1.2	Prefazione normativa alla progettazione della sicurezza	5
1.3	Introduzione alla normativa di settore.....	6
1.4	Introduzione alla progettazione dei sistemi di sicurezza	8
1.5	Procedura di progettazione della sicurezza.....	26
1.6	Standard Anas sulle Nuove Costruzioni.....	40
2	Analisi dei gravi incidenti avvenuti nel passato.....	58
2.1	Introduzione	58
2.2	Incidente della galleria del Monte Bianco del 1999	58
2.3	Incendio della galleria del San Gottardo del 2001	66
3	Dinamica degli incendi in galleria	81
3.1	Introduzione	81
3.2	Incendi in galleria e a cielo aperto.....	81
3.3	Incendi in galleria e incendi compartimentati.....	81
3.4	Sviluppo dell'incendio.....	82
3.5	Gli incendi controllati dal combustibile e quelli controllati dalla ventilazione	87
3.6	La stratificazione dei fumi in galleria	90
3.7	Condizioni medie di flusso nel caso di flusso d'aria longitudinale	94
3.8	Determinazione di HRR negli incendi in galleria.....	97
3.9	Lunghezza delle fiamme	99
3.10	Grandi incendi in galleria in presenza di flusso longitudinale	102
3.11	Propagazione dell'incendio in galleria.....	104
4	Effetti sulle strutture di sostegno	105
4.1	Introduzione	105
4.2	Tipologie di gallerie.....	105
4.3	Il comportamento del calcestruzzo soggetto ad incendio	106
4.4	Protezione antincendio passiva.....	107
4.5	Protezione antincendio attiva	112
4.6	Un sistema di prevenzione o soppressione alternativo: il sistema FirePASS	113
4.7	Conclusioni	114
5	Effetti della presenza dei veicoli a trazione elettrica sugli incendi	116
5.1	Introduzione	116
5.2	Sicurezza elettrica nei sistemi di accumulo utilizzati in impianti FTV e AUTOMATIVE	117
6	Confronto quantitativo tra incendi con veicoli a combustione interna e a batteria.....	125

6.1	Introduzione	125
6.2	Calcolo del carico d'incendio	127
6.3	Calcolo del campo temperature medie per i diversi casi considerati	129
6.4	Calcolo del campo concentrazioni medie dei gas.....	136
7	Evoluzione degli interventi di prevenzione/protezione e di emergenza in presenza di veicoli elettrici	162
7.1	Introduzione	162
8	Conclusioni	162
9	Riferimenti	162
10	Indice delle figure	166

1 Introduzione sui problemi degli incendi nelle gallerie stradali

1.1 Introduzione al problema

Citando il *Codice Deontologico degli Ingegneri Italiani*: “Gli iscritti all'albo degli ingegneri del territorio nazionale hanno coscienza che l'attività dell'ingegnere è una risorsa che deve essere tutelata e che implica doveri e responsabilità nei confronti della collettività e dell'ambiente ed è decisiva per il raggiungimento dello sviluppo sostenibile e per la sicurezza, il benessere delle persone, il corretto utilizzo delle risorse e la qualità della vita”. Ciò significa che gli ingegneri italiani hanno doveri e responsabilità nei confronti della sicurezza e del benessere della collettività.

Il territorio italiano, per via della sua costituzione orografica, ha necessitato nel tempo della costruzione sia di gallerie stradali che ferroviarie per ampliare la comunicazione turistica e commerciale sia con le nazioni limitrofe che all'interno del territorio nazionale. Come si evince nella figura successiva, sono numerose le grandi gallerie transfrontaliere. Queste collegano il territorio italiano con Austria, Svizzera e Francia. Sono caratterizzate da intenso traffico, soprattutto commerciale, e lunghezze anche nell'ordine delle decine di chilometri.

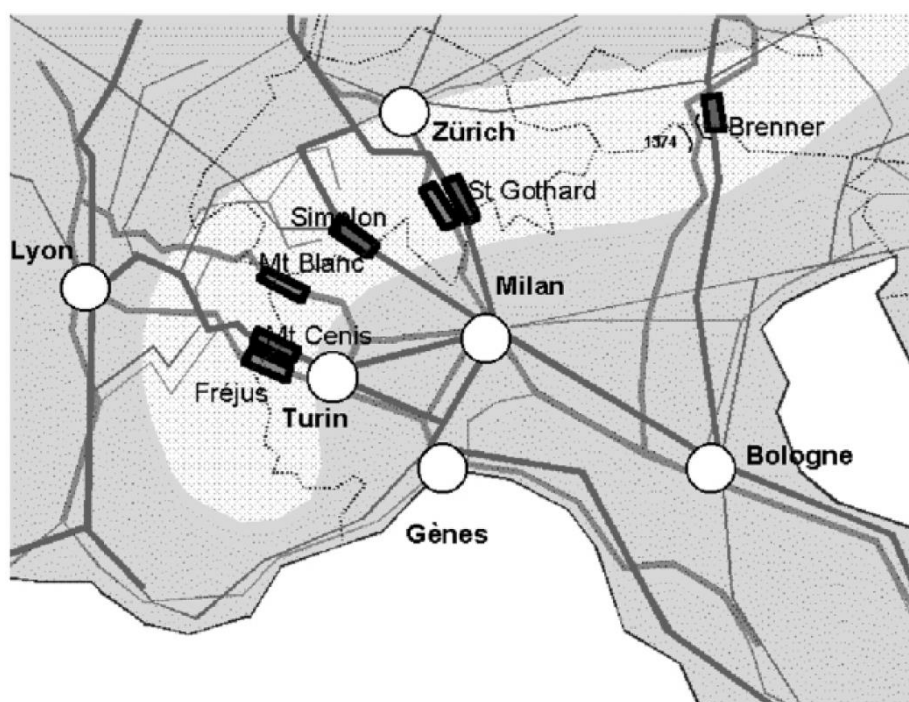


Figura 1 Grandi gallerie transfrontaliere presenti sul confine italiano (Vuilleumier, Weatherill, & Crausaz, 2002)

Di tutte le tipologie di gallerie adibite al trasporto, in questa sede verranno affrontate le gallerie stradali. Queste hanno la specificità di essere percorse da numerosi veicoli che interagiscono fra loro. È importante inoltre sottolineare come i veicoli siano controllati da generici utenti. È quindi necessario pensare ed installare specifici sistemi di sicurezza per affrontare gli scenari riferiti alle gallerie stradali. Sebbene secondo statistiche francesi, tedesche, svizzere e italiane gli incidenti stradali sono meno frequenti nelle gallerie stradali che in strade a cielo aperto, è noto a tutti che le conseguenze di un incendio in galleria possono essere assai più drammatiche rispetto ad una strada a cielo aperto. La minore frequenza di incidenti è dettata probabilmente dal fatto che le gallerie stradali sono in qualche modo un ambiente controllato. Per esempio, non vi sono problemi legati ai fenomeni atmosferici, vi sono raramente congiunzioni con altre strade, curve a piccolo raggio e soprattutto gli autisti tendono ad essere più attenti durante la guida in galleria (Carvel & Beard, 2005). Oltretutto per evitare i gravi incidenti del passato spesso si impongono limiti di velocità più bassi. Nonostante la minor frequenza degli incidenti, la specificità della galleria come infrastruttura confinata

a prevalente sviluppo unidimensionale, dà luogo a scenari di pericolo unici, amplificandone la pericolosità delle fonti e aggravando le condizioni di salvabilità e soccorribilità dei soggetti esposti (Guarascio, Lombardi, Rossi, Sciarra, & Lamendola, 2009).

1.2 Prefazione normativa alla progettazione della sicurezza

In seguito ai gravi incendi accaduti negli ultimi decenni, al fine di prevenire la sicurezza degli utenti provvedendo adeguati livelli di sicurezza nelle gallerie stradali, gli organi europei hanno redatto la **Direttiva Europea 2004/54/CE**. All'interno della direttiva si è osservata una certa propensione a definire le gallerie stradali come un sistema complesso. L'approccio al problema ha quindi definito l'impossibilità di studio del problema basato sulla definizione delle sue singole componenti. Il problema è stato affrontato adottando i fondamenti della teoria di Analisi del Rischio prevenendo delle *soglie di accettabilità* del rischio. Il rischio viene quantificato sulla base della formulazione di un *modello di rischio* elaborato su base scientifica, per quanto concerne lo studio fenomenologico, e per via tecnica nella risoluzione analitica e numerica del problema. Due anni dopo l'emanazione della *Direttiva Europea 2004/54/CE*, l'Italia ha recepito, attraverso il *Decreto Legislativo n 264 del 2006* la direttiva europea. Tuttavia, nello stesso anno, ANAS, emana le **Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali**. Tali linee guida, sono una esemplificazione della direttiva europea formulata due anni prima. Inoltre, le linee guida (ANAS, 2006), si esprimono circa alcuni dettagli specifici del tema. In riferimento a (ANAS, 2006) i concetti fondamentali della progettazione della sicurezza in gallerie stradali sono:

- *la quantificazione della sicurezza, locuzione polisemica in quanto sintesi di uno stato d'animo e di un giudizio politico-etico, in termini di rischio accettato nel contesto socioeconomico caratteristico della nazione Italia,*
- *la caratterizzazione prestazionale delle barriere di sicurezza, preventive e protettive, in termini di affidabilità ed efficienza ad esse proprie,*
- *gli insiemi di scenari di esodo possibili per la popolazione esposta al flusso del pericolo conseguente all'accadimento di un evento incidentale critico, condizionato nell'intensità e nello sviluppo dall'azione preventiva e protettiva delle barriere di sicurezza.*

Sempre citando (ANAS, 2006), in riferimento alle caratteristiche del metodo di progettazione:

- *integrare le metodologie progettuali esistenti, valide e commendevoli per aspetti specifici del problema della sicurezza nelle gallerie stradali, in una procedura completa e congruente;*
- *quantificare il livello di rischio proprio di un progetto determinando la curva cumulata complementare ad esso propria attraverso la modellazione del flusso del pericolo generato dagli eventi incidentali possibili all'interno della struttura;*
- *verificare l'accettabilità del livello di rischio conseguito per uno specifico progetto essendo fissati i limiti di accettabilità e di tollerabilità del rischio;*
- *fornire uno strumento che consenta ai soggetti preposti di assumere decisioni informate sul rischio;*
- *favorire la transizione da un regime di progettazione deterministico - prescrittivo ad un regime di progettazione probabilistico - prestazionale.*

L'analisi del rischio, una volta identificate le soglie di accettabilità, è necessario per determinare il grado di sicurezza da attribuire alla galleria. In caso di livello di sicurezza non accettabile si può procedere quindi a progettare interventi di adeguamento (sia strutturale che impiantistico).

1.3 Introduzione alla normativa di settore

A seguito dei numerosi incendi verificatisi nelle gallerie transalpine negli ultimi decenni, la sicurezza nelle gallerie stradali ha assunto sempre di più una rilevanza sociale. L'impatto dell'opinione pubblica sugli avvenimenti è stato emotivamente forte ed ha aperto un dibattito sulla sicurezza che ha esortato organi statali e comunitari a cercare delle risposte per assicurare una adeguata prevenzione e protezione dai danni. Infatti, numerosi sono i danni diretti e indiretti provocati dagli incidenti passati. Per quanto concerne i danni diretti ci si riferisce a:

- le vittime (39 morti nel 1999 alla Galleria del Monte Bianco, 12 morti nel 1999 e agli 11 morti nel 2000 alla Galleria del San Gottardo);
- danni strutturali, economicamente stimabili attraverso il ripristino.

Per quanto riguarda i danni indiretti ci si riferisce invece alla interruzione di servizio della galleria. Questo può portare a un disagio degli utenti dovuto alla perturbazione della funzionalità della rete viaria locale. L'impatto si ripercuote direttamente sull'economia locale oltre che sull'impatto ambientale indiretto. Il mancato esercizio della galleria ha l'inevitabile destino di incrementare le pendenze ed allungare i percorsi degli utenti portando a maggiori consumi e maggiore produzione dei prodotti di scarico.

Ecco quindi che per rispondere alle esigenze di sicurezza è stata promulgata dal Parlamento Europeo la *Direttiva 2004/54/CE*. La direttiva contiene la definizione e i *Requisiti Minimi Sicurezza per le Gallerie Stradali della Rete Transeuropea* individuando gli obiettivi della sicurezza, i parametri da considerare e i gruppi di requisiti da soddisfare. Inoltre, la norma suggerisce un approccio sistemico nella formulazione e comparativo nei contenuti per la progettazione delle gallerie in fase di costruzione, indica analiticamente l'analisi di rischio da svolgere fissando le condizioni di applicabilità e gli obiettivi da perseguire.

La direttiva richiede di svolgere, secondo le metodologie dettate dallo stato dell'arte, una analisi del rischio quando una galleria non può essere adeguata ai requisiti minimi di sicurezza di riferimento. La definizione di inadeguatezza realizzativa deve essere riferita a manifesta impossibilità, ovvero deve essere motivata da motivi tecnici/tecnologici o ascrivibili a costi sproporzionati. L'analisi del rischio, inoltre, deve dimostrare l'*equivalenza*, ovvero che adottando misure alternative e/o integrative venga incrementato il livello di rischio rispetto ai requisiti minimi di sicurezza.

Secondo la scelta di una metodologia di analisi del rischio è lasciata alla scelta dei singoli paesi membri. Tuttavia, non è ancora raggiunto l'obiettivo in quanto non esiste una metodologia universale per l'analisi dei rischi. Il professionista è quindi chiamato ad operare una scelta su:

- livello minimo di rischio accettabile (livello soglia);
- metodo di analisi del rischio (analitico o numerico ad esempio).

I criteri di accettazione invece si classificano in funzione sull'essere basati su:

- rischio quantitativo e qualitativo;
- conseguenze qualitative e deterministiche.

Diversi sono i metodi di analisi del rischio, ma possono essere classificati in:

- metodi di progettazione (riferiti allo stato dell'arte);
- metodi di analisi delle conseguenze (si fa riferimento allo scenario peggiore);
- metodi probabilistici.

La quantificazione invece avviene attraverso specifiche misure del rischio che si dividono in misure di rischio individuale e collettivo. Le misure di rischio sono rappresentate in via analitica e grafica, definendo prima le soglie di rischio accettabile.

Successivamente alla direttiva, sono state promulgate le linee guida ANAS (ANAS, 2006). Le linee guida si prefiggono l'obbligo di essere uno strumento per i professionisti nella definizione dello standard di progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali. Le linee guida risultano però congruenti con le metodologie e gli obbiettivi indicati nella direttiva emanata due anni prima. Citando (ANAS, 2006) *"le Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali combinano, previo adattamento alle caratteristiche specifiche del sistema galleria, i principi e le tecniche della progettazione prestazionale, dell'analisi delle conseguenze, dell'approccio probabilistico all'analisi di rischio adottati in diversi Stati della Comunità Europea nella valutazione del rischio degli impianti di processo"*.

L'approccio che si utilizza nello sviluppo del metodo di progettazione è *Approccio Bayesiano Classico con Analisi delle Incertezze*.

Le prescrizioni imposte dalla direttiva sono inglobate nel metodo di progettazione della sicurezza, attraverso la procedura di Analisi di Vulnerabilità del sistema galleria. Attraverso l'analisi viene fatto un confronto tra i requisiti minimi di sicurezza della direttiva e i valori limite dei parametri di sicurezza ricavati da serie storiche ed analisi statistiche di incidentalità.

All'interno dell'analisi di vulnerabilità gioca un ruolo fondamentale la componente prestazionale della Direttiva che assicura che la progettazione dell'opera sia eseguita in accordo ai principi dell'ingegneria dei trasporti e dell'ingegneria della sicurezza. L'analisi di vulnerabilità quindi ha lo scopo principale di identificare i deficit di sicurezza verificando i requisiti prestazionali delle infrastrutture attraverso l'analisi del rischio. Quindi seguendo le linee guida si assicura uno standard di sicurezza superiore al rischio tollerabile se l'analisi di vulnerabilità dimostra il soddisfacimento dei requisiti minimi della direttiva.

Il livello di analisi del rischio utilizza tecniche note e codificate; citando (ANAS, 2006):

- tecniche probabilistiche di identificazione e caratterizzazione degli eventi incidentali rilevanti pertinenti al sistema (funzioni di distribuzione, alberi degli eventi);
- tecniche probabilistiche di rappresentazione degli scenari di pericolo possibili, condizionati nell'evoluzione dall'affidabilità e dall'efficienza dei sistemi di sicurezza che realizzano le misure di sicurezza protettive in condizioni di emergenza (alberi degli eventi);
- tecniche di soluzione analitiche e numeriche dei modelli formulati per rappresentare il flusso del pericolo nella struttura, determinato dai fenomeni termici e fluidodinamici indotti da specifici eventi incidentali, al fine di caratterizzare l'ambiente interno alla struttura nel quale si realizza il processo di esodo degli utenti coinvolti e l'azione degli addetti al soccorso (modelli termo - fluidodinamici semplificati, modelli formulati e risolti adottando il metodo della Fluidodinamica Computazionale);
- tecniche statistiche di soluzione dei modelli di esodo degli utenti dalla struttura in condizioni di emergenza (tecniche Monte Carlo);
- tecniche analitiche e grafiche di rappresentazione del rischio connesso ad una galleria stradale (curve cumulate complementari);
- criteri di valutazione del rischio congruenti con dottrine di accettabilità del rischio note e codificate.

Le linee guida pongono degli obiettivi dell'analisi del rischio in riferimento alla sicurezza, citando (ANAS, 2006):

- verificare l'accettabilità del livello di rischio proprio di una infrastruttura quando essa sia realizzata soddisfacendo i requisiti minimi di sicurezza fissati dalla Direttiva, avendo assunto che le misure strutturali ed i sistemi di sicurezza che realizzano le misure impiantistiche siano progettati in conformità ai dettami della buona pratica e realizzati a regola d'arte;
- individuare misure alternative ed integrative al gruppo di requisiti minimi di sicurezza, fissati dalla Direttiva per una determinata galleria in funzione dei parametri di sicurezza ad essa propri, quando

detti parametri assumano valori tali da determinare un livello di rischio non accettabile, ovvero quando sussista un reale impedimento all'adeguamento causato da vincoli realizzativi manifesti ovvero alienabili con costi sproporzionati;

- dimostrare l'equivalenza ovvero la riduzione del livello di rischio conseguito attraverso l'adozione di misure alternative ed integrative, rispetto al livello di rischio assicurato dal soddisfacimento dei requisiti minimi di sicurezza.

Il livello di rischio accettabile invece è un concetto aleatorio. È il risultato di una scelta che si basa su numerosi parametri, tra cui:

- base giuridica
- contesto socioeconomico in cui si inserisce l'opera.

Gli obbiettivi da perseguire possono essere sintetizzati come la prevenzione e la protezione contro danni incidentale. La prevenzione deve essere svolta al fine di combattere le situazioni che possono mettere in pericolo vita umana, ambiente e beni e servizi. A questo fine si introducono misure che hanno lo scopo di ridurre la probabilità di accadimento dei danni. In secondo luogo, si ha la protezione delle conseguenze dovute ad eventi incidentali. Le linee guida prefiggono l'obbligo di perseguire la protezione dei soggetti coinvolti direttamente nell'incidente (permettendone la fuga), soggetti non direttamente coinvolti nell'incidente (permettendo loro di evitare ulteriori incidenti), gli organi addetti ai servizi di emergenza (Vigili del Fuoco e Primo Soccorso), l'ambiente circostante, struttura ed impianti.

L'analisi del rischio invece viene definita come strumento scientifico che deve essere adoperato al fine di:

- studiare la necessità di misure integrative rispetto ai requisiti minimi di sicurezza in presenza di anomalie rilevate;
- stabilire l'equivalenza tra misure alternative e/o compensative rispetto ai requisiti minimi imposti;
- valutare le possibili conseguenze successive ad un evento incidentale, studiando la sicurezza di utenza, addetti alle emergenze e servizi di soccorso.

1.4 Introduzione alla progettazione dei sistemi di sicurezza

1.4.1 Il sistema galleria

Il sistema galleria, in quanto confinato, permette approcci quantitativi al problema della sicurezza. Considerando la galleria come volume di controllo è possibile stimare, per lo meno a grandi linee, i flussi di massa ed energia entranti e uscenti da esso. Facendo valere poi i principi di conservazione della massa e dell'energia (sotto talune ipotesi) è possibile svolgere in maniera quantitativa un'analisi incidentale in accordo ai principi dell'ingegneria della sicurezza.

Per fare ciò si identificano le variabili di stato pertinenti:

- la massa dei veicoli in transito attraverso l'infrastruttura,
- l'energia totale dei veicoli e delle merci trasportate.

L'energia totale dei veicoli presente è data dalla somma dell'energia propria dei veicoli e dell'energia contenuta nelle merci trasportate. Si possono rilevare tre contributi:

- energia potenziale del veicolo, dettata dalla massa dei veicoli;
- energia cinetica, determinata dallo stato di moto dei veicoli,
- l'energia interna, dettata dalle caratteristiche chimico-fisiche del veicolo e delle merci trasportate.

Vanno successivamente individuati gli eventi incidentali critici. Si possono identificare numerose classi ascrivibili al sistema galleria:

- collisioni seguite da incendio dei veicoli coinvolti,
- incendi nei veicoli,
- rilasci in fase liquida (sversamenti) di sostanze infiammabili,
- rilasci in fase gassosa di sostanze tossiche, nocive e/o infiammabili
- esplosioni dovute all'innesco del combustibile presente nei serbatoi o merci contenenti materiale che può essere suscettibile ad esplosione.

Successivamente alla definizione degli eventi incidentali critici si studiano le traiettorie, ovvero gli sviluppi dei possibili scenari fuori dalla traiettoria di successo, ovvero quella realizzata in condizioni di normale esercizio. Si studiano così le traiettorie di emergenza al fine di implementare un sistema da mettere in atto in caso di scenario di emergenza previsto.

I flussi identificati sono i flussi di traffico in normale esercizio e i flussi di pericolo, ovvero quelli in condizione di emergenza. Il flusso di pericolo risultante dai processi di scambio di massa e di energia con il sistema galleria, successivamente all'evento critico incidentale, determina una possibile evoluzione delle prestazioni della sicurezza interna alla galleria durante le emergenze.

Il flusso di pericolo, assieme alla distribuzione dei veicoli, serve per identificare le possibili vie di esodo per la popolazione esposta. La popolazione esposta è costituita da utenti e addetti al soccorso.

Definito il danno come: *vettore rappresentativo delle conseguenze sulle componenti sensibili del sistema* (ANAS, 2006), si cercano i soggetti che possono svolgere il ruolo di recettore del danno. All'interno del sistema galleria si individuano tre possibili recettori del danno, ovvero:

- popolazione esposta;
- impianti e struttura;
- ambiente circostante.

1.4.2 Cenni all'analisi della vulnerabilità

Risulta necessario e di interesse sviluppare un modello di rischio per determinare gli effetti sui recettori del danno. In primis gli utenti, determinando le conseguenze sulla loro salute e realizzando scenari di esodo. Inoltre, il modello di rischio permette la simulazione dell'evoluzione degli scenari e dei processi connessi all'evento incidentale. Per questo genere di problemi si adotta un approccio sistemico, ovvero: a partire da uno stato iniziale conosciuto, si analizzano anche le evoluzioni delle singole componenti con l'evoluzione del sistema. Le componenti che vengono considerate sono:

- la galleria
- l'ambiente circostante
- le modalità di esercizio
- i veicoli ed il traffico
- il comportamento degli utenti

I requisiti minimi di sicurezza, indicati in direttiva, sono raggruppati in maniera omogenea in funzione dei parametri di sicurezza. I parametri vengono distinti in:

- parametri rilevanti;
- parametri caratteristici.

Quelli rilevanti sono:

- lunghezza della galleria;
- volume di traffico all'interno della galleria.

I parametri caratteristici sono:

- numero di fornici;
- numero di corsie;
- geometria della sezione della galleria;
- allineamento verticale e orizzontale;
- tipologia di galleria;
- tipologia di traffico (monodirezionale o bidirezionale);
- distribuzione del traffico nel tempo;
- rischio di congestione (giornaliero o stagionale);
- tempo di intervento dei servizi di pronto intervento;
- presenza e percentuale di veicoli pesanti;
- presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose;
- caratteristiche delle strade di accesso;
- larghezza delle corsie;
- considerazioni relative alla velocità;
- condizioni geografiche e meteorologiche.

1.4.3 Cenni all'analisi del rischio

Numerosi parametri hanno portato alla nascita e allo sviluppo di una metodologia applicativa ormai consolidata:

- sviluppo di un modello di rischio probabilistico/quantitativo comprensivo di incertezze casuali ed epistemiche associate alle prestazioni in ambito sicurezza;
- utilizzo della *root tree analysis* (RCA) per lo studio previsionali degli scenari a partire da determinati eventi critici iniziatori
- simulazione del processo di esodo degli utenti della struttura.

In accordo con (ANAS, 2006) l'analisi del rischio si prefigge gli obiettivi di:

- identificare criteri e livelli di accettabilità del rischio;
- analizzare alternative progettuali per soddisfare requisiti di accettabilità del rischio.

I criteri di accettabilità vengono di consuetudine classificati come:

- criteri di accettazione del rischio qualitativo, deterministico, basati sull'analisi delle conseguenze per un singolo scenario incidentale mediante l'uso della tecnica RCA;
- criteri quantitativi basati sull'analisi di rischio probabilistica;

Consolidata in letteratura è la comprensione dei fondamenti dei criteri di accettabilità del rischio. I principi a fondamento sono:

- principio ALARP;
- principio MEM;
- principio GAMAB.

Il principio ALARP è utilizzato nel processo decisionale, noto il rischio, ove è necessario prevedere la progettazione di misure di prevenzione e protezione in gallerie che non soddisfano i requisiti minimi di sicurezza. Le scelte progettuali devono poi essere congruenti con la procedura di analisi dei rischi probabilistica/quantitativa. Il principio ALARP porta alla scelta della soluzione progettuale che correlata al minor livello di rischio (livello specifico al sistema in questione analizzato) ma che sia anche compatibile con i vincoli tecnici/tecnologici ed economici. La soluzione progettuale ottima, è dettata dall'applicazione del criterio costi-sicurezza, ovvero dalla soluzione che combina il rischio minimo, con la minimizzazione dei costi ed il rispetto dei vincoli.

1.4.4 Obiettivi della sicurezza e sistemi di sicurezza

Gli obiettivi da perseguire per la sicurezza nelle gallerie stradali si possono racchiudere in:

- Sicurezza della vita degli utenti;
- Sicurezza della vita degli addetti alle emergenze;
- Protezione della struttura;
- Minimizzare l'impatto sull'ambiente.

Chiaramente esiste una gerarchia degli obiettivi, che va considerata nell'ambito della progettazione dei sistemi di sicurezza.

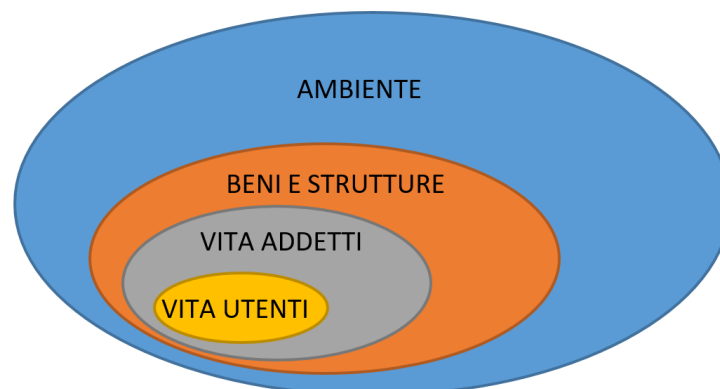


Figura 2 Gerarchia degli obiettivi da perseguire nella sicurezza

Definiti gli obiettivi si può procedere allo sviluppo dei criteri di analisi della sicurezza. Questi si basano su:

- Requisiti minimi
- Caratterizzazione dell'incidentalità
- Valutazione del rischio
- Formulazione e caratterizzazione degli scenari incidentali rilevanti
- Definizione dei criteri di sopravvivenza per auto salvataggio degli utenti
- Strategie di esodo

Definiti gli obiettivi e i criteri di analisi si procede allo sviluppo delle strategie, quali:

- Strategia costruttiva
- Strategia dell'impiantistica di sicurezza
- Strategia di gestione della sicurezza
- Strategia del controllo dei fattori di rischio

Nella seguente figura sono identificate le principali strategie da adottare divise per obiettivi da perseguire.

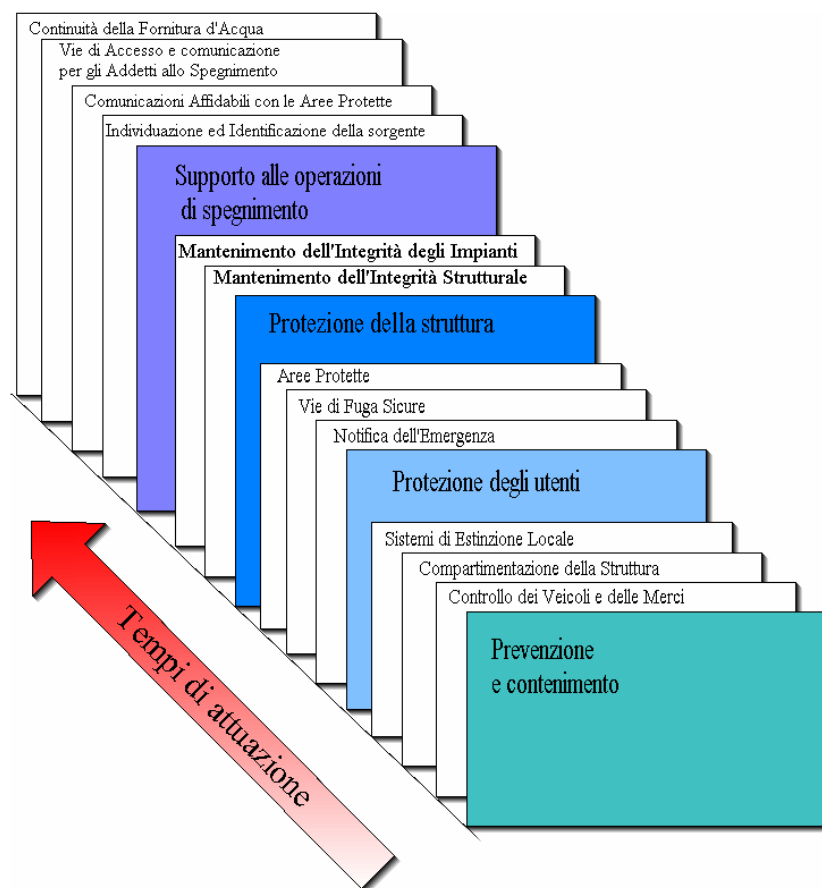


Figura 3 Principali strategie in funzione degli obiettivi da perseguire (ANAS, 2006)

Nella sicurezza in galleria, in fase di progettazione, viene adoperato il principio della difesa multipla. Si tratta della progettazione di diverse barriere di sicurezza multiple e diverse nella loro funzionalità che hanno l'obiettivo di garantire i livelli di sicurezza per la struttura e per la salute pubblica. I sistemi di sicurezza hanno i compiti di:

- Controllo
- Mitigazione
- Prevenzione degli eventi incidentali

I sistemi di sicurezza introdotti tengono conto della risposta della struttura nelle condizioni di emergenza e la risposta dell'ambiente.



Figura 4 Risposta delle componenti ai sistemi di sicurezza (ANAS, 2006)

Dalle linee guida vengono sintetizzati i seguenti sistemi di sicurezza riportati in figura.



Figura 5 Principi di progettazione proposti dalle linee guida (ANAS, 2006)

La configurazione delle diverse tipologie di sistemi di sicurezza viene esemplificata nella seguente figura identificativa.

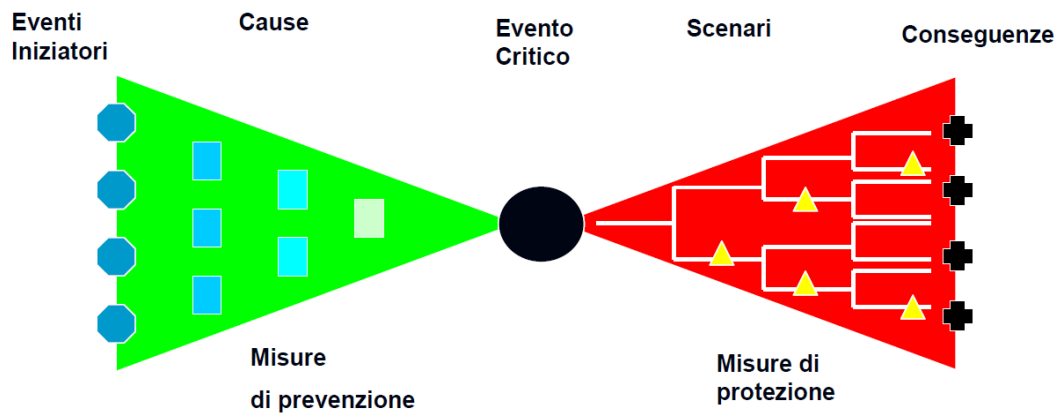


Figura 6 Diagramma a farfalla delle topologie di interventi di sicurezza

Il diagramma a farfalla è uno strumento che aiuta la visualizzazione dell'applicazione dei sistemi di sicurezza installati o in fase di progettazione. In questa maniera si analizzano i punti di funzionamento dei sistemi di sicurezza in riferimento ai processi incidentali a partire dagli eventi iniziatori fino alle conseguenze. Le misure si possono suddividere in:

- Misure preventive atte alla riduzione della probabilità di accadimento;
- Misure protettive atte alla riduzione dei possibili danni mitigando la magnitudo.

Le misure di sicurezza si suddividono poi in:

- Strutturali;
- Tecnologiche;
- Comportamentali.

I sistemi di sicurezza vengono valutati in funzione dell'efficacia. L'efficacia va sempre valutata sia per quanto concerne i sistemi già presenti che i sistemi in fase di progettazione, in quanto l'efficacia è una variabile condizionata dall'evoluzione di sequenze incidentali possibili. L'efficacia dipende da affidabilità ed efficienza intrinseche al sistema.

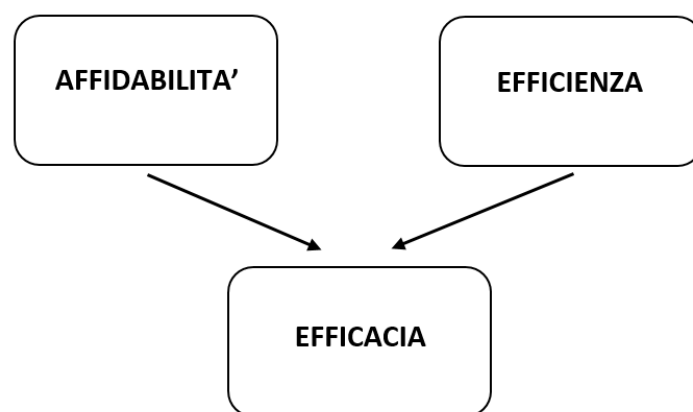


Figura 7 Lo schema identifica come efficacia una proprietà di sistema dettata da efficienza ed affidabilità

Si definisce efficienza, in una determinata condizione di esercizio, come rapporto tra prestazione effettiva e prestazione di riferimento attesa. L'affidabilità invece è definita in termini di malfunzionamento sulla vita media di progetto.

I sistemi di sicurezza possono essere sistemi fisici/ingegneristici o compite da addetti che seguono specifiche procedure o controlli amministrativi. Come cita (ANAS, 2006) un'azione di sicurezza può essere l'azione di un

operatore, un sistema di prevenzione, un sistema di monitoraggio, e controllo del traffico, un sistema di rilevazione incidenti, un elemento architettonico strutturale ecc... Principio fondamentale, da tenere sempre a mente durante le fasi di progettazione, è che le componenti di un sistema di sicurezza devono operare in maniera coordinata, quindi deve essere evitata ogni tipologia di interferenza.

I sistemi di sicurezza possono essere classificati come:

- Passivi, quando sono sistemi di tipo fisico sempre attivi e non richiedono l'operatività di un addetto o un sistema di controllo automatizzato;
- Attivabili, quando sono sistemi di tipo ingegneristico che sono attivabili per via manuale da parte di operatore o in maniera automatica grazie ad un sistema di controllo. I sistemi di sicurezza di questo tipo richiedono un flusso di dati in entrata. Segue che richiedono una rilevazione/diagnosi, un sistema di trasferimento dell'informazione a partire dalla sorgente ed infine un sistema di elaborazione dei dati (manuale, automatico analogico o automatico digitale) e gestione dell'attivazione del sistema;
- Azioni individuali-collettive, comportamentali/operative di utenti ed addetti in funzione del loro discernimento sensoriale, comunicazione e procedure operative suggerite;
- Sistemi simbolici, ovvero sistemi di comunicazione a supporto di altri sistemi.

Di seguito, in figura, si riportano i sistemi di sicurezza citati nelle linee guida (ANAS, 2006).



Figura 8 Sistemi di sicurezza citati nelle Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali

La procedura di progettazione degli interventi atti alla sicurezza deve fare affidamento alla metodologia di utilizzo di analisi di rischio quantitativa per la valutazione degli scenari successivi all'utilizzo dei sistemi di sicurezza. Per fare ciò è fondamentale la scomposizione del sistema sicurezza nei vari sottosistemi analizzati precedentemente.

Fondamentale è poi la rilevanza del sistema, requisito fondamentale dei sistemi. Citando (ANAS, 2006), una barriera di sicurezza è considerata rilevante se:

1. l'efficienza di una barriera di sicurezza deve essere dimostrata per gli scenari incidentali possibili;
 - l'efficienza è definita come l'abilità di una barriera di sicurezza tecnologica a realizzare una funzione di sicurezza per un fissato intervallo temporale operando in modo non degradato in specifiche condizioni;

- la determinazione dell'efficienza di una barriera di sicurezza richiede la valutazione del progetto ossia la verifica dell'idoneità delle regole e dei codici utilizzati nella progettazione e la compatibilità con il sistema galleria stradale;
 - la determinazione dell'efficienza di una barriera di sicurezza deve essere effettuata nella fase di analisi della sicurezza del sistema galleria sulle basi dei dati resi disponibili dai fornitori od indicati dai progettisti, applicando norme e guide tecniche riconosciute ed accettate, realizzando prove in situ;
2. il tempo di risposta di una barriera di sicurezza deve essere compatibile con la cinetica degli scenari;
- il tempo di risposta è definito come l'intervallo temporale che intercorre tra l'attivazione della barriera e l'attivazione completa della funzione di sicurezza alla quale è preposta;
 - la determinazione del tempo di risposta di un sistema ingegneristici deve essere effettuata nella fase di analisi della sicurezza del sistema galleria sulla base dei dati resi disponibili dai fornitori od indicati dai progettisti applicando norme riconosciute ed accettate, realizzando prove in situ;
 - il tempo di risposta delle azioni individuali- collettive dipende da numerosi fattori come l'addestramento degli addetti, la rapidità di diagnosi in presenza di eventi incidentali, l'accessibilità delle barriere di sicurezza ad azionamento manuale, la conoscenza acquisita dagli operatori delle procedure di gestione dell'emergenza;
3. il livello di confidenza di una barriera di sicurezza è legato all'affidabilità del sistema ingegneristici;
- il livello di confidenza è inversamente proporzionale alla probabilità di malfunzionamento su richiesta del sistema ingegneristici e corrisponde all'affidabilità di una barriera di sicurezza nel realizzare in modo corretto la funzione di sicurezza richiesta in modo conforme all'efficienza ed al tempo di risposta fissati per tutte le condizioni operative previste e per un determinato intervallo di tempo.

1.4.5 Definizioni riferite alla progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali

Vengono indicate successivamente le definizioni dei termini chiave in accordo alle Linee Guida.

Strada: porzione dello spazio fisico entro il quale si realizza l'atto di moto di un insieme finito di veicoli in mutua interazione.

Traffico: atto di moto di un insieme finito di veicoli in mutua interazione.

Galleria stradale: struttura confinata dislocata lungo una strada interessata dai flussi di massa e di energia associati al traffico.

Galleria stradale a traffico monodirezionale: galleria soggetta a flusso di veicoli in un'unica direzione.

Galleria stradale a traffico bidirezionale: galleria soggetta a flussi di veicoli in due distinte direzioni.

Il sistema galleria è costituito dei seguenti elementi:

- *struttura*
- *sistemi di sicurezza*
- *veicoli e utenti*
- *ambiente circostante.*

Le variabili che condizionano il sistema vengono dette *variabili di processo*, e nel caso di sistema galleria sono la *massa* e l'*energia associata* ai veicoli facenti parte del traffico.

Il sistema galleria può seguire due distinte traiettorie degli eventi. Lo stato del sistema, variabile nel tempo, può assumere una:

- traiettoria legata a scenari di normale esercizio (condizione esercente alla continuità di traffico in assenza di eventi incidentali).
- Traiettorie legate a scenari di emergenza successivi ad eventi incidentali critici.

La progettazione della sicurezza spesso si affida a strumenti di carattere numerico per l'analisi dei parametri e le variabili di stato. Trattasi di strumenti di natura scientifica sviluppati e usati in accordo alla comunità tecnica scientifica che ne determina lo stato dell'arte. I sistemi descritti risultano essere:

- Metodo fluidodinamico;
- Metodo termodinamico.

Il sistema galleria può essere definito come sistema termodinamico soggetto a flussi di massa ed energia e quindi può essere studiato anche come sistema fluidodinamico e termodinamico. Il sistema è considerato come aperto in quanto è soggetto sia flussi in entrata che a flussi in uscita. Una rappresentazione dinamica del sistema in modalità di esercizio è data nella figura seguente, immagine elaborata dalle Linee Guida già citate (ANAS, 2006).

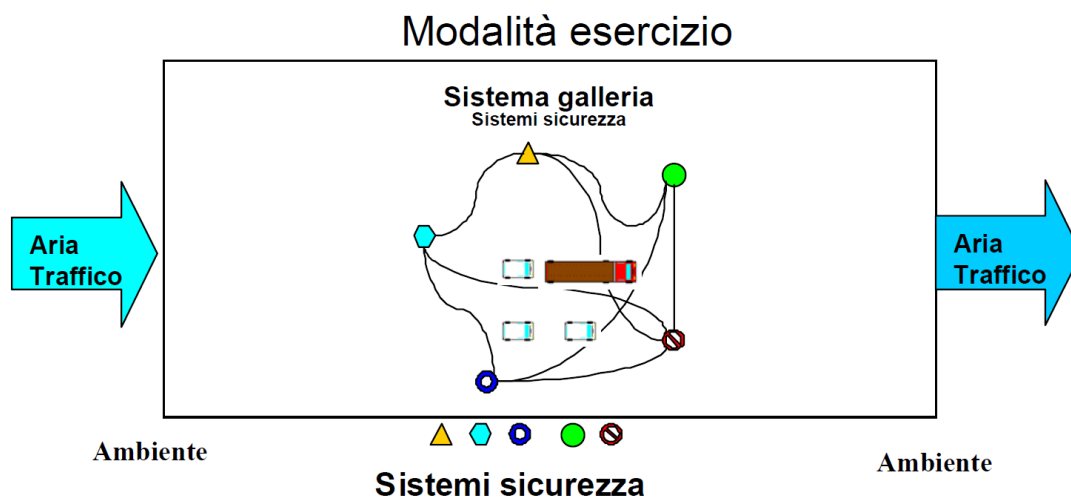


Figura 9 Sistema galleria (in esercizio) assimilato a sistema termodinamico

Il sistema viene considerato come sistema termodinamico aperto in cui vi è un flusso di massa ed energia dettato dal traffico veicolare. La massa è costituita dalla massa totale dei veicoli in entrata. La massa di ciascun veicolo è ascrivibile alla somma della massa a vuoto e la massa dei passeggeri e/o merci trasportate. In maniera analoga, per quanto concerne il flusso di energia, si può descrivere il flusso energetico come la somma di energia meccanica ed energia interna dettata dal carico incendio.

Il volume di controllo può essere, a seconda dei casi, considerato come tutta la galleria o solo parte di essa.

Definite le variabili, in condizione di esercizio di traffico, il flusso di massa veicolare può essere descritto e studiato con metodi di carattere fluidodinamico. Mediante l'analisi è possibile studiare le transizioni da regime di traffico scorrevole in condizioni di traffico in esercizio a regime di traffico anomalo in situazioni di emergenza e modellare il flusso d'aria ascrivibile al moto stesso dei veicoli e della produzione di gas inquinanti in funzione dei regimi di traffico. Oltre a ciò, in funzione della modellazione fluidodinamica, è possibile operare la progettazione dei sistemi di gestione e controllo del traffico che restituiscano dati di input per la gestione della qualità dell'aria in principio di risparmio energetico, costituendo sistemi flessibili e adattabili alle specifiche condizioni.

Le misure di sicurezza preventive hanno l'obiettivo di vincolare il sistema galleria sulla traiettoria di successo lontana dall'evento incidentale. L'evento incidentale è frutto di fattori causali suddivisibili in quattro categorie correlate fra loro. Il tutto è schematizzato nel seguente grafico.

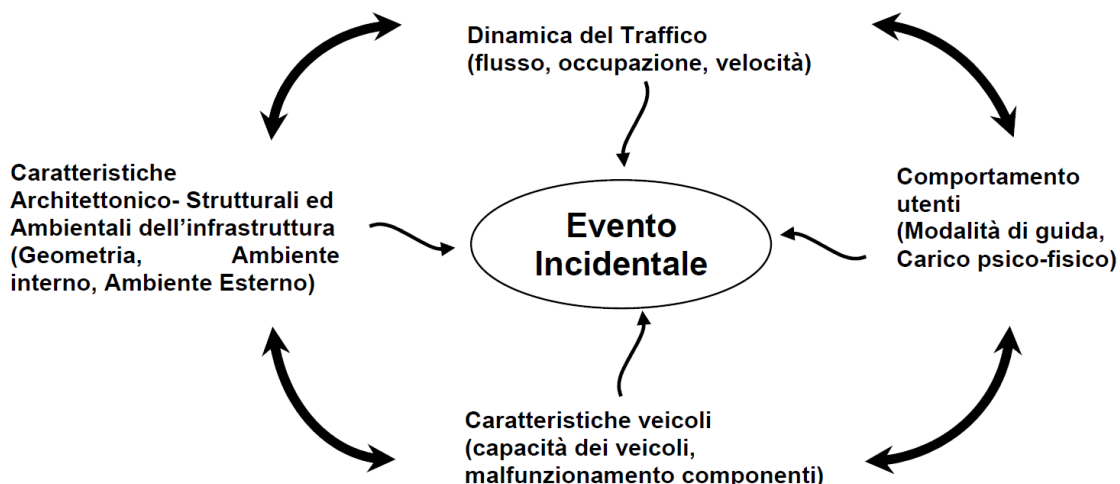


Figura 10 Fattori causali all'evento incidentale

L'instabilità di uno dei fattori comporta l'instabilità del sistema con conseguente evento incidentale. Le azioni e le misure di sicurezza hanno l'obiettivo di limitare e controllare le instabilità potenziali del sistema. Inoltre i sistemi non solo si interfacciano e condizionano la dinamica del sistema galleria, ma condizionano anche la risposta degli utenti in condizioni di esercizio.

Un evento incidentale, in ambito di traiettorie, è identificato con un punto di biforcazione a partire dal quale si verificano deviazioni dallo scenario di successo. In questa situazione, si può ridefinire pericolo come sorgente potenziale di danno.

L'energia cinetica determina il pericolo meccanico-cinetico mentre l'energia interna di un veicolo, dettata dalle proprietà chimico fisiche dei materiali che costituiscono i veicoli e carichi trasportati, determina il pericolo termo-chimico. L'evento pericolo è l'evento iniziatore che converte il pericolo potenziale in incidente.

Mentre il pericolo meccanico-cinetico è affrontato in ambito di sicurezza stradale, il pericolo termo-chimico che ne deriva è soggetto ad analisi di rischio antincendio. Gli eventi pericolosi connessi al pericolo termochimico sono gli eventi di incendio, collisione, sversamento di combustibili liquidi infiammabili, detonazione e deflagrazione oltre che rilascio di sostanze tossiche e nocive. Gli eventi pericolosi correlati al sistema galleria determinano gli insiemi delle traiettorie incidentali possibili. I sistemi di protezione come visto hanno la funzionalità di limitare le deviazioni di traiettoria. Questi sistemi interagiscono con le condizioni in galleria ed hanno conseguenze sugli elementi sensibili del sistema galleria per diversi stati di emergenza.

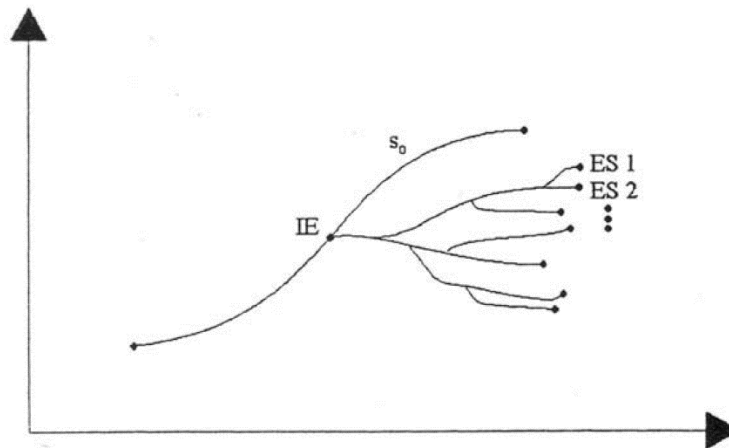


Figura 11 Traiettorie rappresentanti gli scenari di deviazione rispetto all'esercizio (ramo principale)

Si può rappresentare schematicamente il sistema termodinamico galleria, deviato rispetto all'esercizio. Il sistema viene quindi mostrato nella sua modalità di emergenza.

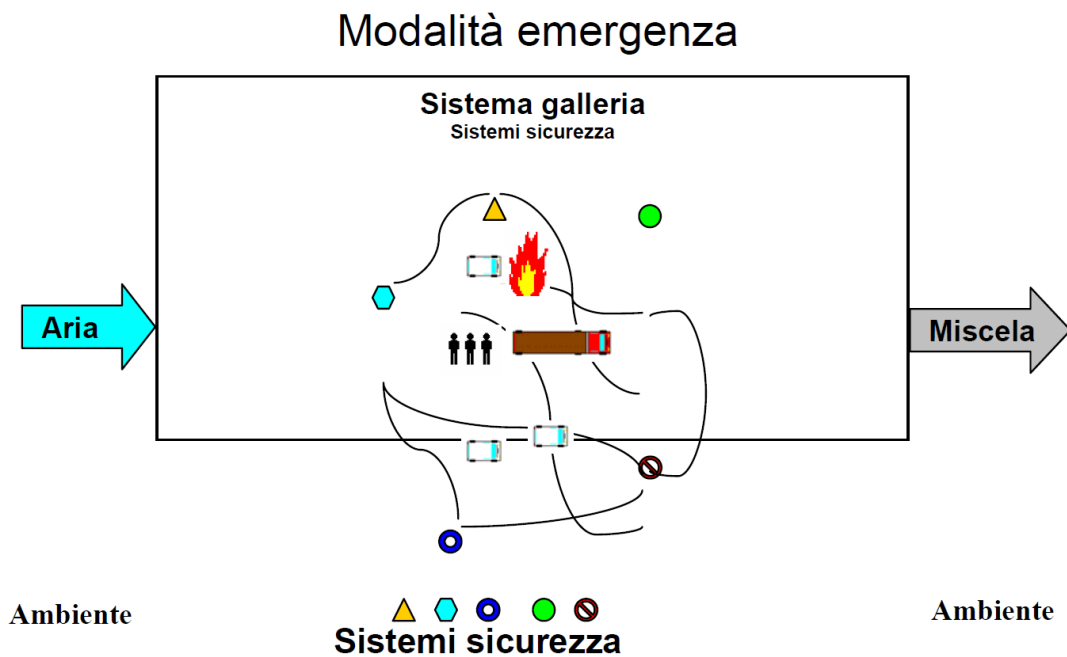


Figura 12 Sistema termodinamico galleria in condizione di emergenza

I metodi di analisi fluidodinamica e termodinamica possono essere utilizzati, in condizioni incidentali, per poter:

- Modellare i fenomeni di dispersione di sostanze tossiche e prodotti di combustione;
- Modellare il flusso d'aria deviato dagli effetti dovuti all'incendio;
- Modellare la dinamica chimica della combustione, dovuta alla stechiometria degli apporto di combustibile e comburente in funzione dei flussi d'aria (e quindi di ossigeno)
- Modellare gli effetti delle misure di mitigazione prevedendo la dinamica evolutiva dei focolai.

Segue quindi che questi metodi, quantitativi, sono necessari per determinare gli effetti concreti di un incidente in galleria.

1.4.6 Analisi delle conseguenze

Fondamentale è determinare le conseguenze successive al manifestarsi dell'evento incidentale. *Le Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali* (ANAS, 2006) definiscono gli elementi distintivi dell'analisi delle conseguenze:

1. la determinazione del flusso del pericolo conseguente all'accadimento di un evento critico in galleria ottenuta dalla formulazione e soluzione di idonei modelli termofluidodinamici caratterizzati da livelli di complessità formale e computazionale diversi,
2. la determinazione della popolazione esposta al flusso del pericolo ottenuta dalla formulazione e soluzione di idonei modelli di formazione delle code dei veicoli in galleria,
3. la formulazione e la quantificazione degli scenari di esodo possibili parametrizzati in termini di efficacia sul processo di esodo degli utenti.

Per determinare le conseguenze occorre anche comprendere il concetto di flusso di pericolo; ovvero l'evoluzione dei fenomeni chimici che determinano l'accadimento degli eventi incidentali in galleria. Lo studio del flusso di pericolo determina quindi la scelta delle vie di esodo più congrue in funzione del flusso stesso.

Il flusso di pericolo è risultato di modellazione termofluidodinamica. Grazie alle tecniche e metodologie di simulazione, è possibile determinare a livello di dettaglio i parametri di analisi con cui si stimano le conseguenze attese sui componenti sensibili del sistema. Le conseguenze vengono quantificate in termini di:

- fatalità;
- alterazioni dei parametri ambientali;
- perdite economiche;

Le conseguenze identificano il danno atteso riferito all'evento critico.

La salvabilità degli utenti è definita attraverso la scelta di una zonizzazione del flusso di pericolo all'interno della struttura e la quantificazione degli effetti sulla popolazione esposta. Le conseguenze sono frutto dell'evento critico considerato e sono misurate in termini di dosi inabilitanti assorbite. Alla base dello studio dei parametri inabilitanti per la popolazione esposta c'è:

- campo di temperature;
- campo di concentrazione di ossigeno;
- campo di concentrazione di sostanze tossiche.

I risultati dei modelli (ovvero i parametri appena citati) consentono la simulazione del processo di esodo degli utenti.

Fondamentale per studiare gli effetti dei parametri sulla popolazione presente all'interno della galleria è stimare il numero di persone che potenzialmente possono essere coinvolte nelle conseguenze dell'evento incidentale, e che quindi devono essere messe fuori pericolo attraverso l'esodo. La popolazione si calcola a partire dalla coda, ovvero dal numero di veicoli presenti all'interno della galleria al momento dell'evento incidentale ($t = 0$) e tutti i veicoli entranti in galleria prima dei tempi di allerta e comunicazione a tutti gli utenti della situazione di emergenza ($t = t_0$), e la distribuzione dei veicoli. I modelli che studiano la formazione delle code sono piuttosto complessi e richiedono una trattazione onerosa che non verrà affrontata in questa sede.

In funzione della popolazione esposta si possono simulare gli scenari di esodo, ovvero le simulazioni di esodo degli utenti in caso di evento incidentale. Ciascuno scenario sarà correlato ad una probabilità di accadimento intrinseca. I parametri definiti per gli scenari di esodo si dividono in quattro categorie:

- Geometria;

- Demografia;
- Ambiente;
- Procedura.

La geometria include i parametri riferiti a:

- layout delle vie di fuga;
- accessibilità delle vie di fuga;
- la distribuzione della popolazione esposta.

La categoria demografia include i parametri di:

- composizione dell'utenza come capacità motorie;
- tempi di risposta a pericolo;
- velocità di esodo.

La categoria ambientale presenta i parametri legati a:

- aspetti strutturali;
- effetti sulla salute e della popolazione esposta.

La categoria procedurale è determinata dalle procedure previste nella gestione dell'emergenza e l'intervento dei soccorsi.

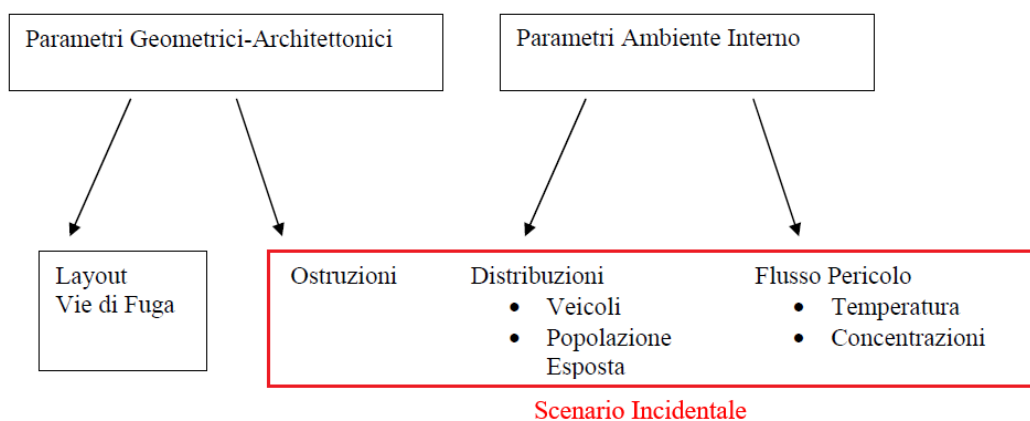


Figura 13 Parametri caratterizzanti la gestione dell'esodo

1.4.7 L'analisi di rischio

Il rischio viene definito come la conversione di un pericolo potenziale in conseguenze fattuali. La salvaguardia come le azioni di condizionamento esercitate sul rischio dal comportamento della popolazione, dalle soluzioni strutturali, dai sistemi tecnologici, dalle procedure di gestione e controllo (ANAS, 2006). Esemplificando il tutto in maniera matematica:

$$Rischio = Pericolo \cdot (Salvaguardia)^{-1}$$

Come si evince dalla relazione è evidente che il risultato non può essere nullo, ergo:

$$Rischio > 0$$

Il pericolo invece può essere definito come la potenzialità di induzione del danno.

Si definiscono poi alcuni concetti chiave inerenti all'analisi del rischio. Il rischio non è una grandezza fisica, quindi non è una grandezza misurabile.

Di seguito è riportata la schematizzazione del rischio, con metodologia insiemistica, al fine di rendere il concetto di rapida comprensione.

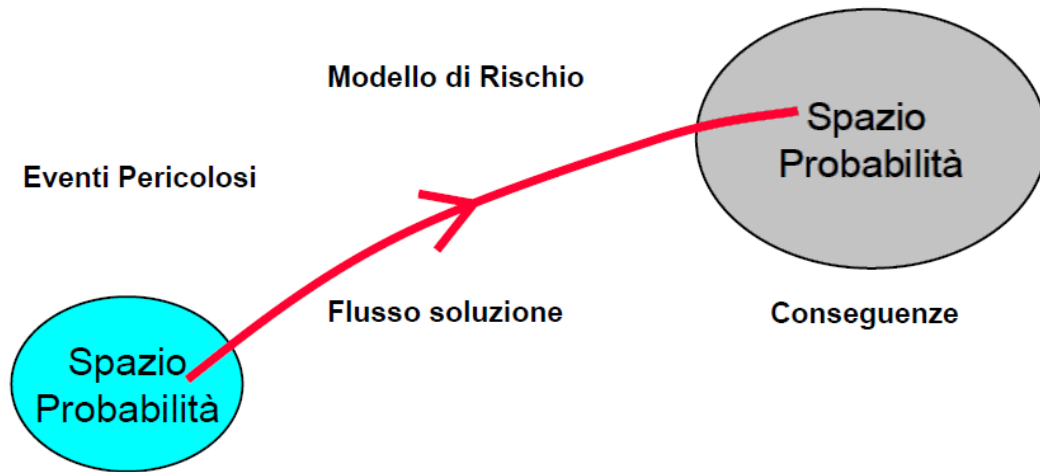


Figura 14 Schematizzazione del rischio

L'analisi del rischio opera nelle seguenti fasi:

1. identificazione dei pericoli;
2. mappatura dei fattori casuali di deviazione del sistema quantificando fenomeni e processi conseguenti agli eventi critici e gli effetti di ricezione del danno sui soggetti sensibili;
3. adotta dispositivi e sistemi tecnologici, caratterizzati da un'affidabilità ed efficienza specifiche, al fine di condizionare l'evoluzione delle traiettorie incidentali possibili;
4. fissa criteri di accettazione e misure di quantificazione del rischio;
5. fornisce informazioni quantitative sul livello di rischio del sistema galleria al fine di controllare, e possibilmente ridurre, il livello di rischio sui valori successivi alle misure adottate.

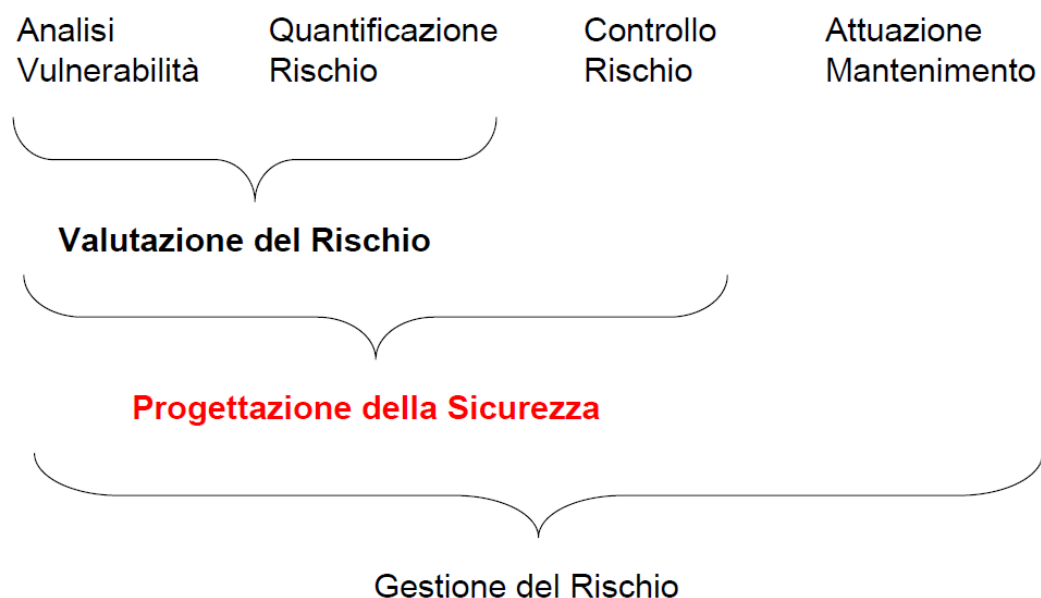


Figura 15 Componenti e fasi dell'analisi del rischio

Nella seguente immagine sono rappresentati, in maniera schematica, i processi costituenti l'analisi del rischio e la sua gestione nel tempo.

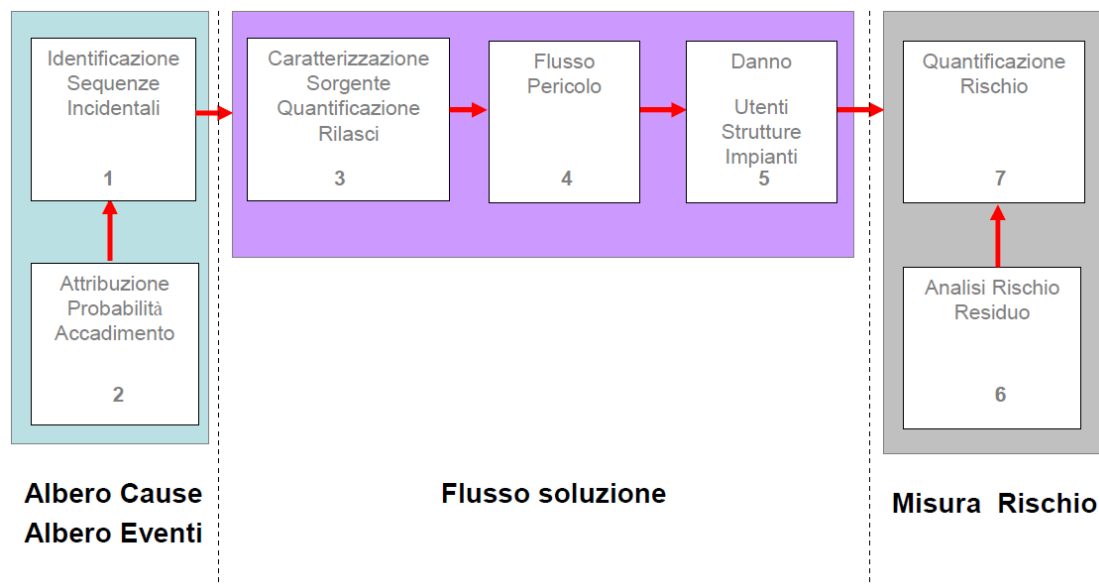


Figura 16 Fasi dell'analisi e gestione del rischio

L'applicazione dell'analisi del rischio al sistema galleria stradale ha delle specificità. I processi facenti parte dell'analisi del rischio nel caso di una galleria stradale sono descritti nella seguente figura, che rappresenta un diagramma esemplificativo degli elementi necessari.

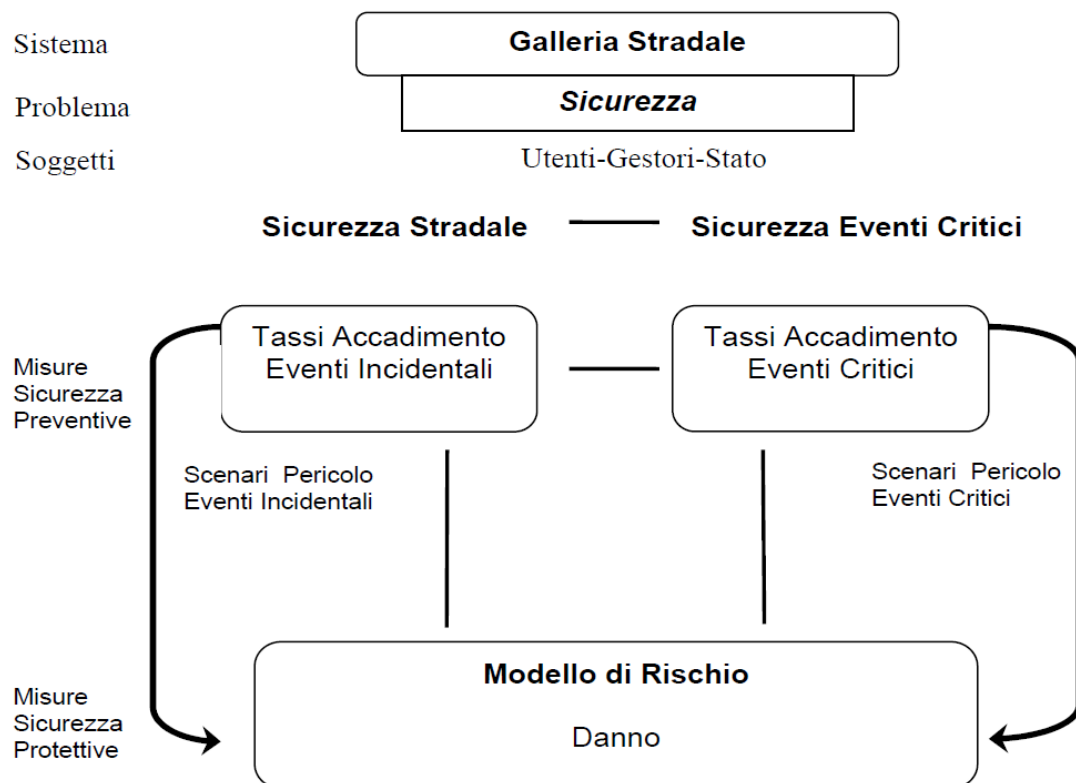


Figura 17 Analisi del rischio nel sistema galleria stradale. Come si può osservare alla base del diagramma vi è il modello di rischio che è alla base della stima del danno; parametro fondamentale per il dimensionamento degli interventi di sicurezza

Alla base dello studio, sia degli eventi iniziatori che alla stima dei danni è il diagramma a farfalla, già in parte visto precedentemente. È uno strumento di grande interesse che congiunge l'analisi delle cause e lo studio degli scenari successivi all'evento critico con possibilità, a livello qualitativo, di stima dei danni. Il diagramma a farfalla, congiunto con metodi analitici e numerici di stima quantitativa, può risultare di grande efficacia. Esso unisce due porzioni disgiunte che rappresentano la *FMA (Failure Modelling Analysis)* e tecniche *ETA (Event Tree Analysis)*.

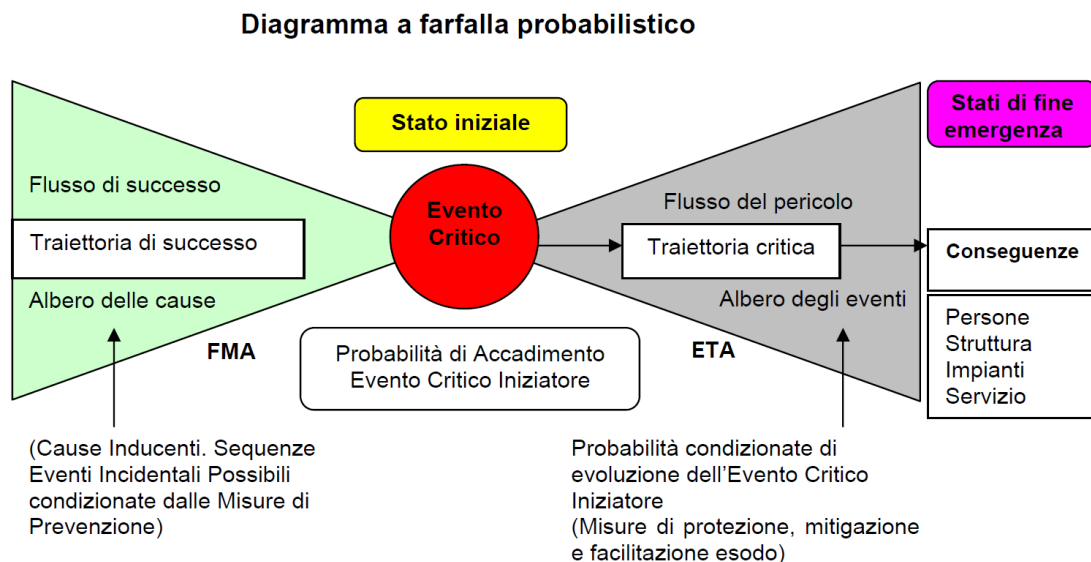


Figura 18 Diagramma a farfalla, costituito di metodi analitici basati sull'analisi delle cause ed analisi delle conseguenze

Definiti tutti gli scenari ed eventi critici possibili si può, per determinati scenari, valutare il rischio. Nel caso di gallerie stradali si usa la metodologia del modello bayesiano classico. In questo caso il rischio viene visto come il prodotto tra la funzione di distribuzione della probabilità di accadimento dell'evento critico e la funzione di distribuzione della magnitudo delle conseguenze associate. Si elabora quindi un modello che deve essere interpretato con la convoluzione tra due funzioni di distribuzione determinate da serie storiche statisticamente significative. Il risultato di questa analisi è una funzione di distribuzione rappresentativa del rischio associato ad una galleria. Le linee guida (ANAS, 2006) adottano un modello di rischio bayesiano con analisi delle incertezze definite in termini di distribuzione delle probabilità di accadimento. Deve essere quindi formulato un modello di rischio in cui si combinano le frequenze di accadimento degli eventi incidentali dovuti a pericoli meccanico-cinetico e pericolo termochimico e le frequenze di conseguenze attese nel sistema. Il modello deve includere l'effetto di incertezze di natura aleatoria connesse alla variabilità intrinseca del sistema galleria. In questa sede non si analizzeranno i dettagli del modello bayesiano e dell'analisi delle incertezze.

Si definisce poi il rischio associato è determinato dalla probabilità di accadimento e le conseguenze attese. Il rischio totale associato è definito come la sommatoria dei rischi associati agli scenari di esodo probabili. Esempificato come:

$$Rischio = \sum_{i=1}^N P(S_i) \cdot Sim\ Res(S_i)$$

Dove per l'i-esimo scenario, $P(S_i)$ è la probabilità di accadimento e $Sim\ Res(S_i)$ sono le conseguenze valutate mediante simulazione, espresse in fatalità.

Il numero di vittime è assunto come variabile della definizione delle misure di rischio. La misura di rischio adottata è una misura di Rischio Sociale. Il rischio sociale può essere calcolato attraverso la frequenza annuale

dell'evento f e il numero di vittime associato N per ciascun evento individuale identificato e le possibili conseguenze. Per ogni evento si identifica una coppia $(f; N)$ rappresentabile come un punto su di un piano identificato dai vettori numero di fatalità $\vec{N}$ e dalle frequenze di accadimento $\vec{f}$. Tutti i punti generano delle curve note con il nome di curve f - N . Su scala logaritmiche queste rappresentano la funzione:

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^{\infty} f_N(x) dx$$

Dove $F_N(x)$ è la distribuzione di probabilità del numero di vittime per anno, $f_N(x)$ è la funzione di densità di probabilità del numero di vittime per anno. Il criterio di Rischio Sociale connesso ad una galleria stradale, secondo le (ANAS, 2006), è definito come:

il rischio di un evento incidentale, per il quale si verifichi la morte di un numero di individui maggiore - uguale a 50 in un singolo evento, deve essere considerato non tollerabile se la frequenza è stimata essere superiore ad 1/500 per anno ($f = 2 \cdot 10^{-3}$ per anno; $N = 50$).

Definito quindi il punto $(2 \cdot 10^{-3}; 50)$, punto che definisce il rischio non tollerabile, si può ricavare la curva f - N il dominio di rischio tollerabile come retta passante per il punto e con pendenza pari a -1.

Si definisce quindi il livello di rischio accettabile come il rischio derivato da una vittima $N=1$ ogni 10000 anni ($F=10^{-4}$ per anno). Segue che si ottiene la curva che determina il dominio di rischio accettabile. Quest'ultima curva risulta traslata rispetto alla curva di rischio tollerabile di $f=10^{-3}$.

La superficie tra le due curve studiate viene definita come zona di applicazione del principio ALARP. Il principio è utilizzato per giustificare le misure compensative qualora la galleria non soddisfi i requisiti minimi di sicurezza. Il dominio ALARP definisce quindi le misure compensative.

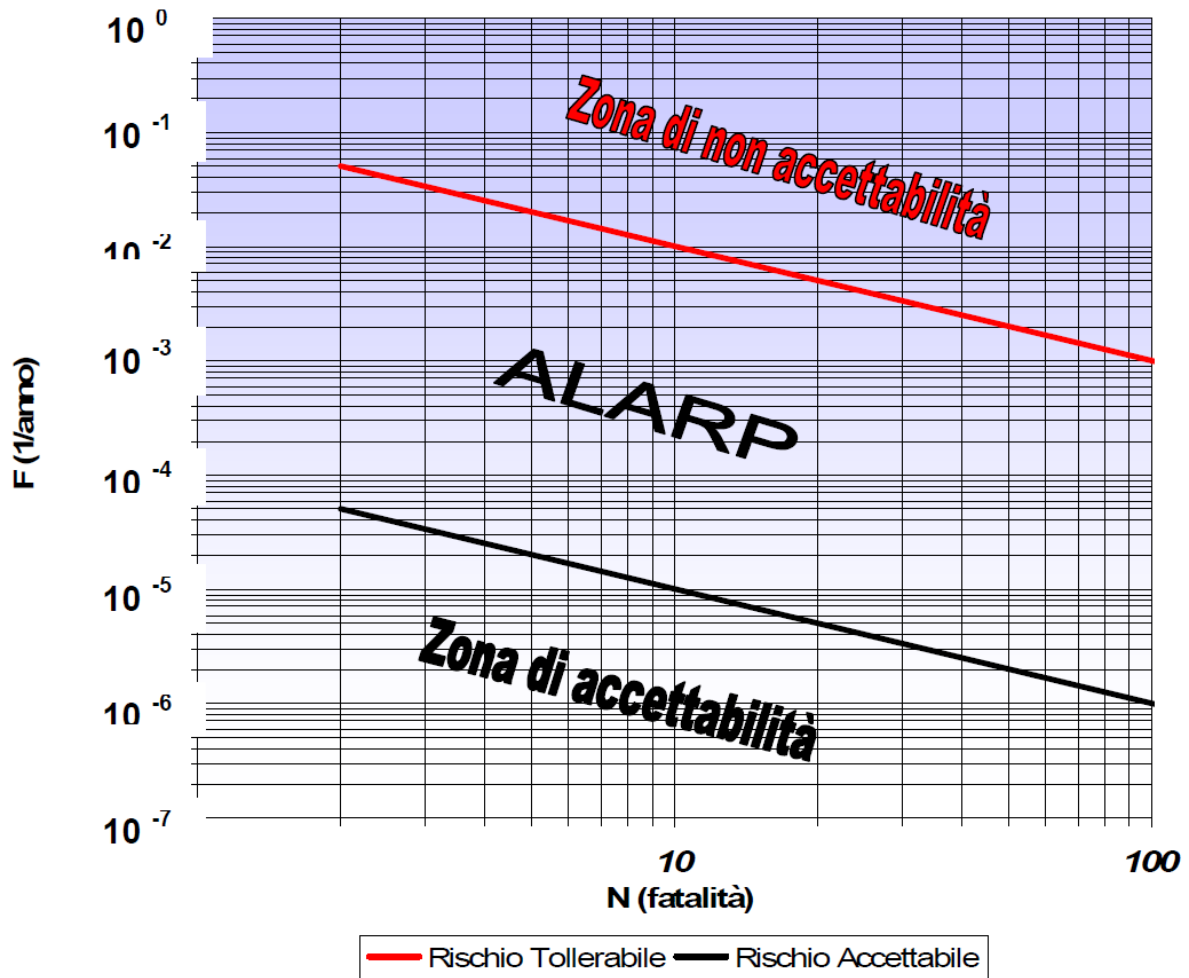


Figura 19 Piano di rischio sociale

Il livello di rischio di una generica galleria è determinato da una curva cumulata complementare alla galleria corrispondente. La curva cumulata contiene la completa distribuzione delle potenziali perdite. L'area sottesa a diverse curve cumulate permette un confronto tra diversi sistemi e soluzioni progettuali. Questa procedura sostituisce la progettazione per evento e scenario incidentale con la procedura basata su concetti di insieme probabilistico di scenario di esodo e distribuzioni attese del danno.

1.5 Procedura di progettazione della sicurezza

1.5.1 Criteri di progettazione

Si sintetizzano in maniera schematica i diversi criteri di progettazione della sicurezza in galleria stradale nella seguente figura.

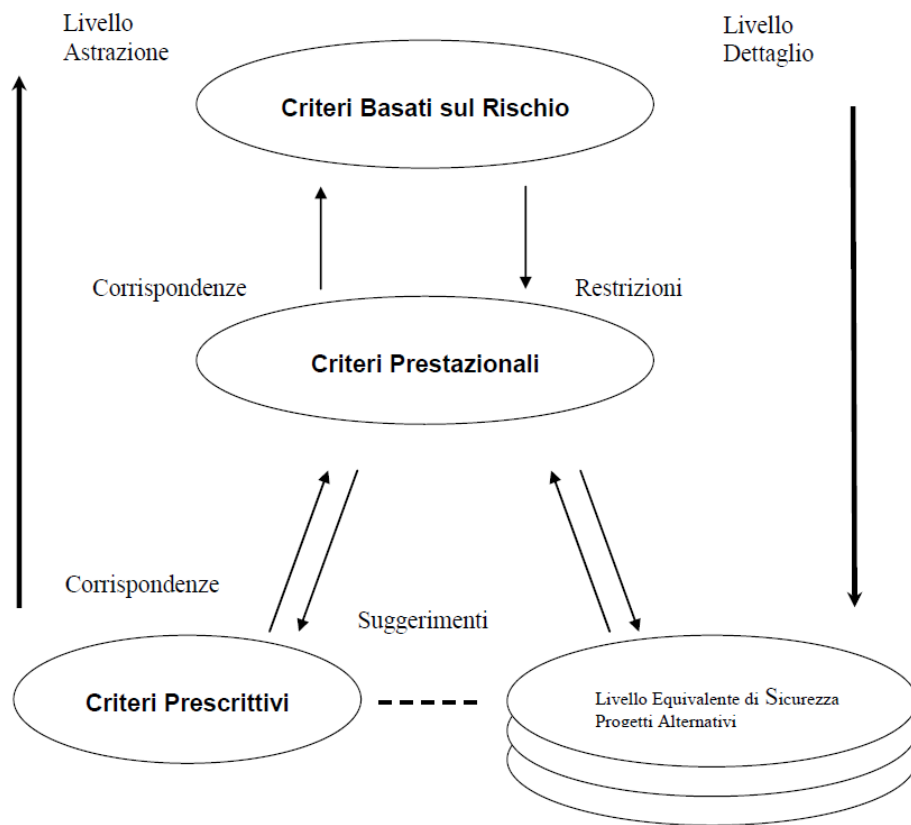


Figura 20 Sintesi dei criteri di progettazione

Dai criteri si può procedere alla progettazione. La procedura da seguire è schematizzata nella seguente figura.

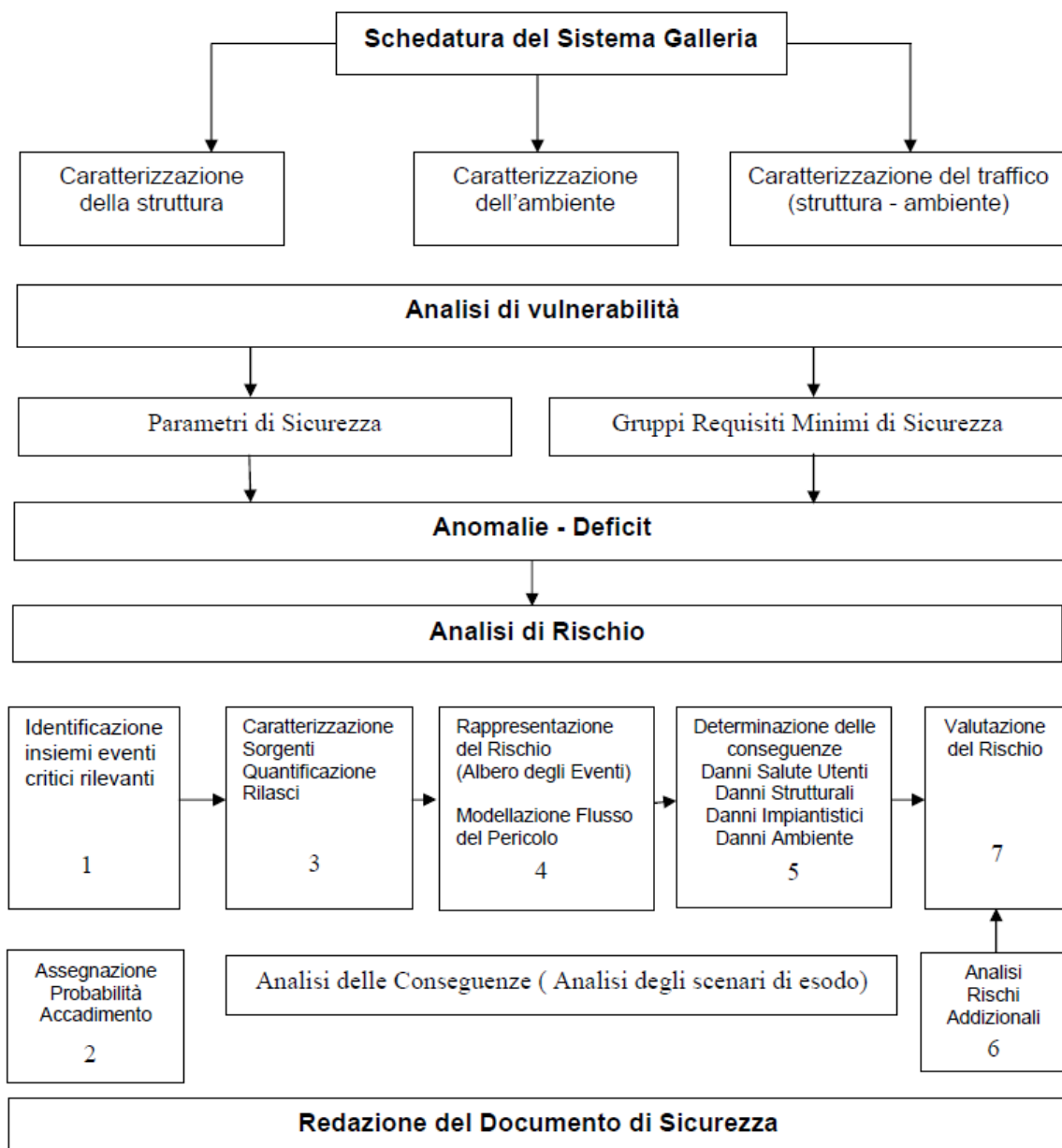


Figura 21 Procedura di progettazione

Si suddivide quindi la progettazione della sicurezza in:

1. schedatura del sistema galleria
2. analisi di vulnerabilità della struttura
3. analisi del rischio
4. redazione del documento di sicurezza

La prima fase è costituita dalla schedatura. La schedatura è la compilazione di specifiche schede che hanno l'obiettivo di:

- caratterizzare il sistema nelle componenti strutturali ed impiantistiche;
- caratterizzare l'ambiente nelle componenti geografiche e climatiche;
- caratterizzare il traffico incidente sulla struttura e sull'ambiente.

L'analisi di vulnerabilità ha l'obiettivo:

- la caratterizzazione della vulnerabilità del sistema galleria rispetto al fenomeno traffico mediante definizione dei fattori di pericolo in funzione dei parametri di sicurezza;
- Definizione del gruppo di requisiti minimi di sicurezza della galleria di appartenenza alla galleria, sulla base dei parametri di sicurezza;
- Individuazione di deficit ed anomalie di sicurezza in relazione allo specifico gruppo di appartenenza;
- Verifica di compatibilità del progetto in funzione ai criteri prescrittivi prestazionali fissati dallo standard di progettazione ANAS.

L'analisi del rischio è definita al fine di:

- valutare il rischio associato al sistema galleria;
- verifica della compatibilità con i criteri di accettazione del rischio;
- definire la corretta scelta tra varie opzioni progettuali.

Infine, si redige il documento di sicurezza in cui vengono presentati:

- i risultati derivanti dalla schedatura;
- i risultati dell'analisi di vulnerabilità;
- i risultati dell'analisi del rischio;
- le procedure di controllo e gestione dell'infrastruttura.

1.5.2 Schedatura della galleria

All'interno delle linee guida (ANAS, 2006) si identificano modelli di schedatura atti a caratterizzare il sistema galleria nelle sue specificità: In particolare, si identificano schede appartenenti a tre tipologie di classi:

- schede di strutture;
- schede di evento;
- schede di intervento.

Le schede di struttura comprendono:

- dati di identificazione geografica e giuridica dell'opera;
- dati di caratterizzazione dell'ambiente di riferimento;
- dati di caratterizzazione geometrica dell'opera;
- dati statistici sul traffico e incidentalità.
- Dati sui sistemi di sicurezza installati o previsti;
- dati sulle esercitazioni periodiche su scala reale ovvero simulazioni di eventi incidentali.

Le schede di struttura, se svolte in maniera rigorosa, possono essere raccolte e digitalizzate al fine di costituire una banca dati sul quale svolgere indagini statistiche.

Le schede evento sono costituite da:

- a) dati su evoluzione temporale di un evento incidentale critico;
- b) dati su condizioni meteo-climatiche all'atto dell'evento;
- c) dati su condizioni di traffico all'atto dell'evento;
- d) dati su tipologie dei veicoli coinvolti e sui carichi trasportati;
- e) dati su cause primarie dell'evento;
- f) dati su stato attuale di funzionamento degli impianti;
- g) dati su stato di manutenzione degli impianti.

Le schede di evento, se svolte in maniera corretta e scrupolosa, possono essere uno strumento per aggiornare le misure di sicurezza.

Le schede di intervento sono costituite da:

- a) dati su tempistiche di intervento;
- b) dati su personale impiegato;
- c) dati su automezzi e attrezzature impiegate;
- d) dati su stato impianti;
- e) dati su scenario incidentale;
- f) dati su operazioni di intervento.

Le schede di intervento possono essere uno strumento di ottimizzazioni delle operazioni di soccorso in caso di emergenze.

Il modello di schedatura può essere schematizzato con il seguente grafico mostrato nella seguente figura.

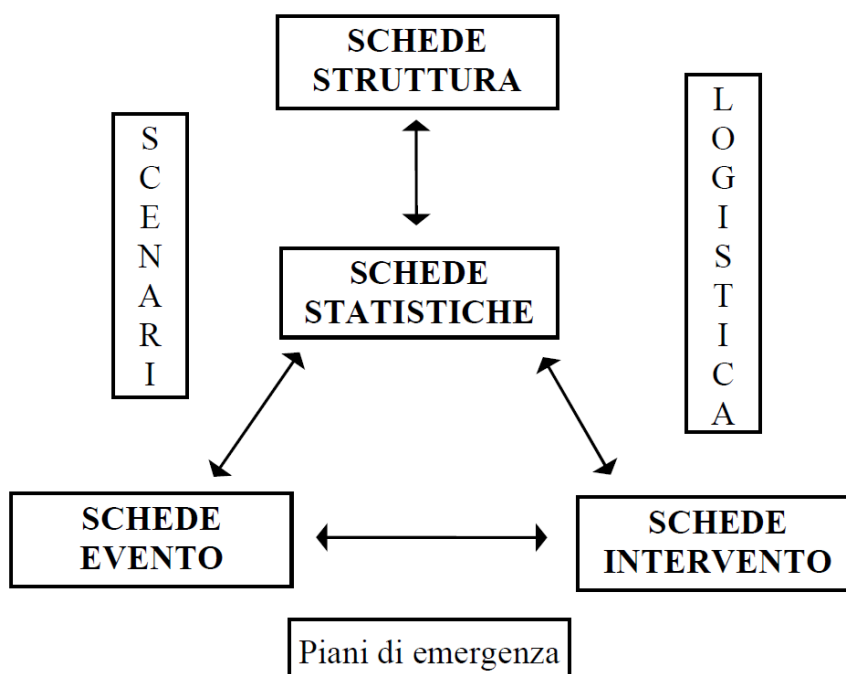


Figura 22 Schematizzazione della schedatura

In questa sede si ricorda, per quanto specificato nelle linee guida (ANAS, 2006), i modelli illustrati non hanno carattere cogente. Tuttavia, le seguenti schede possono risultare di interessante utilizzo. In primis da parte del gestore che ha la possibilità di utilizzare uno strumento per redigere le procedure di manutenzione e gestione oltre che la determinazione dell'affidabilità e dell'efficienza dei sistemi di sicurezza. Non di meno importanza è il possibile utilizzo da parte dei progettisti. Infatti, le schede possono essere assimilate a delle liste di controllo dei sistemi di sicurezza da installare.

1.5.3 Analisi di vulnerabilità per la progettazione della sicurezza

L'allegato I della *Direttiva Europea 2004/54/CE*, al paragrafo 1.1.3, riporta:

Se una galleria ha una caratteristica speciale riguardante i [...] parametri (di sicurezza), occorre effettuare un'analisi dei rischi conformemente all'articolo 13 per stabilire se siano necessari misure di sicurezza integrative e/o un equipaggiamento complementare per garantire un livello elevato di sicurezza della galleria.

Questa analisi dei rischi deve tener conto di eventuali incidenti, che pregiudicano manifestamente la sicurezza degli utenti della strada nelle gallerie e che possono verificarsi durante la fase di esercizio nonché della natura e dell'ampiezza delle loro possibili conseguenze.

I parametri indicati dalla Direttiva sono utilizzati per identificare i fattori di pericolo per il sistema galleria al fine di ridurre la probabilità di accadimento di eventi incidentali e ottimizzare la gestione delle emergenze.

I fattori di pericolo vengono raggruppati in:

- fattori di pericolo correlati agli aspetti architettonici e strutturali;
- fattori di pericolo connessi all'ambiente circostante;
- fattori di pericolo connessi al traffico.

Gli aspetti architettonici e strutturali sono individuati da:

- anno di costruzione;
- lunghezza;
- sezione;
- tracciato;
- tipologia costruttiva.

Gli aspetti ambientali fanno riferimento:

- condizioni microclimatiche prevalenti agli imbocchi;
- accessibilità della struttura;
- localizzazione sul territorio in riferimento alle squadre di soccorso (vigili del fuoco e pronto soccorso);

Gli aspetti di traffico fanno invece riferimento a:

- volume di traffico;
- composizione del traffico;
- regime di traffico.

Gli aspetti maggiormente importanti vengono identificati come la lunghezza della galleria e il traffico giornaliero medio. L'importanza è specificata nella *Direttiva Europea 2004/54/CE* con l'introduzione dell'indice di ordinalità definito come:

$$I_B = L \cdot TGM$$

L'indice è introdotto al fine di caratterizzare le frequenze ed i tassi di accadimento degli eventi incidentali in galleria. Viene infatti introdotta la relazione che li correla.

$$f_i = 365 \cdot T_i \cdot I_B$$

I tassi di accadimento sono connessi ai parametri di sicurezza caratteristici. La frequenza di accadimento degli eventi incidentali è indicatrice di livello di sicurezza del sistema galleria. La norma identifica la variabilità del tasso di incidentalità al variare dei valori assunti dai parametri di sicurezza caratteristici mediante coefficienti elasticità. Si identificano valori limite per i quali non si osservano variazioni significative di frequenze di accadimento. I valori possono essere utilizzati come riferimento per la definizione di parametri di sicurezza richiesti dalla direttiva. Nella seguente tabella vengono identificati i valori.

Parametro di sicurezza caratteristico	Unidirezionale	Bidirezionale
Numero di corsie per senso di marcia	3	2
Larghezza corsie [m]	3,5	3,5
Pendenza [%]	5	3
Raggio di Curvatura [m]	100	100
Frazione veicoli pesanti [%]	25	15
Congestione Traffico [min/giorno]	30	30
Stagionalità traffico	2	2
Nebbia [% annua]	20	20
Precipitazioni [% annua]	20	20

Tabella 1 Valori limite per i parametri caratteristici

Per l'analisi del pericolo vengono usate delle tabelle contenenti il peso relativo alle caratteristiche specifiche dei fattori di pericolo. In seguito, vengono inserite le tabelle citate

I	Struttura-Tipologia costruttiva	
1	Unidirezionale + corsia di emergenza	
2	Unidirezionale	
3	Bidirezionale	

II	Struttura-Corsie	
1	Numero Corsie	Larghezza
2	1-2	$L > 3.5 \text{ m}$
3		$3.5 < L < 3 \text{ m}$
4		$L < 3 \text{ m}$
5	> 2	$L > 3.5 \text{ m}$
6		$3.5 < L < 3 \text{ m}$
7		$L < 3 \text{ m}$

III	Struttura-Tracciato	
	Pendenza	Disegno
1	$< 3\%$	Dritta
2		Curva – Imbocchi dritti
3		Dritta – Imbocchi curvi
4		Curva – Imbocchi curvi
5	$> 3\%$	Dritta
6		Curva – Imbocchi dritti
7		Dritta – Imbocchi curvi
8		Curva – Imbocchi curvi

IV	Traffico-Composizione
	%Veicoli pesanti
1	< 0,75%
2	15%
3	>30%
4	Veicoli ADR

V	Traffico-Velocità
	Limiti di velocità
1	50 km/h
2	70 km/h
3	90 km/h
4	100 km/h
5	>=110 km/h

VI	Traffico-Congestione
	Durata (min/giorno) Vel Media < 20 km/h
1	0
2	>15 min
3	>30 min
4	>60 min

VII	Traffico-Stagionalità
	TGM (Medio mensile max)/ TGM (Medio annuo)
1	< 1,25
2	1,25 ÷ 2
3	>2

VIII		Ambiente-Condizioni meteorologiche
	Condizione	Frequenza
1	Vento	Bassa
2		Stagionale
3		Elevata
1	Precipitazioni	Bassa
2		Stagionale
3		Elevata
1	Nebbia	Bassa
2		Stagionale
3		Elevata

IX	Ambiente-Accessibilità
1	Imbocchi ,Galleria di emergenza, Viabilità alternativa
2	Imbocchi ,Viabilità alternativa
3	Imbocchi
4	Singolo imbocco

Tabella 2 Fattori di pericolo e peso relativo alle caratteristiche specifiche

1.5.4 Requisiti minimi di sicurezza

Dall'Allegato I della direttiva, si identificano in funzione della lunghezza e volume di traffico, cinque gruppi di requisiti minimi necessari per assicurare un livello di sicurezza accettabile per il sistema galleria

L'Allegato I al p. 2.1.2 (Numero di forni e di corsie) riporta: *In ogni caso, per le gallerie in fase di progettazione, se una previsione a 15 anni indica che il volume di traffico supererà i 10 000 veicoli al giorno per corsia, quando questo valore viene superato deve essere in funzione una galleria a doppio fornice con traffico unidirezionale.*

L'Allegato I al p. 2.9.5 (Ventilazione) riporta: *Nelle gallerie di lunghezza superiore a 3000 m con traffico bidirezionale, un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia, un centro di controllo e ventilazione trasversale e/o semitrasversale, devono essere adottate le seguenti misure minime per quanto concerne la ventilazione:*

- *installazione di dispositivi di estrazione dell'aria e del fumo azionabili separatamente o a gruppi;*
- *controllo costante della velocità longitudinale dell'aria e conseguente regolazione del processo di controllo dell'impianto di ventilazione (estrattori, ventilatori, ecc.).*

L'Allegato I al p. 1.1.3 riporta: *Se una galleria ha una caratteristica speciale riguardante i summenzionati parametri, occorre effettuare un'analisi dei rischi conformemente all'articolo 13 per stabilire se siano necessari misure di sicurezza integrative e/o un equipaggiamento complementare per garantire un livello elevato di sicurezza della galleria. Questa analisi dei rischi deve tener conto di eventuali incidenti, che pregiudicano manifestamente la sicurezza degli utenti della strada nelle gallerie e che possono verificarsi durante la fase di esercizio nonché della natura e dell'ampiezza delle loro possibili conseguenze.*

Come si può osservare al paragrafo 1.1.3, l'Allegato della direttiva indica di trovare valori limite di lunghezza e volumi di traffico oltre il quale è necessario introdurre l'analisi del rischio per verificare la necessità o meno di equipaggiamenti di sicurezza. Tuttavia, i seguenti valori limite sono stati introdotti dalle Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali (ANAS, 2006).

Per quanto concerne le gallerie unidirezionali, in base ad analisi storica svolta, il limite di volume di traffico individuato è 10000 veicoli/giorno per corsia. Il valore limite è stato individuato come il punto in cui si osserva un cambio di pendenza della curva di regressione della serie di dati storici.

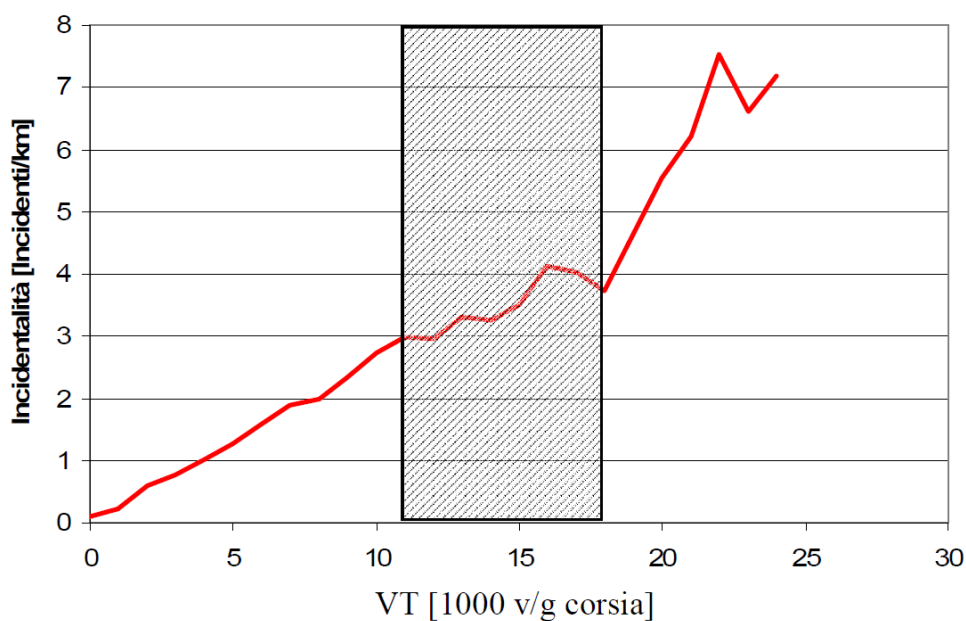


Figura 23 Analisi storica dell'incidentalità in funzione del volume di traffico per gallerie unidirezionali

Il limite di lunghezza è invece stato ricavato mediante un'analisi del tasso di mortalità per eventi incendio in funzione della lunghezza. I dati sono stati ricavati dal documento PIARC (1999) a cui sono stati aggiunti i dati successivi fino all'anno di emanazione delle linee guida. La lunghezza limite individuata è pari a 4000m.

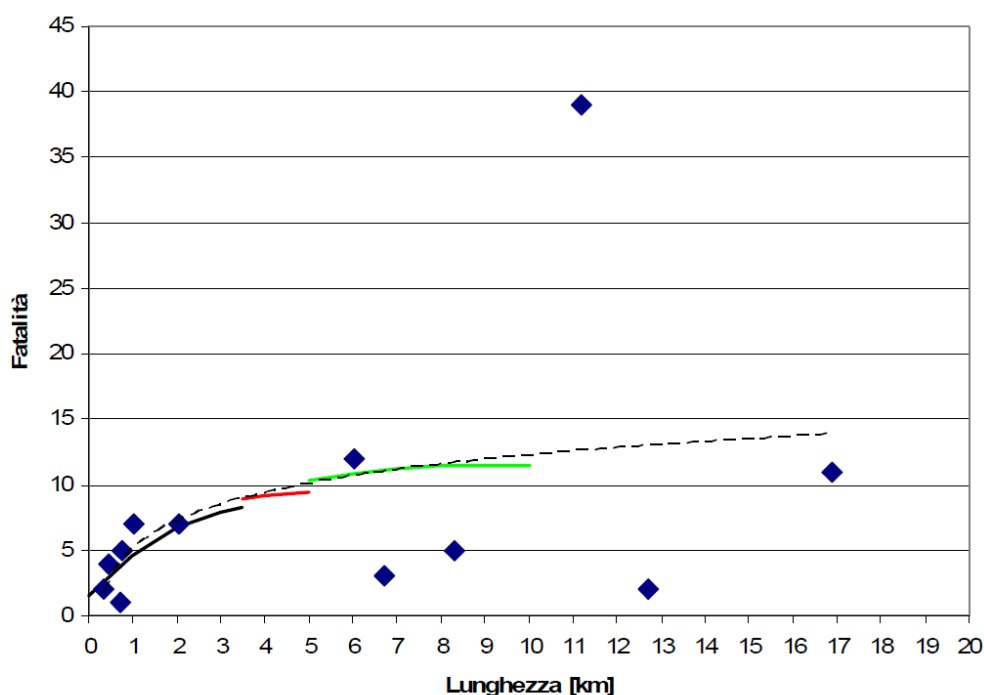


Figura 24 Interpolazione di dati da documenti PIARC (1999) aggiornati al 2005

Nella seguente tabella sono quindi identificati i dieci gruppi requisiti minimi da soddisfare in funzione di volume di traffico e lunghezza. Le gallerie che ricada in uno dei determinati gruppi deve soddisfare i requisiti del gruppo. Per le gallerie che invece non sono all'interno di uno dei seguenti gruppi va svolta una specifica analisi del rischio che ne determina i sistemi di sicurezza da installare affinché il rischio sia accettabile.

Gallerie unidirezionali	500 <L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	3000<L<4000
VT < 2000 v/g cor	I	II			
2000 < VT < 10000 v/g cor			III	IV	V
Gallerie bidirezionali	500 <L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	3000<L<4000
VT < 2000 v/g cor	VI	VII			
2000 < VT < 10000 v/g cor			VIII	IX	X

Tabella 3 Schema dei gruppi di requisiti minimi

Le gallerie che ricadono all'interno di un gruppo devono soddisfare i requisiti minimi di sicurezza ascritti al gruppo di appartenenza.

L'analisi dei rischi deve essere svolta laddove la galleria non ottemperando ai requisiti minimi obbligatori necessiti di soluzioni alternative. L'analisi si configura come strumento per dimostrare la validità del livello di garanzia raggiunto che deve essere almeno equivalente o superiore al livello richiesto dal gruppo di appartenenza.

Al fine di verificare e confrontare l'adeguatezza della sicurezza di una galleria si introduce l'indice di adeguamento. L'indice di adeguamento rappresenta il livello di adeguatezza della galleria nei confronti dei requisiti minimi di sicurezza. Esso si basa sul fatto che taluni sistemi di sicurezza sono di maggior rilevanza rispetto ad altri sistemi. L'indice viene calcolato come:

$$I_a = \sum_{i=1}^n \frac{N_{RS}}{N_{RMS}} w_i$$

Dove N_{RS} è il numero di requisiti di sicurezza soddisfatti, N_{RMS} numero di requisiti di sicurezza previsti per il gruppo di appartenenza e w_i il peso attribuito a ciascuna misura di sicurezza. I pesi attribuiti a ciascuna misura di sicurezza sono riportati di seguito.

Misure di Sicurezza	Peso relativo
Struttura	0,25
Sistema Illuminazione Ordinaria	0,15
Sistema Gestione Traffico	0,05
Sistema Comunicazione	0,13
Sistema Rilevazione	0,10
Sistema Ventilazione	0,15
Sistema Illuminazione Emergenza	0,07
Sistema Spegnimento Incendio	0,10

Tabella 4 Pesi delle misure di sicurezza

L'indice di adeguamento è uno strumento di analisi adoperabile dai gestori delle gallerie al fine di pianificazione degli interventi da attuare. In accordo con il principio di priorità sarà necessarie provvedere alla sistemazione delle gallerie con minor indice di adeguamento.

Si definiscono:

- galleria virtuale: galleria che risponde alle prescrizioni normative in termini di parametri e requisiti di sicurezza operanti in condizioni ideali;
- galleria reale: adeguamento a galleria già esistente e introduzione di sistemi di sicurezza operanti in condizioni reali.

I requisiti minimi di sicurezza svolgono sia prevenzione in condizioni di esercizio che protezione, mitigazione e facilitazione delle operazioni di soccorso in condizioni di emergenza. Il dimensionamento dei sistemi deve comunque fare affidamento alle regole di buona pratica e di stato dell'arte.

Nella figura successiva viene esemplificata la procedura di analisi della vulnerabilità.

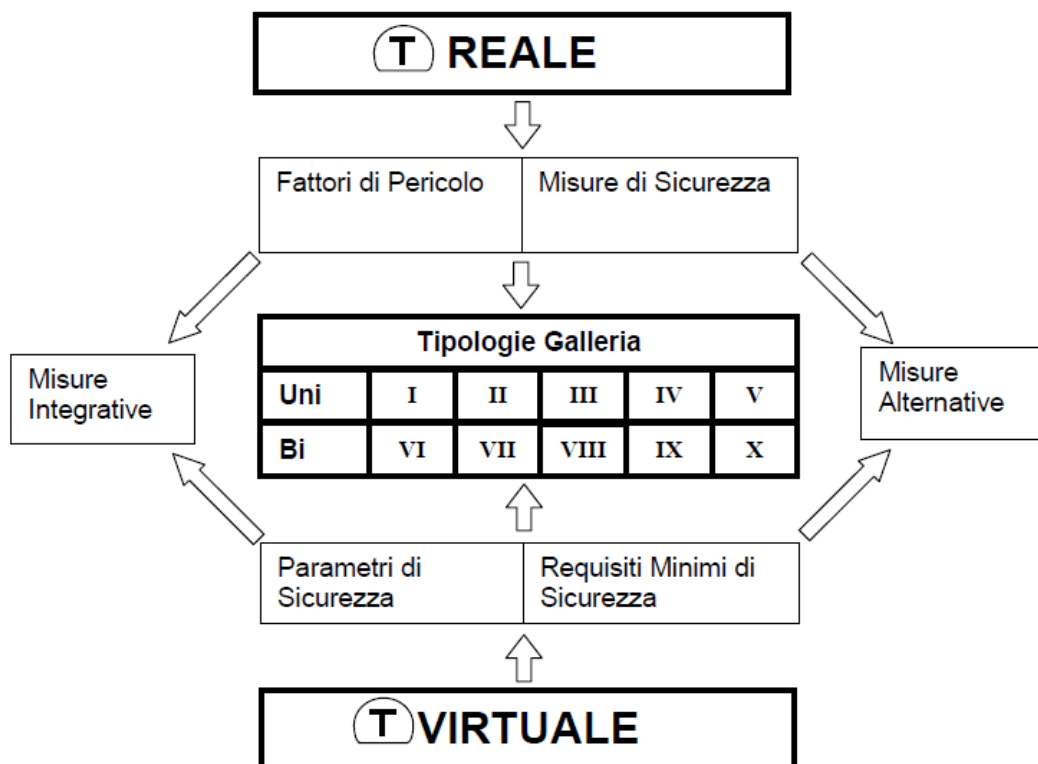


Figura 25 Schematizzazione dell'analisi di vulnerabilità

I gruppi corrispondono all'indice di ordinalità e viceversa. Ergo per ciascuna corsia, individuato il gruppo di appartenenza, si calcola l'indice di ordinalità attraverso i valori estremi della classe di appartenenza. La relazione per il calcolo è:

$$I_{obc} = L_{max} \cdot VT_{max}$$

Se i valori superano i limiti riferiti dagli estremi dei gruppi V, X, l'indice viene calcolato attraverso il valore effettivo del parametro eccedente. La corrispondenza è esemplificata nella seguente tabella e grafico

Gruppo uni	Gruppo bi	I_{obc}	Numero RM uni/bi
I	VI	2000	21/21
II	VII	8000	22/22
III	VIII	10000	22/22
IV	IX	30000	26/26
V	X	40000	28/29

Tabella 5 Valori assunti dall'indice di ordinalità in funzione del gruppo

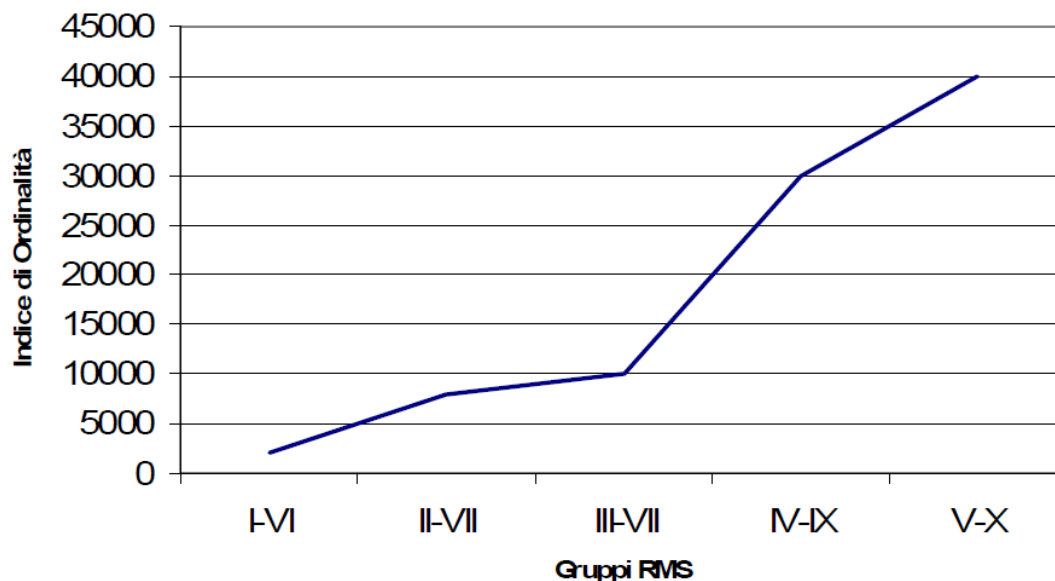


Figura 26 Andamento indice di ordinalità nei vari gruppi

Nei casi in cui l'indice di ordinalità calcolato superi le classi V e X è necessario svolgere un'analisi dei rischi al fine di operare le scelte progettuali per la sicurezza. Nel caso in cui ci si trovi in corrispondenza tra due gruppi è possibile prendere in esame i risultati dell'analisi del rischio per verificare che i requisiti del gruppo minore siano rispettati. In alternativa si usano i requisiti del gruppo di ordinalità maggiore.

1.5.5 Progetto di sicurezza

La definizione del livello di sicurezza accettabile è dettata dall'analisi di vulnerabilità. Si ottengono così i requisiti minimi di sicurezza previsti per il gruppo di appartenenza. L'applicazione dell'analisi di vulnerabilità per la definizione del gruppo di appartenenza e i conseguenti requisiti minimi assicura che:

- i requisiti minimi sono sufficienti alla compensazione della variabilità dei parametri e risultati associati (indice di ordinalità)
- lo standard di progettazione ANAS è sufficiente a compensare la variazione dei parametri per eventi d'incendio caratterizzati da un focolaio di potenza termica fino a 50MW.

Di fondamentale importanza è ricordare, per quanto concerne le linee guida (ANAS, 2006), che per eventi critici riconducibili ad incendi, il progettista ha l'obbligo di dimostrare la bontà dei requisiti minimi delle soluzioni consigliate dalla norma. Il valore limite di potenza indicato fornisce solo il limite di bontà entro il quale le norme possono avere un fondamento di bontà prestazionale.

In caso di anomalie nei parametri, grande variabilità o insicurezze da parte del progettista, vi sono tre possibili soluzioni:

- adottare requisiti minimi appartenenti a gruppi di ordinalità superiore;
- adottare misure alternative e/o integrative rispetto a quelle minime;
- adottare soluzioni innovative sia a livello tecnologico che progettuale.

Esempi di misure di sicurezza alternative ed integrative, come riportato nelle linee guida, sono:

- galleria di servizio parallela;
- vie di fuga protette all'interno della sezione (cunicoli sottotraccia, laterali, contro-soffitto);
- riduzione dell'interdistanza tra le vie di fuga;

- *finestre di accesso;*
- *prestazioni e strategie di ventilazione (impianti di ventilazione longitudinali);*
- *camini di ventilazione intermedi;*
- *configurazione, prestazioni, gestione del sistema di estrazione fumi (impianti ventilazione trasversali e semitrasversali);*
- *sistemi automatici di mitigazione e spegnimento;*
- *sistemi di guida ottica (filo di Arianna);*
- *sistemi di guida sonora;*
- *sistemi di compartimentazione (lame d'aria, lame d'acqua, airbags);*
- *automezzi per trasporto utenti in condizioni di emergenza;*
- *sistemi di acquisizione delle caratteristiche spettrali dei focolai;*
- *contingentamento del traffico;*
- *traffico a senso unico alternato;*
- *limiti di velocità;*
- *sistemi di monitoraggio della velocità dei veicoli;*
- *distanza di sicurezza;*
- *squadre di soccorso ai portali o a centro galleria;*
- *portali termografici;*
- *sistemi di gestione intelligenti (tecniche neurali, tecniche fuzzy, intelligenza artificiale).*

I casi più frequenti in cui è necessario svolgere un'analisi di rischio, ovvero nel caso di evento critico incidentale, sono incendi, collisioni con incendio, sversamenti di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e nocive.

La procedura di progettazione della sicurezza implica una analisi di vulnerabilità svolta in fase preliminare. Si stabilisce una corrispondenza univoca tra gruppi omogenei di requisiti di sicurezza. Mediante analisi di vulnerabilità si identificano le anomalie nei parametri di sicurezza e deficit nei requisiti minimi fissati dalla direttiva identificando le strutture che saranno poi soggette ad analisi di rischio.

I requisiti minimi hanno l'obiettivo di svolgere:

1. protezione e mitigazione della pericolosità degli eventi critici come riduzione dei tempi di intervento dei sistemi di sicurezza, riduzione della potenza termica del focolaio, controllo del processo di dispersione dei fumi;
2. facilitazione delle azioni di auto-soccorso in fase di esodo come realizzazione di uscite di emergenza, incremento della visibilità e miglioramento delle comunicazioni;
3. facilitazione del soccorso in condizioni di emergenza come realizzazione di accessi carrabili, miglioramento delle comunicazioni, assicurazione dell'approvvigionamento idrico.

Alcuni dei requisiti svolgono anche ruoli di prevenzione in condizioni di esercizio.

1.5.6 Redazione del documento di sicurezza

Le linee guida (ANAS, 2006) richiedono l'elaborazione del documento di sicurezza, contenente il progetto della sicurezza in cui sono dettagliate le caratteristiche costruttive degli elementi strutturali e le caratteristiche prestazionali delle misure di prevenzione e protezione necessarie per la sicurezza degli utenti e degli addetti al pronto intervento. Esempificando il documento contiene i seguenti elementi:

- la tipologia di tracciato stradale;
- caratteristiche strutturali ed impiantistiche della galleria;

- caratteristiche meteorologiche dell'ambiente limitrofo;
- parametri riferiti al traffico in galleria ed incidente sull'ambiente limitrofo;
- accessibilità.

Il documento di sicurezza deve tenere conto degli utenti a persone con ridotta mobilità e persone disabili.

Il progetto della sicurezza include:

- le caratteristiche geometriche e strutturali della galleria e delle relative zone di imbocco, corredata degli elaborati progettuali;
- studio storico e statistico sulle previsioni del traffico che giustifica il trasporto di merci pericolose (corredato di analisi di rischio);
- una indagine specifica sui fattori di rischio che descriva i possibili incidenti, loro deviazioni e varietà di conseguenze;
- dettaglio dell'applicazione della procedura di analisi del rischio nella valutazione della bontà delle misure adottate.

1.6 Standard Anas sulle Nuove Costruzioni

1.6.1 Premessa

Lo standard Anas sulle nuove progettazioni fornisce delle regole per la progettazione delle misure di sicurezza da adottare nelle gallerie stradali al fine di garantire i seguenti obiettivi indicati dalla direttiva:

- incolumità degli utenti;
- esodo in sicurezza;
- intervento dei servizi di soccorso e lotta antincendio;
- contenimento dei danni a beni e servizi.

Per raggiungere i seguenti obiettivi, le vie da intraprendere sono:

- rilievo di condizioni anomale all'interno della struttura e comunicazione con gli utenti;
- protezione ed esodo degli utenti tramite specifiche installazioni (illuminazione, ventilazione ecc...);
- accesso e facilitazione delle operazioni di intervento e soccorso da parte degli addetti;
- prevenzione degli incendi in galleria.

1.6.2 Lo standard di progettazione

Lo standard di progettazione ANAS consiste in:

- componente prescrittiva (insieme di regole progettuali congruenti con la pratica dello stato dell'arte verificata l'analisi di rischio);
- componente prestazionale (valori limite per affidabilità ed efficienza delle misure di sicurezza congruenti).

1.6.3 Componenti prescrittive – Misure strutturali

La realizzazione di una galleria a canna singola o doppia è caratterizzata dall'analisi dei seguenti parametri:

- volume di traffico previsto;
- percentuale di mezzi pesanti adibiti al trasporto merci;

- profilo piano-altimetrico;
- lunghezza.

La realizzazione di una galleria a doppia canna è obbligatoria qualora sulle previsioni di 15 anni sia indicato un volume di traffico superiore a 10000 veicoli/giorno per corsia. Per strade a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico (*New Jersey*) sono da prevedere obbligatoriamente due canne.

Le caratteristiche geometriche come sezione trasversale, planoaltimetria del tracciato di galleria e di accesso influenzano la sicurezza agendo su probabilità di accadimento ed entità di danni indotti.

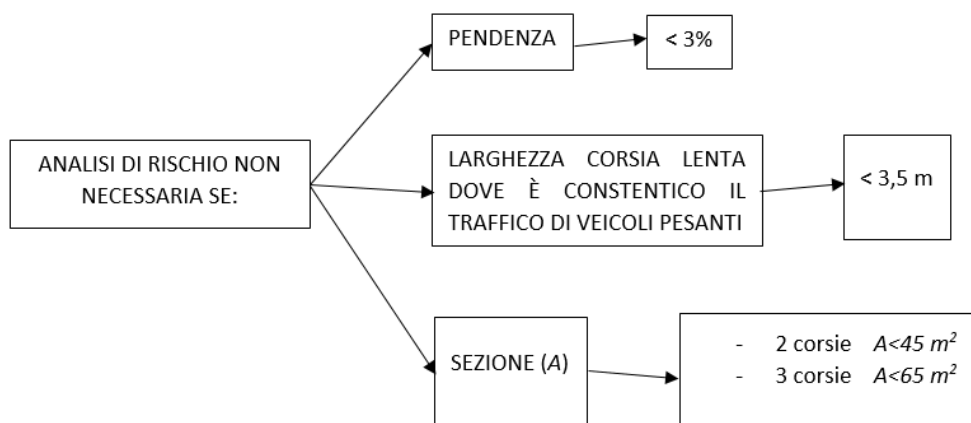


Figura 27 Casi in cui è necessaria l'analisi di rischio

1.6.4 Banchine

Nelle gallerie di nuova costruzione sprovviste di corsia di emergenza si devono prevedere delle banchine pedonali di emergenza, sopraelevate o non a disposizione degli utenti in caso incidentale. Queste prescrizioni sono da considerarsi necessarie ove applicabili e ove i costi sono sostenibili.

1.6.5 Uscite di emergenza

L'uscita di emergenza è un'apertura realizzata sul rivestimento di galleria al fine di prevedere l'esodo degli utenti verso vie di fuga e luoghi sicuri. Le tipologie di uscite di emergenza secondo le linee guida (ANAS, 2006):

- uscite dirette verso l'esterno;
- uscite verso collegamenti pedonali tra canne della galleria;
- uscite verso galleria o cunicolo di emergenza;
- accesso a rifugi con vie di fuga separate dalla galleria;
- portali di galleria.

Le gallerie di nuova costruzione devono essere dotate di uscite di emergenza se il volume di traffico giornaliero supera i 2000 veicoli per corsia. L'interdistanza tra le uscite di emergenza non deve superare i 300 metri. Le uscite di emergenza devono essere dotate di dispositivi di sicurezza che impediscano la propagazione dei fumi e dell'energia termica all'interno delle vie di fuga permettendo agli utenti di raggiungere luoghi sicuri.

Le porte delle uscite di emergenza devono poter aprirsi nella direzione di esodo. Le suddette porte devono avere un grado di compartimentazione al fuoco minimo pari a *REI 120*. Le porte devono essere normalmente chiuse, dotate di dispositivi di autochiusura, certificate e revisionate.

La larghezza complessiva delle uscite non deve essere inferiore al valore determinato dalla seguente relazione:

$$L_{min} = \frac{\text{Affollamento}}{50} \cdot 0.6$$

L'affollamento rappresenta le persone presenti, il valore 0.6 la larghezza in metri minima necessaria al transito di una persona (*modulo unitario di passaggio*); 50 il numero di persone che possono defluire attraverso un modulo unitario di passaggio fissato il tempo medio di evacuazione. La larghezza complessiva delle uscite di emergenza è multipla di 0.6 m con tolleranza del 5%. La larghezza non può essere inferiore a 0.80 m (con tolleranza del 2%) e deve essere preso in considerazione un modulo unitario minimo sufficiente all'esodo di 50 persone. Non devono essere presenti aperture superiori a 1.8 m.

Le linee guida (ANAS, 2006) consigliano le seguenti dimensioni:

- 1 modulo da 90 cm per gallerie a 1-2 corsie e volume di traffico inferiore a 2000 veicoli/giorno corsia;
- 1 modulo da 120 cm per gallerie a 2 corsie e volume di traffico compreso tra 2000 e 15000 veicoli/giorno corsia;
- moduli da 90 cm o 1 modulo da 140 cm per gallerie a 2 corsie e traffico superiore a 15000 veicoli/giorno corsia ovvero gallerie a 3 corsie e traffico superiore a 10000 veicoli/giorno corsia.

Le vie di esodo e le zone di sicurezza devono essere compartimentate a fumi. Devono essere previste quindi zone filtro a prova di fumi, ovvero un vano delimitato da strutture dotate di resistenza *REI* non inferiore a 60 minuti dotate di sistemi di auto chiusura e camino di ventilazione di sezione adeguata e non inferiore a 0.1 m² che scarichi i fumi al di fuori della galleria. Alternativamente c'è la possibilità di un vano con le stesse caratteristiche di resistenza al fuoco e mantenuto sempre in sovrappressione ad almeno 30 Pa oppure areato direttamente verso l'esterno con aperture libere di superficie minima di 1 m² (ad esclusione dei condotti).

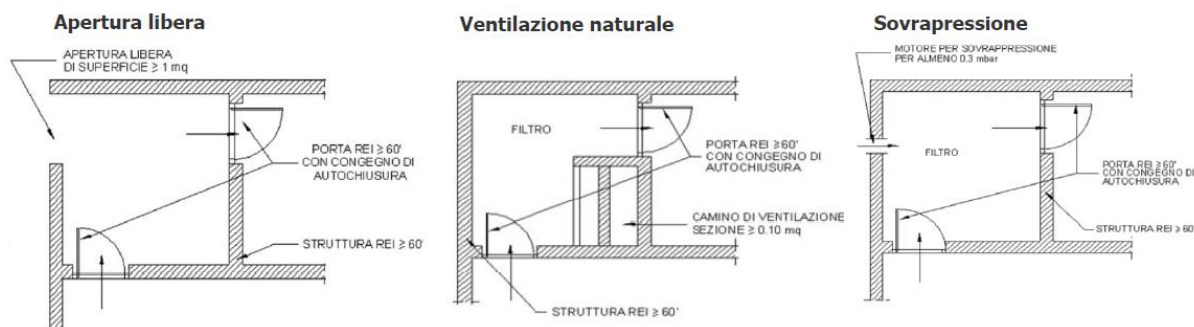


Figura 28 Tipologie di zone filtro a prova di fumi in accordo con D.M. 3/8/2015 (Codice prevenzione degli incendi)

Una tipologia di uscita di emergenza sono le uscite dirette verso l'esterno, ovvero collegamenti diretti verso uno spazio a cielo aperto. Le porte di accesso verso l'esterno devono essere ben visibili dall'interno della galleria, ben illuminate e segnalate. Sono da considerarsi uscite dirette verso l'esterno anche i portali di galleria.



Figura 29 Esempio di uscita di emergenza

I collegamenti pedonali sono invece strutture che connettono due canne di una galleria. L'accesso ai collegamenti pedonali deve essere ben visibile dalla galleria, opportunamente segnalato ed illuminato (ANAS, 2006). Se le condizioni lo permettono il collegamento deve avere dimensioni tale da contenere un parallelepipedo di dimensione minima $240 \times 230 \times 1000 \text{ cm}$ (base, altezza e lunghezza). Queste dimensioni, ipotizzando un affollamento massimo di 3 persone/m^2 , consentono di ospitare circa *50 utenti*. Le dimensioni dei collegamenti devono tenere conto degli impianti installati. Eventuali quadri elettrici presenti nei collegamenti pedonali, da evitare se possibile, devono essere separati con un involucro con un grado di compartimentazione *REI 120*.



Figura 30 Esempio di collegamento pedonale. Si notino i dettagli dell'impiantistica di sicurezza come gli estintori sulla destra, l'illuminazione e i sistemi di allarme

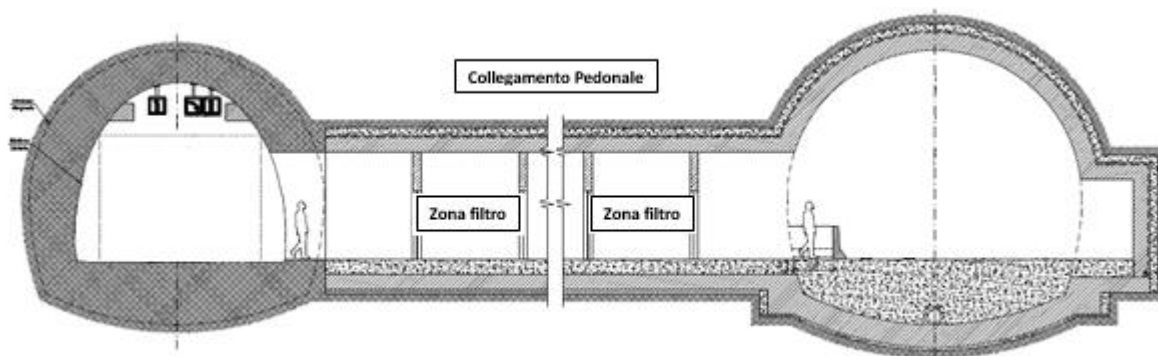


Figura 31 Schema di collegamento pedonale di sicurezza nel caso di galleria a doppia canna

La soluzione del cunicolo di sicurezza prevede strutture pedonali ricavate all'interno della sezione di scavo della galleria ma separate da essa mediante elementi strutturali. Le linee guida (ANAS, 2006) consigliano di prevedere cunicoli posti al di sotto del piano stradale. Le dimensioni nette del cunicolo di emergenza devono essere pari a $240 \times 230 \text{ cm}$ (larghezza e altezza). L'accesso ai cunicoli deve prevedere una zona di filtro a fumo avente un grado di compartimentazione non inferiore a $REI 120$. Il cunicolo deve essere dotato, ad ogni accesso e non con un passo maggiore di 50 m , le installazioni di segnaletica opportunamente ben illuminate. All'interno del cunicolo inoltre, non devono essere allocati quadri elettrici a vista. In caso di impossibilità si richiede che questi siano opportunamente separati con elementi aventi grado di compartimentazione minimo $REI 120$.

(immagine cunicolo di sicurezza)

Un'altra soluzione strutturale sono le gallerie di emergenza, ovvero strutture pedonali (eventualmente carrabili) separate dalla galleria di esercizio che si sviluppano parallelamente ad essa, innestandosi come discenderia. L'accesso deve essere ben visibile ed opportunamente ben segnalato ed illuminato. Anche in questo caso deve essere creata una zona di filtro a fumo con un grado di compartimentazione non inferiore a $REI 120$. In corrispondenza di ciascun accesso e con passo non inferiore a 50 m devono essere installati i sistemi di segnaletica opportunamente ben illuminati. I segnali devono indicare la direzione di esodo e la distanza dei luoghi sicuri. All'interno della galleria di emergenza, non devono essere allocati quadri elettrici a vista. In caso di impossibilità si richiede che questi siano opportunamente separati con elementi aventi grado di compartimentazione minimo $REI 120$.

(immagine galleria di emergenza)

Le linee guida (ANAS, 2006) prevedono la possibilità di utilizzo dei rifugi. I rifugi sono locali sperati dagli altri ambienti mediante elementi strutturali e in grado di fornire un grado di compartimentazione minima $REI 120$. L'accesso ai rifugi deve essere ben visibile dalla galleria ed opportunamente segnalato ed illuminato. L'accesso ai rifugi deve prevedere zone di filtro a fumo con un grado di compartimentazione minimo $REI 120$. I rifugi devono essere sempre dotati di vie di uscita verso l'esterno. L'uscita dai rifugi deve sempre essere opportunamente ben segnalata ed illuminata. All'interno del rifugio devono essere previsti:

- segnaletica con istruzioni sul comportamento da adottare per gli utenti;
- impianto di comunicazione audio vivavoce e/o video **a due vie** con il centro di controllo;
- cassetta di primo soccorso;
- coperte ignifughe.

(immagine rifugio)

Le strutture viste precedentemente, come i collegamenti pedonali, le gallerie di emergenza, i cunicoli di sicurezza e rifugi, possono essere adibite ad utilizzo. In particolare, si distinguono tre tipologie:

- via di fuga;
- vi di fuga protetta;
- luogo sicuro temporaneo.

Si definisce come via di fuga, una struttura destinata all'esodo degli utenti, opportunamente ben illuminata e separata dalla galleria stradale con un grado di compartimentazione *REI 120*.

La via di fuga protetta è una struttura destinata all'esodo delle persone, opportunamente ben illuminata e mantenuta libera dai fumi e in sovrappressione grazie all'utilizzo di ventilazione naturale o forzata. La via di fuga protetta, rispetto alla galleria principale, ha un grado di compartimentazione *REI 120*.

Un luogo sicuro temporaneo, come definito nelle linee guida (ANAS, 2006), è un luogo di stazionamento costituito da una zona separata fisicamente mediante una zona di filtro a fumo rispetto alla canna incidentata, in grado di ospitare un certo fissato numero di persone per un intervallo di tempo non inferiore a *30 minuti* collegato ad una via di fuga verso l'esterno. Al fine di garantire la sicurezza degli utenti, all'interno del luogo sicuro deve essere presente un impianto di ventilazione dedicato che immetta aria direttamente dall'esterni della galleria. Segue quindi che i rifugi sono da intendersi come luoghi sicuri temporanei per un intervallo minimo di *30 minuti* e dotati di un equipaggiamento di sicurezza potenziato.

In caso di galleria a doppia canna, la canna non interessata dall'incendio può essere adibita a via di fuga o via di fuga protetta a seguito della definizione delle prestazioni minime ed alla gestione della ventilazione installata in galleria. In questo caso il percorso di esodo è costituito dalla canna interessata dall'evento incidentale, dai collegamenti pedonali e dalla canna non interessata dall'evento incidentale. Per gallerie di lunghezza inferiore a *500 metri*, salvo casi particolari, non sono previsti collegamenti pedonali. Per quanto concerne le gallerie di lunghezza superiore a *500 metri* devono essere previsti collegamenti pedonali ogni *300 metri*. I collegamenti pedonali devono essere caratterizzati da un grado di compartimentazione *REI 120*. All'uscita e all'entrata del collegamento deve essere prevista un'area di protezione dal traffico veicolare di larghezza minima di *2 metri*. All'interno del collegamento pedonale deve essere presente un armadietto di emergenza. Per quanto concerne gli armadietti di sicurezza, questi devono essere posti preferibilmente in nicchia e devono contenere:

- pulsante di allarme;
- una postazione idrante;
- due estintori a polvere ed a schiumogeno;
- un telefono S.O.S.

Il segnale di apertura dell'armadietto deve essere inviato al centro remoto. Quando viene azionato il pulsante di allarme, viene comunicata all'operatore del centro remoto una situazione di emergenza. L'operatore, oltre a dialogare con l'utente, potrà seguire delle procedure di emergenza e attivare i relativi sistemi presenti in galleria (PMV, TVCC, Ventilazione, segnaletica, messaggistica, ecc.). Le iscrizioni esplicative accanto ai suddetti pulsanti dovranno essere scritte in quattro lingue: italiano, inglese, francese e tedesco.

Riassumendo, per le gallerie di lunghezza compresa tra i *500* e i *1000 metri*, i collegamenti pedonali sono da intendersi come vie di fuga. L'alimentazione dei collegamenti pedonali deve essere alimentata da una alimentazione di sicurezza. Le porte dei collegamenti pedonali devono essere dotate di sensoristica che all'apertura dovrà attivarsi al fine di produrre un allarme ottico ed acustico locale temporizzato (ad esempio sirene).

Per le gallerie di lunghezza superiore ai *1000 metri*, i collegamenti pedonali sono da considerarsi via di fuga protetta o locale sicuro temporaneo, mentre la canna non coinvolta dall'incidente è da considerarsi luogo sicuro dinamico. Le porte dei collegamenti pedonali devono essere dotate di sensoristica che all'apertura dovrà attivarsi al fine di produrre un allarme ottico ed acustico locale temporizzato (ad esempio sirene) ed un allarme nel centro di controllo se previsto.

Secondo le linee guida (ANAS, 2006), l'impianto di ventilazione dei collegamenti pedonali, per le gallerie di lunghezza superiore ai *1000 metri*, deve prevedere le seguenti modalità:

- funzionamento in esercizio, ovvero deve mantenere la sovrappressione e allo stesso tempo mantenere le condizioni termiche e di umidità per impedire la formazione di muffe;
- funzionamento in emergenza per gli utenti, ovvero garantire la sovrappressione nel locale al fine di prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte;
- funzionamento in emergenza per gli addetti al soccorso e allo spegnimento, ovvero garantire una velocità media di flusso sufficiente a consentire l'accesso alla canna incidentata.

Il sistema di ventilazione e il suo sistema di comando e controllo, devono essere collegati all'alimentazione elettrica di emergenza. L'impianto di illuminazione del collegamento pedonale deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

I cunicoli di sicurezza, nel caso di gallerie di lunghezza superiore a *1000 metri*, sono adibiti a via di fuga protetta ovvero a luogo sicuro temporaneo. I cunicoli di sicurezza possono essere realizzati per la galleria a traffico monodirezionale qualora vi è la necessità. I cunicoli di sicurezza devono essere accessibili mediante collegamenti pedonali. Le porte dei cunicoli di sicurezza devono essere dotate di sensoristica che all'apertura dovrà attivarsi al fine di produrre un allarme ottico ed acustico locale temporizzato (ad esempio sirene) ed un allarme nel centro di controllo se previsto. All'interno del cunicolo di sicurezza devono essere garantite le condizioni di benessere degli utenti. Anche in questo caso la ventilazione interna al cunicolo deve prevedere le seguenti modalità:

- funzionamento in esercizio, ovvero deve mantenere la sovrappressione e allo stesso tempo mantenere le condizioni termiche e di umidità per impedire la formazione di muffe;
- funzionamento in emergenza per gli utenti, ovvero garantire la sovrappressione nel locale al fine di prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte;
- funzionamento in emergenza per gli addetti al soccorso e allo spegnimento, ovvero garantire una velocità media di flusso sufficiente a consentire l'accesso alla canna incidentata.

Il sistema di ventilazione e il suo sistema di comando e controllo, devono essere collegati all'alimentazione elettrica di emergenza. Il sistema di ventilazione deve prevedere una portata di aria minima di $20 \text{ m}^3/\text{h}$ a persona ma le linee guida (ANAS, 2006) consigliano un valore di $50 \text{ m}^3/\text{h}$ a persona di aria. L'impianto di illuminazione del collegamento pedonale deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

Gallerie a doppia canna e traffico unidirezionale

Lunghezza (m)	Collegamenti pedonali	Cunicoli di sicurezza	Gallerie di emergenza	Uscite dirette verso l'esterno
<500	Non previsti	Non previsti	Non previste	Non previste
500-1000	Adibiti a vie di fuga ogni 300 metri Grado minimo REI120 armadietto di emergenza	Non previsti	Non previste	Non previste
>1000	Adibiti a vie di fuga protetta o luogo sicuro temporaneo ogni 300 metri adibita ventilazione specifica	Adibiti a vie di fuga protetta o luogo sicuro temporaneo adibita ventilazione specifica apporto aria mi 20 mc/h pers	Adibiti a vie di fuga pedonali adibita ventilazione specifica	Sensori d'allarme Grado minimo REI120

Tabella 6 Schema dei requisiti minimi principali nel caso di gallerie a doppia canna e traffico unidirezionale

Nel caso di gallerie a canna singola e traffico bidirezionale, il percorso di esodo è diretto dalla canna incidentata verso l'esterno tramite uscite di emergenza dirette verso l'esterno. In questo caso si fa affidamento a cunicoli di sicurezza ovvero da una o più gallerie di emergenza.

Nel caso di gallerie di lunghezza inferiore a *500 metri* non sono solitamente previste uscite di emergenza. Invece per gallerie di lunghezza maggiore devono essere realizzate uscite dirette verso l'esterno, ovvero accessi pedonali verso cunicoli di sicurezza ogni *300 metri*. In caso di impossibilità di realizzazione si deve giustificare l'assenza dei cunicoli e svolgere un'analisi di rischio che attesi la bontà prestazionale minima del sistema di sicurezza nei confronti dei requisiti di legge.

Per le gallerie di lunghezza compresa tra *500* e *1000 metri* si possono prevedere uscite dirette verso l'esterno, cunicoli di sicurezza e gallerie di emergenza. Nel caso di uscite dirette verso l'esterno, le porte devono essere dotate di sensori che all'apertura devono attivare un allarme ottico ed acustico locale temporizzato. L'impianto di illuminazione delle uscite deve essere collegato ad alimentazione elettrica di sicurezza. Nel caso invece di cunicoli di sicurezza, questi devono essere attrezzati in maniera tale da permettere agli utenti in esodo di raggiungere l'esterno in autonomia. Il cunicolo deve essere quindi dotato di impianto di ventilazione dotato di una unica modalità di funzionamento in grado di garantire una adeguata qualità dell'aria. L'alimentazione dell'impianto di ventilazione e di illuminazione del cunicolo deve essere garantita da un impianto elettrico di sicurezza. Nel caso invece di gallerie di emergenza, queste devono essere adibite a via di fuga pedonali. Anche le gallerie di emergenza devono garantire l'esodo in autonomia dell'utenza, garantendo i minimi standard. La galleria di emergenza deve essere quindi dotata di impianto di ventilazione dotato di una unica modalità di funzionamento in grado di garantire una adeguata qualità dell'aria. L'alimentazione dell'impianto di ventilazione e di illuminazione del cunicolo deve essere garantita da un impianto elettrico di sicurezza.

Per le gallerie di lunghezza maggiore di *1000 metri* si possono prevedere uscite di sicurezza, cunicoli di sicurezza e gallerie di emergenza.

Per le uscite di emergenza, l'accesso all'esterno deve essere realizzato creando una zona filtro con compartimentazione *REI120*. Le porte di accesso devono essere dotate di sensoristica che in caso di apertura deve attivare un allarme ottico acustico e inviare un segnale di allarme al centro di controllo.

I cunicoli di sicurezza, adibiti o a via di fuga protetta o a luogo sicuro temporaneo, le porte di accesso devono essere dotate di sensoristica che in caso di apertura deve attivare un allarme ottico acustico e inviare un segnale di allarme al centro di controllo. All'interno del cunicolo di sicurezza devono essere garantite le condizioni di benessere degli utenti. In questo caso la ventilazione interna al cunicolo deve prevedere le seguenti modalità:

- funzionamento in esercizio, ovvero deve mantenere la sovrappressione e allo stesso tempo mantenere le condizioni termiche e di umidità per impedire la formazione di muffe;
- funzionamento in emergenza per gli utenti, ovvero garantire la sovrappressione nel locale al fine di prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte;
- funzionamento in emergenza per gli addetti al soccorso e allo spegnimento, ovvero garantire una velocità media di flusso sufficiente a consentire l'accesso alla canna incidentata.

Il sistema di ventilazione e il suo sistema di comando e controllo, oltre che l'illuminazione, devono essere collegati all'alimentazione elettrica di emergenza.

La galleria di emergenza può essere adibita sia a via di fuga protetta che a luogo sicuro temporaneo. Anche in questo caso le porte di accesso devono essere dotate di sensoristica che in caso di apertura deve attivare un allarme ottico acustico e inviare un segnale di allarme al centro di controllo. la ventilazione interna al cunicolo deve prevedere le seguenti modalità:

- funzionamento in esercizio, ovvero deve mantenere le condizioni termiche e di umidità per impedire la formazione di muffe;
- funzionamento in emergenza per gli utenti, ovvero garantire la sovrappressione nel locale al fine di prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte e garantendo le caratteristiche minime per gli utenti.

Il sistema di ventilazione e il suo sistema di comando e controllo, oltre che l'illuminazione di galleria e vie di fuga, devono essere collegati all'alimentazione elettrica di emergenza.

Gallerie a canna singola e traffico bidirezionale

Lunghezza (m)	Cunicoli di sicurezza	Gallerie di emergenza	Uscite dirette verso l'esterno
<500	Non previsti	Non previste	Non previste
500-1000	Adibiti a via di fuga protetta Impianto ventilazione dedicato	Adibiti a via di fuga pedonali impianto di ventilazione dedicato	Porte con sensori di allarme
>1000	Adibiti a vie di fuga protetta o luogo sicuro temporaneo Porte con sensori di allarme adibita ventilazione specifica	Adibiti a vie di fuga pedonali Porte con sensori di allarme Impianto ventilazione dedicato	Sensori d'allarme Grado minimo REI120

Tabella 7 Schema dei requisiti minimi principali nel caso di gallerie a canna singola e traffico bidirezionale

1.6.6 Accesso per i servizi di pronto intervento

Uno dei requisiti che possono essere necessari ai servizi di pronto intervento sono i collegamenti carrabili. Per le gallerie a doppia canna e di lunghezza inferiore a *1000 metri* i collegamenti carrabili non sono previsti. Per le gallerie a canna doppia devono essere previsti collegamenti per il passaggio di veicoli di soccorso o di servizio ogni *900 metri* circa. I collegamenti devono avere grado di compartimentazione *REI 120* e accessi tramite portoni caratterizzati di una sezione di passaggio netta pari a $350 \times 400 \text{ cm}$ (larghezza e altezza). I collegamenti pedonali devono avere le seguenti caratteristiche riportate:

- pendenza non superiore al *10%*;
- resistenza ad un peso complessivo di *20 t*;
- portoni di accesso chiusi sempre in condizioni di esercizio della galleria;
- allarme attivato all'apertura delle porte.

1.6.7 Piazzole di sosta

Secondo le linee guida (ANAS, 2006) nelle gallerie di lunghezza superiore a *1000 metri* devono essere previste piazzole di sosta aventi dimensioni minime pari a $45 \times 3 \text{ m}$ realizzate ad un'interdistanza pari a *600 metri* per ogni senso di marcia. Per le gallerie bidirezionali le piazzole di sosta devono essere disposte a quinconce sui lati della carreggiata.

1.6.8 Sistemi di drenaggio

Il sistema di drenaggio è un impianto di sicurezza che in caso di sversamenti accidentali di oli e liquidi infiammabili ha l'obiettivo di rendere rapido lo smaltimento e ridurre la probabilità di incendio e intossicazione. Se è autorizzato il trasporto di merci pericolose, il drenaggio di liquidi infiammabili e tossici è effettuato tramite per esempio canali di scolo appositamente progettati. Particolare attenzione deve essere posta nel trattamento e nello stoccaggio di queste particolari acque reflue, spesso contaminate da prodotti

chimici ritardanti o diluenti. Il sistema di drenaggio deve essere progettato e mantenuto in funzione in modo da impedire la propagazione degli incendi nonché per intercettare rapidamente i liquidi infiammabili e tossici sversati riducendone la propagazione. È necessario valutare la necessità di installare sistemi di monitoraggio e controllo del livello nelle vasche di accumulo. Il dimensionamento del sistema di drenaggio dei liquidi infiammabili deve essere conseguente ad idonea analisi di scenari di sversamento possibili. Qualora sia impossibile realizzare nelle gallerie esistenti sistemi di drenaggio, ovvero la realizzazione di tali sistemi sia possibile solo ad un costo sproporzionato, il transito di veicoli adibiti al trasporto di merci pericolose è regolato in base ai risultati forniti dalla metodologia di analisi di rischio probabilistica.

1.6.9 Ventilazione di emergenza

Secondo le linee guida (ANAS, 2006) la ventilazione va dimensionata sui seguenti parametri:

- lunghezza delle singole canne della galleria;
- area della sezione trasversale;
- andamento altimetrico della galleria;
- volume di traffico;
- frequenza di regime di traffico congestionato;
- condizioni meteo-climatiche prevalenti sul sito.

La scelta e il dimensionamento del sistema di ventilazione deve basarsi anche sulle statistiche incidentali. Il sistema di ventilazione deve essere realizzato secondo lo stato dell'arte e garantire i requisiti prestazionali previsti da progetto. L'impianto di ventilazione secondo le linee guida (ANAS, 2006) si prefigge gli obiettivi di:

- diluizione delle emissioni dei veicoli a combustione all'interno della galleria;
- compatibilità ambientale della struttura;
- gestione e controllo degli eventi incidentali possibili individuati come rilevanti.

L'impianto di ventilazione si divide in:

- ventilazione sanitaria;
- ventilazione di emergenza.

In questa sede si analizzerà con maggior dettaglio la ventilazione di emergenza. La ventilazione di emergenza si prefigge lo scopo di:

- disperdere l'energia termica generata da focolaio di incendio;
- gestire e controllare il moto dei fumi;
- diluire le sostanze tossiche ed infiammabili.

Il sistema deve garantire l'esodo in sicurezza degli utenti e facilitare le operazioni degli addetti oltre che impedire la formazione di miscele esplosive in un evento di sversamento. La ventilazione inoltre, influenzando la dinamica dell'incendio, condiziona il processo di esodo degli utenti. Il progetto di ventilazione deve tenere conto anche delle condizioni meteorologiche ai portali che determina la ventilazione naturale. Secondo le linee guida (ANAS, 2006), per tutte le gallerie di lunghezza superiore a *1000 metri* e con un traffico superiore a *2000 veicoli per corsia al giorno*, devono essere dotate di un impianto di ventilazione meccanica. L'obbligo di un sistema di ventilazione meccanico deve essere esteso anche a gallerie di lunghezza inferiore a *1000 metri* dove si riscontrano condizioni anomale di sicurezza. Alcune anomalie, indicate anche in normativa, sono:

- sezione inferiore a *45 m²* per gallerie a *2 corsie*;

- sezione inferiore a 65 m^2 per gallerie a 3 corsie;
- pendenza maggiore del 3%;
- volume di traffico superiore a 10000 veicoli al giorno per corsia;
- traffico congestionato per almeno 5 giorni a settimana per un tempo pari a 30 minuti consecutivi.

Le linee guida (ANAS, 2006) forniscono anche una tabella di indicazione nella scelta ottimale della tipologia di ventilazione in funzione della lunghezza di galleria. La seguente tabella riporta le indicazioni (ANAS, 2006):

<i>Sistemi di ventilazione raccomandati per le gallerie stradali</i>		
Aree di applicazione dei sistemi di ventilazione	Lunghezza della galleria [km]	
	Gallerie a doppio senso di marcia (una canna)	Gallerie a senso unico di marcia (due canne)
Ventilazione naturale (con sistemi di allarme per la concentrazione di CO)	≤ 0.5	≤ 1.0
Ventilazione longitudinale con jet-fans	≤ 2.0	≤ 4.0
Ventilazione longitudinale con jet-fans ed estrazione dei fumi	≤ 4.0	≤ 6.0
Ventilazione semi-trasversale reversibile	≥ 1.0	≥ 2.0
Ventilazione mista semi-trasversale e trasversale	≥ 1.0	
Ventilazione trasversale	≥ 2.0	≥ 6.0

Tabella 8 Sistemi di ventilazione raccomandati per le gallerie stradali

Per gallerie a doppia canna e traffico monodirezionale, può essere utilizzato un sistema di ventilazione longitudinale fino a lunghezze pari a 4000 metri. La lunghezza può essere aumentata fino a 6000 metri quando il progetto preveda l'adozione di opportune misure compensative e siano stabilite condizioni minime di sicurezza mediante una analisi del rischio. Per gallerie di lunghezza superiore a 6000 metri deve essere sempre svolta un'analisi del rischio per valutare l'adozione di un sistema di tipo longitudinale integrato da idonee misure compensative invece che un sistema di ventilazione semi trasversale, trasversale o ibrido.

Il sistema di ventilazione deve essere progettato e scelto in modo da essere in grado di limitare il fenomeno di *Back-Layering* dei fumi. Il suddetto fenomeno verrà affrontato in maggior dettaglio nel capitolo dedicato alla dinamica degli incendi in galleria.

Per le gallerie a canna singola e traffico bidirezionale, il sistema di ventilazione longitudinale può essere utilizzato per gallerie di lunghezza fino a 1500 metri se l'analisi di rischio fornisce risultati compatibili con i vincoli ambientali e di sicurezza. Per gallerie di lunghezza superiore a 1500 metri deve essere valutata, applicando l'analisi di rischio, l'adozione di un sistema di tipo longitudinale integrato da misure compensative invece che un sistema di ventilazione semi trasversale, trasversale o ibrido.

Nelle gallerie di lunghezza superiore a 3000 metri con traffico bidirezionale e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia al giorno devono essere adottate le seguenti misure di ventilazione:

- installazione di dispositivi di estrazione dell'aria e dei fumi;
- controllo costante della velocità longitudinale dell'aria e conseguente regolazione dell'impianto di ventilazione (estrattori, ventilatori, ecc.).

La velocità longitudinale può considerarsi controllata quando essa oscilla tra -1 m/s e 1 m/s in una zona prossima al focolaio.

Il sistema di ventilazione deve conservare la stratificazione dei fumi generati da un possibile evento critico in galleria per un tempo sufficiente a garantire il processo di esodo degli utenti verso la prima uscita di emergenza disponibile. Il sistema di ventilazione deve essere in grado di invertire il verso del flusso d'aria in

ogni posizione della galleria in un tempo compatibile con la dinamica dell'evento di incendio e la salvabilità degli utenti.

1.6.10 Ventilazione delle vie di fuga e dei luoghi sicuri

All'interno dei locali deve essere garantita una sovrappressione a porte chiuse maggiore di 30 Pa e inferiore a 80 Pa . La sovrappressione è ottenuta mediante:

- immissione di aria attuta da un impianto dedicato;
- immissione di aria realizzata dall'impianto di ventilazione della galleria;
- prelievo di aria dalla canna non incidentata.

Qualora gli impianti prevedano l'adozione di serrande di taratura queste devono essere dotate di dispositivi tagliafuoco per impedire l'afflusso dei fumi dalla canna incidentata. Durante l'evacuazione deve essere garantita una velocità minima di flusso d'aria in uscita dagli ambienti da proteggere di 0.75 m/s .

L'impianto di ventilazione deve essere sovradimensionato al fine di poter essere mantenuto in esercizio durante l'attività dei Vigili del Fuoco all'interno della canna incidentata. La velocità minima che deve essere in grado esercitare è di 2 m/s . Il funzionamento dell'impianto di ventilazione deve poter essere regolato dalle squadre di soccorso.

L'impianto di ventilazione deve mantenere la via di fuga libera dai fumi ed in sovrappressione rispetto alla galleria. In caso di incendio, a porte chiuse, il sistema di ventilazione deve poter consentire l'immissione di aria pura nell'ambiente al fine di garantire il mantenimento dell'ambiente in sovrappressione rispetto alla galleria interessata dal traffico. A porte aperte invece, l'impianto deve limitare l'afflusso dei fumi all'interno dell'ambiente.

Come nel caso visto precedentemente, l'impianto di ventilazione deve poter garantire una sovrappressione superiore a 30 Pa e minore di 80 Pa . La forza dell'apertura della porta non deve essere superiore a 220 N . Nel caso di collegamenti pedonali, il sistema di ventilazione deve prelevare l'aria fornita dalla canna non incidentata da un condotto di ventilazione dedicato.

Nel caso dei luoghi sicuri temporanei sicuramente la ventilazione ha un ruolo fondamentale nel garantire i requisiti minimi necessari alla sopravvivenza degli utenti che usufruiscono del locale. Ergo, all'interno dell'intervallo di progettazione, è necessario apportare aria fresca all'utenza. L'aria estratta dal sistema di ventilazione può provenire dall'esterno o dalla canna non incidentata nel caso il locale sia ricavato all'interno del collegamento pedonale. Nel primo caso l'aria non necessita di ulteriore filtrazione. Nel secondo caso si dovrà garantire un ulteriore trattamento mediante unità di filtrazione aria. L'impianto di ventilazione deve mantenere la via di fuga libera dai fumi e in sovrappressione rispetto alla galleria. In caso di porte chiuse, l'impianto deve garantire l'immissione di aria pura all'interno del luogo sicuro, al fine di assicurare il mantenimento in sovrappressione rispetto alla galleria interessata dal traffico e di garantire un livello accettabile di qualità dell'aria all'interno del luogo sicuro. A porte aperte, il sistema di ventilazione deve limitare l'afflusso dei fumi all'interno della zona filtro.

L'impianto di ventilazione deve garantire una sovrappressione compresa tra 30 Pa e 80 Pa . La forza applicata dalla porta durante la sua apertura non deve superare i 220 N . I valori progettuali di apporto d'aria, in riferimento alle linee guida (ANAS, 2006), sono minimo $20 \text{ m}^3/\text{h}$ per persona di aria. Tuttavia, un valore ottimale consigliato è di $50 \text{ m}^3/\text{h}$ per persona.

1.6.11 Stazioni di emergenza

Di vitale importanza, all'interno delle disposizioni necessarie in galleria, sono le stazioni di emergenza. Queste hanno l'obiettivo di mettere a disposizione diversi strumenti di sicurezza come telefoni di emergenza ed estintori. Non sono dunque da considerarsi sistemi di protezione degli utenti quanto impiantistica di assistenza in caso di emergenza. Queste solitamente, sono costituiti di un armadio, preferibilmente posto all'interno di una nicchia per non risultare d'ostacolo nell'esodo. Nel caso di gallerie a traffico monodirezionale, gli armadietti di emergenza devono essere posizionati sul lato destro della carreggiata. Nel caso di gallerie a traffico bidirezionali, gli armadietti di emergenza devono essere posizionati su entrambi i lati con distribuzione a quinconce mantenendo la stessa interdistanza.

Le stazioni di emergenza devono essere dotate di dispositivi che in caso di rottura di un vetro o l'apertura di uno sportello per il prelievo degli estintori devono attivare un allarme locale ottico acustico. Il segnale di apertura deve essere inoltre inviato al centro di controllo.

L'armadietto di emergenza deve essere posto all'interno di tutte le zone filtro per l'accesso alle vie di fuga protette ed all'interno dei luoghi sicuri temporanei. Il sistema di allarme in dotazione agli armadietti di emergenza deve essere collegato ad alimentazione elettrica di sicurezza.

Per gallerie di lunghezza superiore a 500 metri devono essere previsti armadietti di emergenza ai portali e ad interdistanza di 150 metri. Questi devono essere opportunamente segnalati con segnale luminoso (Art.125 e art. 135 del D.P.R. 495/92) e segnale di postazione idrante UNI 7546/8.



Figura 32 segnale di postazione idrante UNI 7546/8

Come già visto, gli armadietti, secondo le linee guida (ANAS, 2006) devono contenere:

- il pulsante d'allarme;
- una postazione idrante;
- due estintori a polvere ed a schiumogeno;
- un telefono S.O.S.

L'armadietto deve essere dotato di sensoristica in grado di inviare un segnale al centro remoto alla sua apertura e all'azionamento del pulsante di allarme. Il segnale arriva all'operatore del centro remoto che indica la situazione di emergenza ed inizia a seguire le procedure di emergenza ed attivare i relativi sistemi di sicurezza e di comunicazione con l'utenza. Le iscrizioni relative all'armadio ed al pulsante di emergenza devono essere scritte in italiano, inglese, francese e tedesco. Gli armadietti sono posizionati:

- all'interno delle piazzole di sosta;
- in corrispondenza dei collegamenti pedonali;
- in corrispondenza degli accessi diretti verso l'esterno, accessi a cunicoli di sicurezza, accessi a gallerie di emergenza per gallerie di lunghezza superiore a *1000 metri*.

1.6.12 Erogazione idrica ed impianto idrico antincendio

L'erogazione idrica deve provvedere ad alimentare l'impianto idrico antincendio. Il sistema di alimentazione deve garantire la continuità di erogazione idrica per almeno due ore, come previsto dalle linee guida (ANAS, 2006). L'impianto idrico antincendio è requisito necessario per le gallerie di lunghezza maggiore di *500 metri*. Per le gallerie di lunghezza inferiore a *2000 metri* se l'erogazione idrica non è disponibile è obbligatorio verificare che vi sia un alternativo approvvigionamento idrico sufficiente.

L'impianto idrico antincendio è costituito da una condotta fissa di adduzione per tutta la lunghezza della galleria, in grado di garantire una portata di *1200 litri/minuto* ed una pressione minima pari a *0.5 MPa* con idranti posti ad interdistanza pari a *150 metri*. L'impianto idrico antincendio deve essere in grado di garantire valori di portata uniformi tra diversi idranti, non inferiori a *300 litri/minuto* e con una pressione pari a *0.5 MPa*. L'impianto idrico antincendio, come dettato dalle linee guida (ANAS, 2006), deve essere dotato di:

- idranti con attacco *UNI-70* e relativo corredo di lancia e manichetta all'esterno delle gallerie;
- idranti con attacco *UNI-45* collocati con idonee cassette con relativo corredo di lancia e manichetta all'interno della galleria di esercizio;
- attacchi di mandata per motopompa *UNI 70* agli imbocchi delle gallerie di esercizio (*UNI 9490*).

Nelle gallerie monodirezionali gli idranti devono essere posti all'interno dei relativi armadietti di emergenza sul lato destro della careggiata, mentre per le gallerie bidirezionali gli idranti sono posti su entrambi i lati a quinconce.

La rete idrica di distribuzione dell'acqua antincendio deve essere ad anello ed alimentata da una o più stazioni di pompaggio dotate di:

- gruppo di pompaggio *UNI 9490*;
- serbatoio di riserva.

Particolare attenzione si deve riservare ai collettori dell'acqua antincendio. Questi non devono essere esposti direttamente al fuoco per un tempo di almeno due ore. Devono inoltre essere protetti da gelo, urti meccanici, corrosione e consentire dilatazioni termiche.

Le pompe devono essere alimentate da linea esclusiva, derivata a monte dell'interruttore generale BT dell'impianto elettrico, al fine di alimentazione anche nel caso rimangano aperti tutti gli interruttori. L'impianto deve essere alimentato, sia dalla linea elettrica di esercizio che da un ulteriore fonte di emergenza (gruppo elettrogeno).

1.6.13 Sistemi di mitigazione

La seguente trattazione dei sistemi di mitigazione è relativa alle note indicate nella *Direttiva 2004/54/CE*. Questa indica la possibilità incrementare il livello di sicurezza introducendo sistemi di mitigazione. I sistemi attualmente utilizzabili sono quelli a diluvio e sono classificabili in:

- sistemi di acqua frazionata;
- sistemi di acqua nebulizzata;
- sistemi a schiuma.

L'adozione di sistemi di tipo mitigativo deve essere giustificata da un'analisi del rischio e devono essere valutate anche le interferenze con gli altri sistemi di sicurezza.

1.6.14 Rilevazione incendio

Nella progettazione della sicurezza, caso per caso, deve essere valutata l'installazione di un sistema di rilevazione incendi. Questa deve essere presente solo in caso di presenza di ventilazione forzata. L'installazione di un sistema di rilevazione incendi è obbligatoria solo nel caso in cui si hanno gallerie di lunghezza maggiore di *3000 metri* e dotate di un centro di controllo. I dispositivi solitamente installati sono:

- opacimetri;
- sensori di concentrazione di anidride carbonica e monossido di carbonio;
- rilevatori di temperatura;
- sistemi di rilevazione fumi mediante digitalizzazione delle immagini.

I dispositivi di rilevazione incendio hanno lo scopo di consentire la localizzazione del focolaio. Lo stato dell'arte impone sistemi in grado di localizzare incendi entro *3 minuti* dall'evento incidentale. Nel caso di gallerie soggette a transito di merci pericolose deve essere svolta una analisi del rischio per determinare le prestazioni del sistema di rilevazione.

1.6.15 Caratteristiche ignifughe degli impianti

Gli impianti della galleria devono possedere delle caratteristiche ignifughe al fine di garantire il mantenimento delle necessarie funzioni di sicurezza in caso di incendio. Si deve utilizzare un'analisi di rischio al fine di valutare temperature massime e tempi minimi di funzionamento ammissibili per gli impianti. Le norme (ANAS, 2006) determinano alcune minime resistenze al fuoco richieste agli impianti.

	Temperatura [°C]	Tempo [min]
Acceleratori in volta	400	90
Ventilatori di estrazione	400	90
Serrande motorizzate di estrazione fumi	400	90
Supporti	400	90

Tabella 9 Resistenza al fuoco di alcune dotazioni impiantistiche

I materiali di costruzione di segnaletica di emergenza, armadietti di emergenza, ventilatori installati in galleria e supporti devono essere costituiti in acciaio inox con caratteristiche superiori ad *AISI 304L* (Acciaio inossidabile austenitico al cromo-nichel, non temprabile).

1.6.16 Componente prestazionale dello standard ANAS

Le norme (ANAS, 2006) introducono una tabella che caratterizza in termini di prestazioni le misure di sicurezza previste dalla direttiva. Inoltre vengono introdotti anche suggerimenti progettuali riferiti allo stato dell'arte e confermati da un'analisi del rischio. Laddove, sotto la colonna standard, si riscontra la presenza, ciò indica che se l'impianto viene adottato si ottiene una struttura conforme allo Standard di Sicurezza ANAS. I valori riportati sotto la colonna Riferimento corrispondono allo stato dell'arte. I valori sotto la colonna pericolo forniscono livelli di sicurezza inaccettabili nella formulazione di un progetto. Le righe in grigio indicano misure non sono contemplate dalla direttiva.

	Azione		Standard	Riferimento	Pericolo (ARP)
	Preventiva	Protettiva			
<i>Corse di emergenza</i>	•		Presenti	Marciapiedi e/o piazzole sosta	Mancanti
<i>Piazzole di sosta</i>	•		600 m	1000 m	> 1500 m
<i>Uscite di emergenza</i>		•	300 m	500 m	1000 m
<i>Larghezza porte</i>		•	150 cm	120 cm	90 cm
<i>Larghezza marciapiedi</i>		•	120 cm	90 cm	60 cm
<i>Percorsi d'esodo</i>		•	Liberi-rettilinei	Liberi	Ostacoli-Barriere-Tortuosità
<i>Drenaggio</i>	•		Presente (ADR)	Mancante (ADR frequenza ridotta)	Mancante (ADR)
<i>Portata drenaggio</i>			100 l/s	50 l/s	<50 l/s
<i>Illuminazione ordinaria</i>	•		Rinforzo regolato + Illuminazione Permanente + Illuminazione Sicurezza	Rinforzo non regolato + Illuminazione Permanente + Illuminazione Sicurezza	Illuminazione Permanente
<i>Illuminazione esodo</i>		•	5 lux	3 Lux	1 lux
<i>Segnaletica esodo</i>		•	35 m	75 m illuminata	100 m
<i>Ventilazione longitudinale</i>	•	•	Monodirezionali < 3000 m Bidirezionali < 1000 m (VDF = 300 m)	Monodirezionali < 4000 m Bidirezionali < 1500 m (VDF = 500 m)	Monodirezionali > 5000 m Bidirezionali > 1500 m (VDF > 500 m)
<i>Ventilazione semitrasversale</i>	•	•	Monodirezionali > 4000 m; urbane > 1500 m Bidirezionali > 1500 m (VDF = 500 m)	Monodirezionali > 6000 m; urbane > 3000 m Bidirezionali > 3000 m (VDF = 500 m)	Monodirezionali > 7000 m o urbane > 3000 m Bidirezionali > 3000 m (VDF > 500 m)
<i>Ventilazione naturale</i>			1,5 m/s	2 m/s	4 m/s
<i>Velocità longitudinale max</i>			5 m/s	6 m/s	7 m/s
<i>Velocità critica</i>		•	4 m/s	2,5 m/s	1,5 m/s
<i>Velocità controllata max</i>		•	1 m/s	1,5 m/s	2 m/s
<i>Portata estrazione fumi</i>		•	200-250 m³/s	150 m³/s	100 m³/s
<i>Interdistanza bocchette estrazione</i>		•	70	100	150
<i>Tempo inversione ventilazione</i>		•	120 s	180 s	300 s
<i>Resistenza al fuoco ventilatori, serrande motorizzate, supporti</i>			400°C 90 min	250 ° C 90 min	Mancante
<i>Ventilazione uscite emergenza</i>		•	Sanitaria + pressurizzazione	Pressurizzazione	Mancante
<i>Velocità porte aperte vie di fuga</i>		•	2-3 m/s	0,75	Mancante
<i>Pressurizzazione</i>		•	50 Pa	30 Pa	Mancante
<i>Ricambio aria esterna</i>		•	50 m³/h persona	20 m³/h persona	Mancante
<i>Comunicazioni</i>	•	•	PMV+GSM+SOS+Ri trasmissioni	PMV + SOS	Mancante
<i>SOS</i>	•		150 m	250 m	>500 m

<i>Tempo allertamento servizi soccorso</i>	•	•	60 s	120 s	180 s
<i>Rilevazione</i>	•		Telecamere + cavo	Cavo + OP o Telecamere +CO o OP	OP o CO o cavo
<i>Tempi Rilevazione</i>	•		120 s	180 s	300 s
<i>Impianto antincendio</i>		•	Mitigazione+Idranti	Idranti	Mancante
<i>Interdistanza idranti</i>			150 m	250 m	> 300 m
<i>Tempo mitigazione autocarro</i>		•	120 s	180-240 s	300 s
<i>Tempo mitigazione pozza gasolio</i>		•	30 s	60-120 s	180 s
<i>Gestione traffico</i>	•		DAI + Semafori in galleria + Sistema di gestione+comunicaz.	DAI + Sistema di gestione + comunicaz.	Mancante
<i>Gestione emergenza</i>		•	Automatica + manuale + ritorno esperienza	Automatica	Manuale
<i>Tempo attivazione sistemi sicurezza</i>		•	60 s	120 s	180 s
<i>Tempo chiusura galleria</i>		•	300 s	480 s	600 s
<i>Tempo di permanenza utenti nella struttura</i>		•	20 min	30 min	45 min
<i>Alimentazione elettrica</i>	•	•	Rete anello+ GE + UPS	Rete + GE 50%+ UPS	Rete
<i>REI (R)</i>		•	120	60	Nulla
<i>Classe reazione al fuoco</i>	•		0	1	Mancante

Tabella 10 Componenti prestazionali dello standard ANAS

1.6.17 Prove di collaudo ed esercitazioni periodiche

Sono previste prove di collaudo del sistema galleria. Gli obiettivi che si perseguono, secondo le linee guida (ANAS, 2006), sono:

- verifica del funzionamento dei singoli sottosistemi e del sistema galleria in condizioni di esercizio;
- verifica del funzionamento delle procedure di emergenza attuate dal sistema di gestione della galleria;
- verifica del funzionamento del sistema galleria in condizioni incidentali.

La verifica dei sottosistemi in condizione di esercizi e dei dispositivi deve essere svolta in conformità della normativa vigente e deve comprovare l'integrità e la funzionalità dei sistemi installati e dei singoli dispositivi in consentire la messa a punto ottimale della strumentazione necessaria all'esercizio della struttura. La verifica di funzionamento delle procedure di emergenza effettuata simulando i segnali di allarme deve consentire la verifica della corretta risposta del sistema e la taratura delle soglie di attivazione per i falsi allarmi.

La verifica del funzionamento della galleria in condizioni incidentali prevede la realizzazione di prove al fuoco in galleria al fine di verificare l'efficacia delle misure di sicurezza e verificare e mettere a punto le procedure di emergenza. In questa sede non verranno affrontate le prove al fuoco.

Al fine di verificare la visibilità in galleria e la correttezza collocazione di segnaletica e l'agibilità dei percorsi di esodo è possibile effettuare simulazioni di esodo con campione di utenti. È possibile coinvolgere anche popolazione di utenti con mobilità ridotta e disabili.

Le esercitazioni periodiche hanno lo scopo di:

- verificare lo stato dei sottosistemi di sicurezza;
- migliorare le procedure e i piani di emergenza;

- addestrare gli addetti al primo soccorso.

Le esercitazioni possono essere effettuate realizzando prove a fuoco controllate.

2 Analisi dei gravi incidenti avvenuti nel passato

2.1 Introduzione

Negli ultimi decenni si sono verificati numerosi eventi critici che hanno coinvolto gallerie stradali. In diversi incidenti hanno perso la vita numerose persone. Benché l'interesse in materia di sicurezza nelle gallerie stradali non sia generato dagli incendi sopra citati, questi drammatici incidenti hanno portato in primo piano i rischi presenti nelle gallerie e hanno comportato il coinvolgimento della politica. Parallelamente alle azioni intraprese in seguito a tali incidenti a livello nazionale e presso vari enti professionali, è stato creato un Gruppo di Esperti Multidisciplinare ad hoc sulla Sicurezza nelle Gallerie, con il sostegno della Commissione Europea e sotto l'egida del Comitato dei Trasporti Interni della Commissione Economica delle Nazioni Unite per l'Europa. La funzione principale del Gruppo di esperti è stata quella di sviluppare *"raccomandazioni per requisiti minimi di sicurezza nelle gallerie di tipo e lunghezza differenti"*. Il risultato di questi studi ha dato luce alle direttive, leggi e norme citate precedentemente.

Inoltre, un'analisi storica degli incidenti permette di mettere in luce degli errori e dei problemi di progettazione e gestione delle gallerie stradali che altresì non è possibile. In particolare, si citano i seguenti incidenti:

- Incidente nella galleria del Monte Bianco (1999) in cui hanno perso la vita 39 persone;
- Incidente nella galleria del San Gottardo, Svizzera (2001) in cui hanno perso la vita 11 persone;

Nei successivi paragrafi si andranno a descrivere gli incidenti citati.

2.2 Incidente della galleria del Monte Bianco del 1999

2.2.1 Introduzione

L'incidente del 24 marzo 1999 avvenuto alla galleria del Monte Bianco è uno degli incendi in gallerie stradali più gravi e che maggiormente hanno posto l'attenzione sul tema della sicurezza nelle gallerie stradali. Infatti, in questo caso, il numero delle fatalità in rapporto al numero di persone presenti è stato più alto di qualsiasi incidente in galleria avvenuto negli ultimi decenni. Dal seguente studio proposto da (Jonkman, Lentz, Vrijling, & J.K., 2010) la mortalità è stata superiore a 0.5.

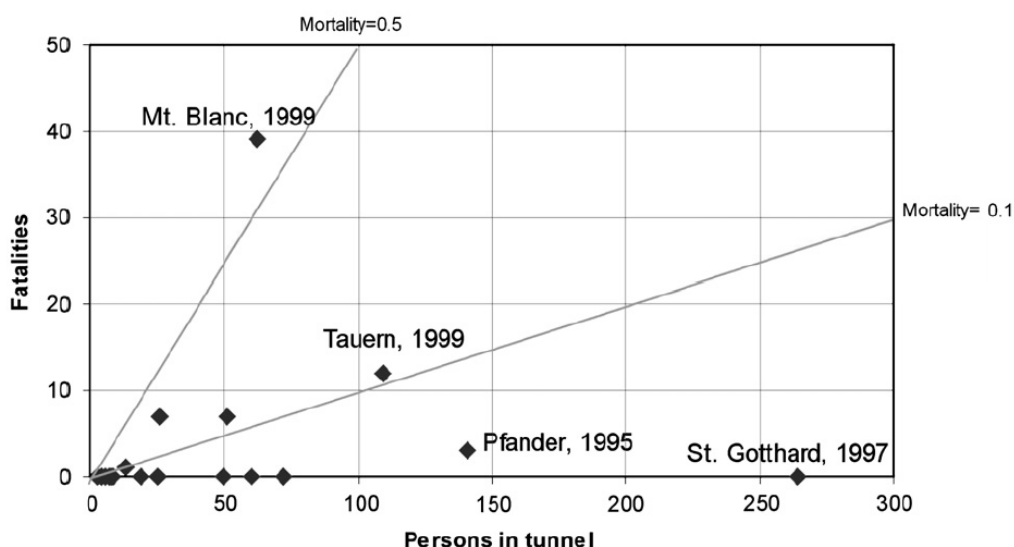


Figura 33 Comparazione tra fatalità e numero di persone esposte (Jonkman, Lentz, Vrijling, & J.K., 2010)

La galleria è lunga **11.6 km** e collega Courmayeur con Chamonix legando la rete autostradale italiana con la rete autostradale francese. Per una lunghezza di **7640 metri** si trova in territorio francese mentre per **3960 metri** si estende in Italia. Si tratta di una galleria a canna singola e doppia carreggiata, una per ciascun senso di marcia. La galleria è larga **8 metri**, **3.5 metri** per ciascuna carreggiata e **0.5 metri** per i due passaggi pedonali. L'altezza della galleria in mezzera è di **5.9 metri**. L'altitudine è di **1381 metri** al portale italiano e **1271 metri** al portale francese. All'apertura della galleria, l'amministrazione francese e l'amministrazione italiana, diedero in concessione a due società la gestione della galleria. Le due suddette società sono **STMB (Societe du Tunnel du Mont-Blanc)** divenuta poi **ATMB (Autoroutes et Tunnel du Mont-Blanc)** e **SITMB (Società Italiana per il Traforo del Monte Bianco)**. Ad ogni società venne affidata la gestione di metà della galleria. I limiti di concessione non coincidono quindi con il confine nazionale tra le due nazioni. Vennero inoltre istituiti i nominativi dei vari responsabili e una commissione di vigilanza di franco-italiana. Di seguito sono riportati alcuni dettagli sulla galleria.

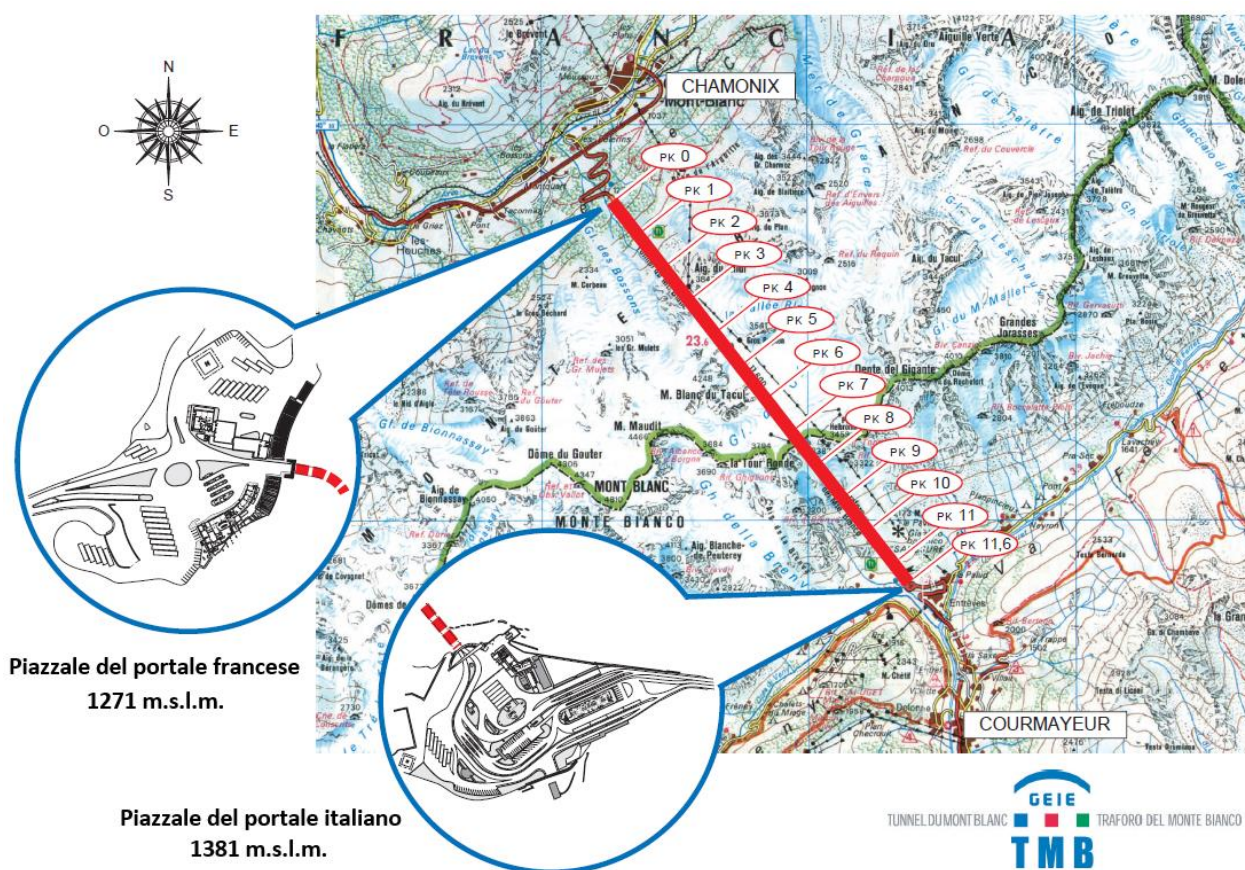


Figura 34 Dettagli della galleria (TMB, s.d.)

Oltre a ciò, dalle sentenze poi emanate, è risultato che *“l’incidente è da attribuire alla gestione della struttura, in particolare delle norme di sicurezza”*. Infatti lo standard di sicurezza adottato risale a diversi decenni prima dell’incidente accaduto. Nel 14 luglio 1965 viene reso operativo l’accordo per l’esercizio e la gestione del traforo, accordo siglato tra Francia e Italia, tramite la *Legge 921/1965*. Successivamente all’accordo seguiranno altri atti e norme di regolamentazione e gestione del traffico nel traforo, fino al 1997 quando il presidente della *Società di gestione del Traforo del Monte Bianco* aggiornò per l’ultima volta il regolamento di circolazione prima dell’incidente. Tuttavia, *“il progetto del traforo risale dunque alla fine degli anni ’50 e si basa su criteri tecnici, standard costruttivi e previsioni del traffico che risalgono a quel periodo (1956)”* (XIII Legislatura). Dalla relazione commissionata dal governo italiano emerge che il *Trafo del Monte Bianco* è stato progettato per un traffico diverso da quello presente nel 1999.

Anno	Autovetture e moto		Autobus		Traffico turistico (autovetture, moto e		Traffico commerciale (camion)		TOTALE VEICOLI
	unità	% su totale	unità	% su totale	unità	% su totale	unità	% su totale	unità
1965	334 326	96,89	5 409	1,57	339 735	98,45	5 337	1,55	345 072
1966	533 504	90,05	14 090	2,38	547 594	92,43	44 856	7,57	592 450
1967	544 304	87,97	12 609	2,04	556 913	90,01	61 805	9,99	618 718
1968	528 711	85,73	10 571	1,71	539 282	87,45	77 420	12,55	616 702
1969	558 847	81,84	10 356	1,52	569 203	83,36	113 630	16,64	682 833
1970	605 978	80,31	10 364	1,37	616 342	81,69	138 176	18,31	754 518
1971	661 133	78,61	10 452	1,24	671 585	79,85	169 444	20,15	841 029
1972	701 006	75,12	11 466	1,23	712 472	76,35	220 739	23,65	933 211
1973	720 076	73,28	11 569	1,18	731 645	74,46	250 993	25,54	982 638
1974	639 819	65,18	11 267	1,15	651 086	66,33	330 501	33,67	981 587
1975	753 253	71,28	13 146	1,24	766 399	72,52	290 360	27,48	1 056 759
1976	821 591	69,22	13 657	1,15	835 248	70,37	351 667	29,63	1 186 915
1977	817 950	66,62	16 188	1,32	834 138	67,94	393 682	32,06	1 227 820
1978	795 716	64,22	16 260	1,31	811 976	65,54	426 984	34,46	1 238 960
1979	919 962	63,46	20 409	1,41	940 371	64,87	509 208	35,13	1 449 579
1980	850 334	60,34	21 632	1,54	871 966	61,88	537 214	38,12	1 409 180
1981	822 605	62,69	22 061	1,68	844 666	64,37	467 507	35,63	1 312 173
1982	867 841	65,34	23 828	1,79	891 669	67,14	436 493	32,86	1 328 162
1983	823 737	64,19	24 878	1,94	848 615	66,13	434 691	33,87	1 283 306
1984	844 958	63,66	26 450	1,99	871 408	65,65	455 886	34,35	1 327 294
1985	876 581	64,42	29 266	2,15	905 847	66,57	454 956	33,43	1 360 803
1986	906 061	63,66	29 105	2,04	935 166	65,70	488 188	34,30	1 423 354
1987	978 040	62,47	31 021	1,98	1 009 061	64,46	556 447	35,54	1 565 508
1988	1 005 587	60,69	31 590	1,91	1 037 177	62,59	619 793	37,41	1 656 970
1989	1 105 353	60,68	31 508	1,73	1 136 861	62,41	684 837	37,59	1 821 698
1990	1 117 635	58,98	30 903	1,63	1 148 538	60,61	746 523	39,39	1 895 061
1991	1 130 777	58,69	27 757	1,44	1 158 534	60,13	768 162	39,87	1 926 696
1992	1 135 033	58,29	30 541	1,57	1 165 574	59,86	781 592	40,14	1 947 166
1993	1 104 391	56,12	27 754	1,41	1 132 145	57,53	835 883	42,47	1 968 028
1994	1 090 752	56,51	27 238	1,41	1 117 990	57,92	812 113	42,08	1 930 103
1995	1 137 213	58,66	27 680	1,43	1 164 893	60,08	773 911	39,92	1 938 804
1996	1 121 583	59,69	27 686	1,47	1 149 269	61,17	729 635	38,83	1 878 904
1997	1 134 735	59,76	29 878	1,57	1 164 613	61,33	734 306	38,67	1 898 919
1998	1 192 615	59,70	28 470	1,43	1 221 085	61,12	776 604	38,88	1 997 689
1999	738 684	94,43	6 179	0,79	744 863	95,22	37 409	4,78	782 272
	29 920 691	64,82	723 238	1,57	30 643 929	66,39	15 516 952	33,61	46 160 881

Figura 35 Evoluzione storico del traffico nel traforo del Monte Bianco per grandi categorie. Dati forniti da Società Italiana per Azioni per il Traforo del Monte Bianco (sitmb) (sitmb, s.d.)

Le previsioni e gli standard progettuali facevano riferimento ad un numero di transiti (nel 1956) di 590000 unità che sarebbero vertiginosamente aumentate a 1970000 unità nel 1998 (+233% in 42 anni). Attualmente il traffico è intorno ai 2000000 di veicoli di cui circa il 40% adibiti a trasporto di merci, mentre nel 1956 il numero di veicoli pesanti era ipotizzato pari al 7.8%. Inoltre è particolarmente rilevante sottolineare come il traffico turistico sia cresciuto di 2.2 volte i valori del 1966 mentre il traffico commerciale sia aumentato di 17 volte rispetto ai valori del 1966. Si verifica così uno scarto radicale tra i parametri d'uso dell'infrastruttura sui quali è stato definito il progetto dell'opera e le effettive condizioni di esercizio del traforo, come è osservabile nella seguente figura.

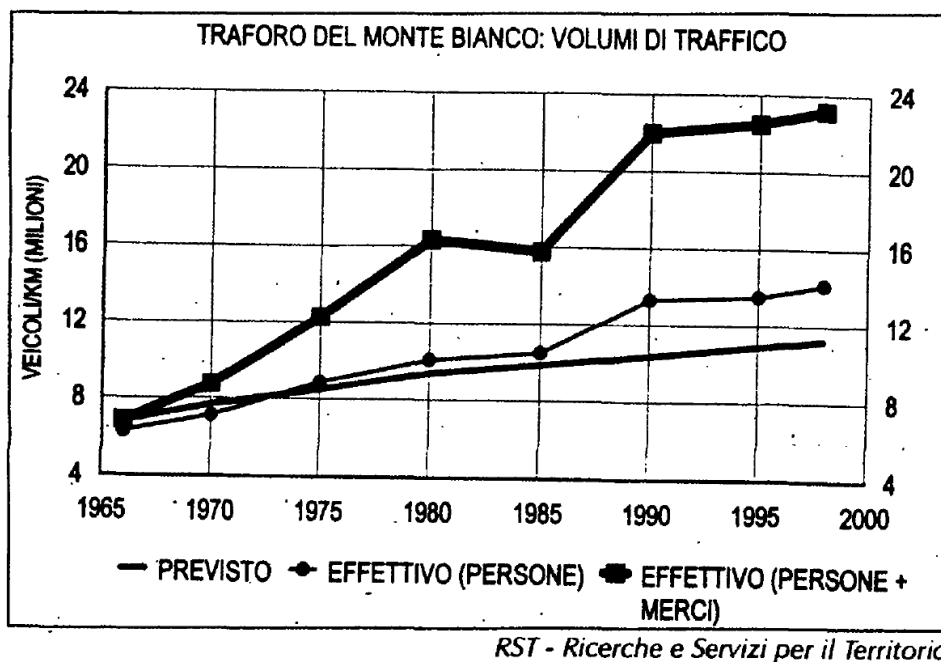


Figura 36 Volumi di traffico nel tempo all'interno del traforo del Monte Bianco (XIII Legislatura)

Nell'incendio hanno perso la vita 39 persone e vi sono stati danni stimabili intorno ai 300 milioni di euro relativi per lo più a 900 metri di galleria severamente danneggiati.

Quello del 1999 non fu l'unico incidente. Per i 32 anni di esercizio, compresi tra il 1966 e il 1998, si sono verificati 323 incidenti, 40 feriti e 3 morti. Si illustra nella seguente figura l'andamento degli incidenti nel tempo.

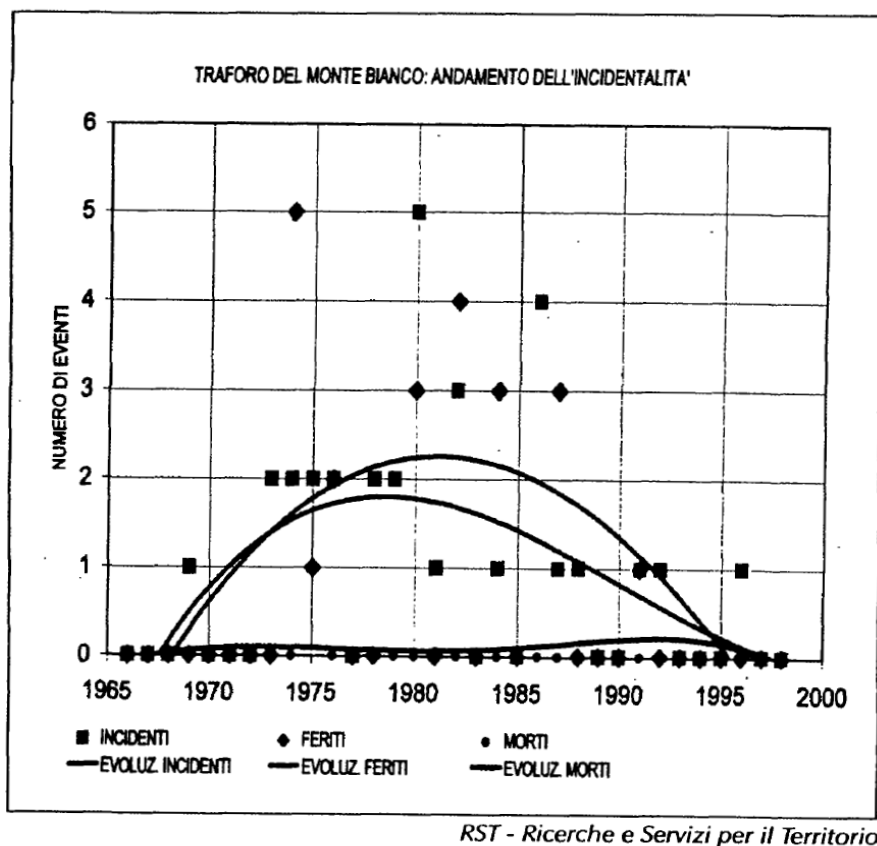
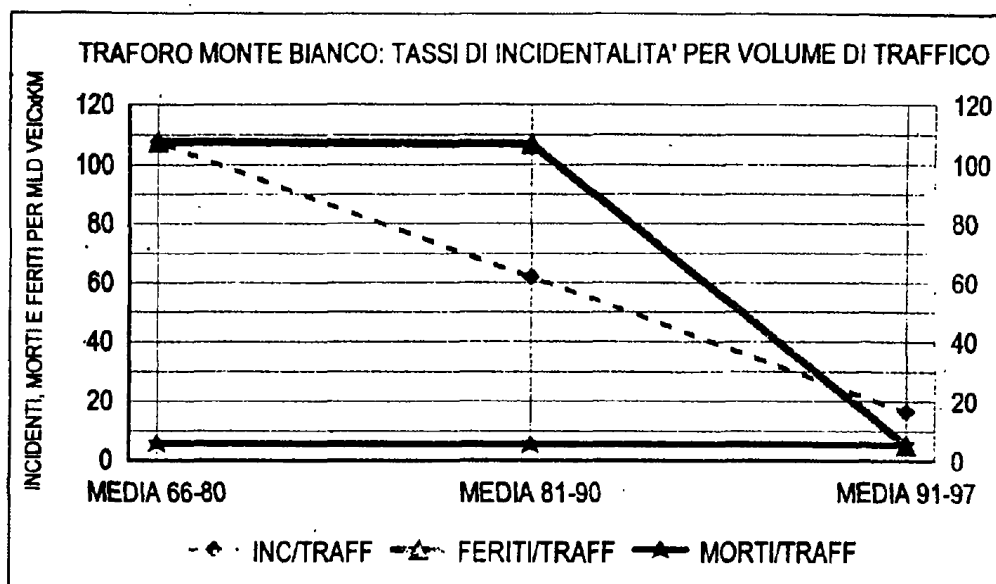


Figura 37 Andamento dell'incidentalità nel traforo del Monte Bianco (XIII Legislatura)

Rapportando l'incidentalità al volume di traffico (veicolo/km) si evidenzia come gli incidenti rispetto al dato di inizio periodo si siano ridotti di oltre lo 80%, i feriti di oltre il 90% e le morti siano rimaste stabilmente attestata su livelli estremamente bassi, mediamente 1 ogni 11 anni, escludendo l'incidente del 24 marzo 1999.



RST - Ricerche e Servizi per il Territorio

Figura 38 Tassi di incidentalità per volume di traffico nel tempo

2.2.2 Le principali caratteristiche tecniche della galleria

La galleria è costituita di una canna scavata all'interno del massiccio alpino e raggiunge profondità di 2000 metri per più della metà della lunghezza. Per quanto concerne la ventilazione non è possibile realizzare pozzi di ventilazione intermedi. Le unità di prelevazione possono essere installate solo in prossimità dei portali. Il sistema di circolazione interno alla galleria è situato sotto la pavimentazione stradale e l'aria viene fornita tramite prese d'aria ogni 10 metri in prossimità di ciascuna delle carreggiate pedonali. Il sistema successivamente viene reso reversibile. L'aria viziata (e i fumi) dell'incendio viene estratta da altre prese d'aria, collocate ogni 300 metri, ed infine trasportata mediante condotte fino ai portali. Delle nicchie di sosta di emergenza sono installate ogni 300 metri lateralmente alla viabilità e disposte con configurazione a quinconce. Sono stati costruiti rifugi ogni 600 metri. Inoltre sono stati installati sistemi sprinkler automatici collegati a sistemi di rilevazione incendi.

2.2.3 Riassunto dell'incendio

La seguente trattazione è frutto della rielaborazione del Rapporto del 6 luglio 1999 stilata da tecnici esperti commissionati da diversi ministeri sia italiani che francesi. In seguito questo rapporto è stato ripreso anche dalle autorità giudiziarie che hanno dovuto pronunciarsi in merito alle responsabilità dei soggetti coinvolti nell'accaduto.

Il 24 marzo 1999 un autocarro belga entrò nel traforo sul versante francese poco dopo le ore 10.30. L'autoarticolato refrigerato proveniente dal territorio francese era diretto verso l'Italia e trasportava un carico di farina e margarina. L'autocarro prese fuoco alle 10:47, a causa di un incendio che si sprigionò dal vano motore e che, in rapida successione, si propagò all'abitacolo e al rimorchio. La causa dell'incendio si pensa essere una perdita di gasolio che si innescò a causa delle superfici calde all'interno del

compartimento del motore. L'incendio, che in questa fase dalle testimonianze presentò fumi di colorazione bianca, costrinse l'autista belga a fermarsi dentro alla galleria, creando un notevole ingorgo di veicoli. L'autista fermò il mezzo a 6.5 km dal portale francese e scappò a piedi verso il portale italiano. I veicoli che lo seguono si incolonnano a distanza ravvicinata e vengono coinvolti nello sviluppo dell'evento. Alle ore 10:51 venne dato un primo allarme alle autorità. In pochi minuti il personale di galleria, preoccupato dell'incendio, fece chiudere al traffico la galleria sul lato francese alle 10:55 e sul lato italiano alle 10:56. Tuttavia, 18 autocarri, 9 automobili, un furgone e una motocicletta entrarono prima della chiusura. Dei veicoli citati, 4 autocarri passarono l'incendio in sicurezza verso l'Italia. A causa della natura del combustibile e del confinamento generato dall'infrastruttura probabilmente si raggiunsero e si mantennero per molte ore temperature di 3000°C. La notevole quantità di fumi, dispersi in prevalenza verso il portale francese, non permise agli utenti incolonnati di comprendere la situazione e li intrappolò nei loro veicoli, che verranno successivamente raggiunti dalle fiamme. La fila di veicoli proveniente dall'Italia, ferma a oltre 300 metri dal focolaio, prese fuoco anch'essa. I veicoli dunque rimasero intrappolati nei fumi e successivamente coinvolti nell'incendio. L'incendio fu domato all'incirca 53 ore dopo poiché le fiamme, per via dei materiali combustibili presenti, si erano ampliate notevolmente, portando velocemente ad un ambiente invivibile per gli utenti e rendendo vani gli sforzi di vigili del fuoco italiani e francesi e degli addetti delle due società che gestivano il traforo. L'aumento della temperatura fu molto rapido e non permise alle squadre di soccorso di avvicinarsi al focolaio. Prodotto dai veicoli, il calore venne trattenuto dal rivestimento dell'impalcato stradale che a sua volta partecipò alla combustione. I fumi, che sin dall'inizio apparvero intensi e opachi, sono la causa del grave bilancio delle vittime. Infatti, nessuno dei passeggeri dei veicoli descritti rimase vivo.

Nei seguenti paragrafi verrà trattato il tema delle conseguenze del piano di emergenza, elaborato dalle società affidatarie, sull'incendio.

2.2.4 L'allerta

Per quanto concerne l'allerta e la direzione delle operazioni seguenti, il piano di emergenza prevede che il primo operatore che rilevi l'incendio en da l'allerta, assumerà la direzione delle operazioni. Il 24 marzo 1999 le cose andarono diversamente. Dal rapporto (Ministero dei lavori pubblici italiano & Ministero degli interni francese, 1999) redatto dalla commissione istituita dalle due nazioni emerge che il primo allarme rilevato è stato rilevato dall'opacimetro nella piazzola di sosta 18 alle ore 10.52. Successivamente gli operatori italiani e francesi hanno rilevato dalle telecamere la presenza di fumo alle ore 10.53 e 10.54. tuttavia emerge anche che nessuno delle due società ha preso il comando e la direzione delle operazioni di soccorso e di emergenza.

2.2.5 La ventilazione

La procedura indica che la ventilazione in caso di emergenza debba provvedere al massimo apporto di aria. La procedura deve essere seguita sia dagli operatori italiani che quelli francesi. Sii tratta di un'operazione critica che può portare anche all'alimentazione dell'incendio. Tuttavia in questo caso, l'incendio si è sviluppato ad una distanza molto elevata dai portali. Questo ha fatto sì che non arrivasse abbastanza aria fresca agli utenti intrappolati.

La procedura inoltre indica che l'estrazione dei fumi deve essere posizionata sul livello massimo. Secondo le dichiarazioni delle testimonianze, in assenza di prove certe date dal fatto di una mancata registrazione automatica dei dati di ventilazione, la procedura è stata seguita dall'ente francese. Ciò non vale per la società italiana che vedendo sugli schermi dei veicoli (a 300 metri di distanza dall'incendio) fare inversione di marcia, ha preferito fornire aria che estrarre fumi per permettere la fuga di queste persone.

Non si sa se la rigorosa applicazione della procedura avrebbe potuto evitare la catastrofe. Tuttavia, si è certi che l'apporto di aria ha aggravato lo sviluppo dell'incendio. Inoltre l'apporto di aria ha ridotto la stratificazione dei fumi.

2.2.6 Altri dispositivi di sicurezza

Nel 1995 venne installato il sistema radio all'interno della galleria. Lo scopo era quello di permettere la comunicazione radio sulle frequenze di servizio e di sicurezza, fornendo istruzioni agli utenti. La comunicazione radio non venne utilizzata per entrare in comunicazione con gli utenti presenti.

2.2.7 La regolazione del traffico

La regolazione del traffico prevede che i veicoli in marcia debbano essere distanti l'uno dall'altro almeno *100 metri*. Una segnalazione dinamica doveva essere posizionata all'entrata della galleria. Tuttavia la segnalazione è stata rimossa dalle due società. Segue quindi che il 24 marzo del 1999, i veicoli viaggiavano in marcia con una distanza di sicurezza inferiore da quella indicata.

All'interno della galleria vi sono semafori posizionati ogni *1200 metri*. Il giorno dell'incendio vennero messi in colorazione rossa dopo qualche minuto dall'allerta. Inoltre alcuni semafori non erano funzionanti e altri non furono rispettati dagli utenti (probabilmente a causa della bassa visibilità).

I veicoli entrati dietro all'autoarticolato belga si sono posizionati gli uni dietro agli altri, formando una fila. La distanza fra i veicoli era di pochi metri. Si sono trovati in un'atmosfera ricca di fumi per centinaia di metri.

2.2.8 L'organizzazione e la cronologia dei soccorsi

A livello di coordinamento dei soccorsi pubblici francesi ed italiani non esiste un piano di soccorso pubblico comune franco-italiano. Un piano specializzato per le due regioni di interesse (Alta Savoia e Valle d'Aosta) è stato elaborato nel 1994. In riferimento al piano, in assenza di disposizioni contrarie, le autorità territoriali competenti prendono la direzione dei soccorsi in caso di necessità. La cooperazione regionale transfrontaliera si è intensamente sviluppata negli anni successivi, fino all'autunno 1998, anno in cui è stata svolta un'azione di formazione ed addestramento congiunta tra i due corpi dei Vigili del Fuoco.

Il 24 marzo, 1999, dato l'allarme delle 10.54, i mezzi di soccorso entrarono in galleria con un ritardo di:

- *1 minuto* dal portale francese per le squadre antincendio dell'ente di gestione francese;
- *2 minuti* dal portale italiano per le squadre antincendio dell'ente di gestione italiano;
- *16 minuti* dal portale francese per i Vigili del Fuoco francesi (a *12 minuti* dell'arrivo dell'allerta alla centrale);
- *16 minuti* dal portale italiano per i Vigili del Fuoco italiani (a *8 minuti* dell'arrivo dell'allerta alla centrale);

Dal rapporto stilato dagli esperti tra i due paesi si identificano questi ritardi come nella media.

Facendo un'analisi retrospettiva dell'incendio si individuano quattro fasi da mercoledì 24 a sabato 27 marzo:

- Il blocco dei mezzi di soccorso da parte dei fumi nella prima mezz'ora dell'incendio;
- L'evacuazione degli utenti e il salvataggio dei Vigili del Fuoco.
- I tentativi successivi d'intervento di mercoledì sera e giovedì sera.
- Il controllo e l'estinzione dell'incendio.

Nella prima fase i mezzi privati e pubblici non riuscirono a raggiungere l'autocarro coinvolto e quindi non poterono attaccare l'incendio. Le squadre partite dal portale francese si bloccarono tra pk0.75 e pk1.2 (la squadra antincendio ATMB) e tra pk2.7 e pk4.8 (Vigili del Fuoco di Chamonix). Le squadre partite dal portale italiano si fermarono a circa *300 metri* dal focolaio.

L'evacuazione dei 12 autisti di mezzi pesanti presenti in galleria sul lato italiano, fu possibile poco dopo le ore 11, dalle squadre SITMB entrate in galleria. In riferimento agli altri utenti, circa alle ore 12 di mercoledì, né autorità pubbliche né i responsabili dei Vigili del Fuoco erano a conoscenza della possibilità di presenza di utenti da soccorsi all'interno della galleria. Tutti i mezzi di soccorso pubblici furono mobilitati per il salvataggio dei soccorritori bloccati. I cinque Vigili del Fuoco sono stati evacuati e salvati dal rifugio 24, circa 3 ore dopo essere entrati nel rifugio. I 17 soccorritori francesi (6 ATMB e 11 Vigili del Fuoco di Chamonix) furono salvati successivamente alle 18.35 dopo 5 ore di sforzi. Dei 17 soccorritori, 14 sono stati trasportati all'ospedale e di questi un sotto ufficiale del centro di Chamonix decederà poco dopo il soccorso.

Per quanto concerne gli interventi successivi d'intervento di mercoledì sera, questi avvennero alle ore 22.15, poco dopo i soccorsi ai Vigili del Fuoco. Una colonna francese supportata da Vigili del Fuoco provenienti da Ginevra partì dal portale italiano cercando di avvicinarsi all'incendio, tuttavia poco dopo furono costretti a rinunciare a causa dell'intensità del calore e dei fumi. Un tentativo invano fu fatto anche il giorno successivo.

Le squadre italiane e francese, con il supporto di una squadra di Vigili del Fuoco di Ginevra controllarono l'incendio il venerdì verso le ore 16.00 e procedettero al raffreddamento delle strutture e dell'atmosfera interna alla galleria anche con l'aiuto di nebulizzatori.

2.2.9 Conclusioni

Le autorità giudiziarie hanno poi cercato di verificare, al fine di pronunciarsi in merito all'accaduto, il seguente punto. Le autorità competenti, con l'aiuto dei tecnici forensi, hanno avuto il compito di determinare se la tragedia del Traforo del Monte Bianco sia stata determinata da fatalità contro le quali è impossibile agire, o se invece sia risultato diretto delle condizioni di traffico e sicurezza. In relazione a questo punto si sono svolte le seguenti considerazioni:

- La causa dell'incendio è ascrivibile ad un incidente accaduto all'autoarticolato ma se ci fosse stata una corretta gestione, le conseguenze avrebbero avuto esiti più ridotti.
- L'incidente è conseguenza di eventi successivi come la propagazione dell'incidente dovuto al contenuto del carico, i materiali dell'autoarticolato, l'ingente produzione di fumi tossici e molto caldi ed infine la posizione di abbandono del mezzo. Oltre a questo si ricorda il tempo trascorso tra l'insorgere dell'incendio e la chiusura dei portali pari a *9 minuti*.
- La propagazione dei fumi e la posizione dell'autoarticolato ha reso difficile l'allontanamento dei veicoli dal luogo dell'incendio.
- A causa della mancata funzionalità del sistema di ventilazione, che non riusciva a smaltire i fumi, questi hanno portato ad un innalzamento della temperatura all'interno della galleria innescando incendi in altri veicoli, con conseguente aumento di produzione di fumi ed aumento della temperatura interna.
- I soccorsi dei mezzi pesanti dei Vigili del Fuoco italiani e francesi intervengono solo a *12 minuti* dall'allarme. Gli operatori vengono rapidamente bloccati dal calore e dei fumi tossici.
- A *14 minuti* dall'allarme i mezzi di soccorso interno del traforo sono bloccati e i vigili sono costretti a cercare riparo nei rifugi antincendio. Due soccorritori muoiono nel tentativo di salvare altre vite.
- La durata dell'incendio (*54 ore*) e le alte temperature *3000°C* non hanno permesso la vita agli utenti che hanno raggiunto i rifugi di sicurezza, che erano stati progettati per condizioni termiche e di durata inferiore.

Dalla sentenza emanata nel 2005, emerge che la propagazione incontrollata dei fumi tossici, responsabile della maggior parte delle vittime, è stata associata a conseguenza diretta di scarso sistema di ventilazione. Il sistema di ventilazione infatti non è stato in grado di smaltire i fumi. Gli elevati tempi di intervento sono invece dovuti alla mancanza di comunicazione tra gli operatori italiani e francesi. Si ricorda infatti che la gestione dell'esercizio della galleria era affidata a due enti diversi, uno per il lato italiano e uno per il lato francese. Successivamente all'incendio del 1999, oltre alla ristrutturazione della galleria, venne incrementato il sistema di sicurezza secondo lo specifico livello di rischio.

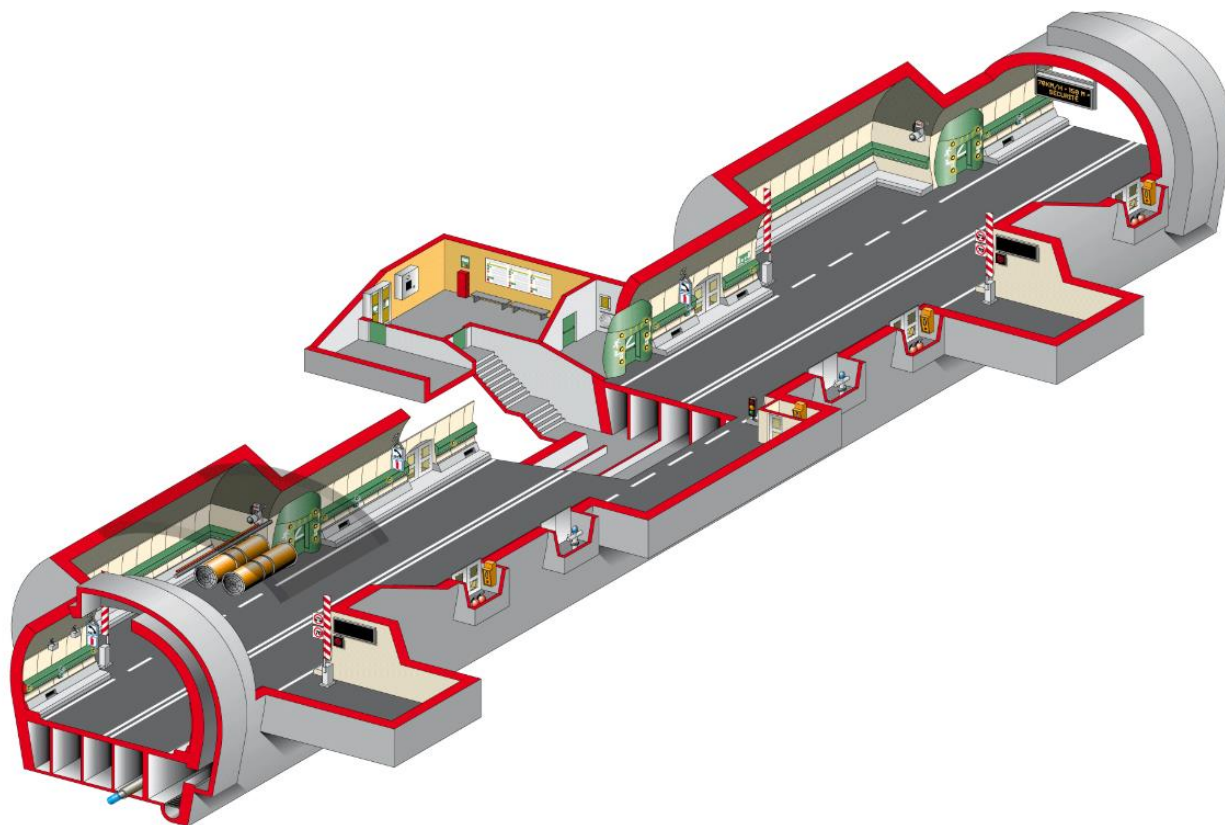


Figura 39 Nuova configurazione del sistema di sicurezza nella galleria del Monte Bianco (TMB, s.d.)

2.3 Incendio della galleria del San Gottardo del 2001

2.3.1 Introduzione

In questo paragrafo si affronterà l'incendio nella galleria del San Gottardo dell'ottobre 2001. La trattazione seguirà la relazione di investigazione dei periti forensi prodotta per il sig. Antonio Perugini, il magistrato del pubblico ministero del Canton Ticino (Svizzera). Le relazioni e i risultati delle investigazioni sono state pubblicate da (Carvel & Beard, 2005) con l'autorizzazione del magistrato.

2.3.2 Riassunto dell'incidente

Il 24 ottobre, 2001, alle 9.93, due autocarri percorrevano la galleria del San Gottardo nelle Alpi Svizzere. La galleria stradale è costituita di due carreggiate, una per ciascun senso di marcia, e lo sviluppo è lungo l'asse nord-sud.

Un veicolo belga, proveniente da Airolo (sud) e diretto verso nord, impattò sul lato destro della galleria, finendo nella carreggiata destinata al senso di marcia opposto. Ci fu un secondo impatto sul lato sinistro della

galleria che fece balzare indietro il veicolo al centro della strada. Un autocarro italiano, diretto verso Airolo, al fine di cercare di evitare la collisione con l'autocarro, si spostò verso l'altra carreggiata della strada. Tuttavia, l'impatto ci fu lo stesso. Successivamente all'impatto l'autocarro belga si posizionò sulla carreggiata diretta verso Airolo mentre l'autocarro italiano si posizionò su entrambe le carreggiate, occupando la carreggiata in direzione sud con il rimorchio e la carreggiata direzione nord con la cabina autista.

In poco tempo, un autocarro prese fuoco e l'incendio si propagò immediatamente verso l'altro autocarro. Successivamente entrambi gli autocarri sono stati coinvolti totalmente dall'incendio. L'autista dell'autocarro italiano diede l'allarme ed impedì al traffico di entrare in galleria. Questo facilitò l'arrivo dei Vigili del fuoco. Questi arrivarono sul luogo dell'incendio in meno di 7 minuti e videro la situazione mostrata nella prossima figura.



Figura 40 La prima fotografia dell'incidente (Carvel & Beard, 2005)

Le squadre antincendio, provenienti da sud, non sono state in grado di avvicinarsi a più di 15-20 metri a causa dell'intensità dell'incendio. La situazione peggiorò successivamente a causa di una esplosione avvenuta a circa mezz'ora dall'incidente.

A nord dell'incidente c'era una coda di autocarri, che percorrevano la strada dietro dall'autocarro italiano, e si sono fermati quando è avvenuto l'incidente. Le fiamme dell'incendio sono propagate lungo tutti questi veicoli in coda. Inoltre, la ventilazione di galleria diretta verso nord, ha fatto sì che fumi, gas tossici e calore prodotti dall'incendio sono stati sospinti verso nord. Tutto ciò ha reso molto complicato l'intervento delle squadre antincendio provenienti da nord.

L'incendio durò approssimativamente 24 ore. Dopodiché fu domato e i corpi di 11 persone furono trovati carbonizzati a nord dell'incidente.

Le investigazioni successive hanno avuto lo scopo di:

- Determinare le cause e l'origine dell'incendio dovuto alla collisione di due autocarri il 24 ottobre 2001 alle 09:39 nella galleria del San Gottardo;
- Stabilire la dinamica del disastro in accordo alla natura e quantità di combustibile e la geometria del sito;
- Spiegare il meccanismo dell'esplosione osservato dalle squadre antincendio durante gli interventi in galleria.

2.3.3 Riassunto descrittivo della zona incidentale

La galleria del San Gottardo si estende da sud in località Airolo a nord in località Göschenen. Una galleria di sicurezza si estende parallelamente alla galleria principale sul lato orientale. Ogni 250 metri sono interdistanziati rifugi, lungo tutta la galleria. I rifugi connettono la galleria di servizio con quella di emergenza.

L'estensione dell'incendio, la zona soggetta ad alte temperature e la zona di estensione dei fumi sono mostrate nella seguente figura.

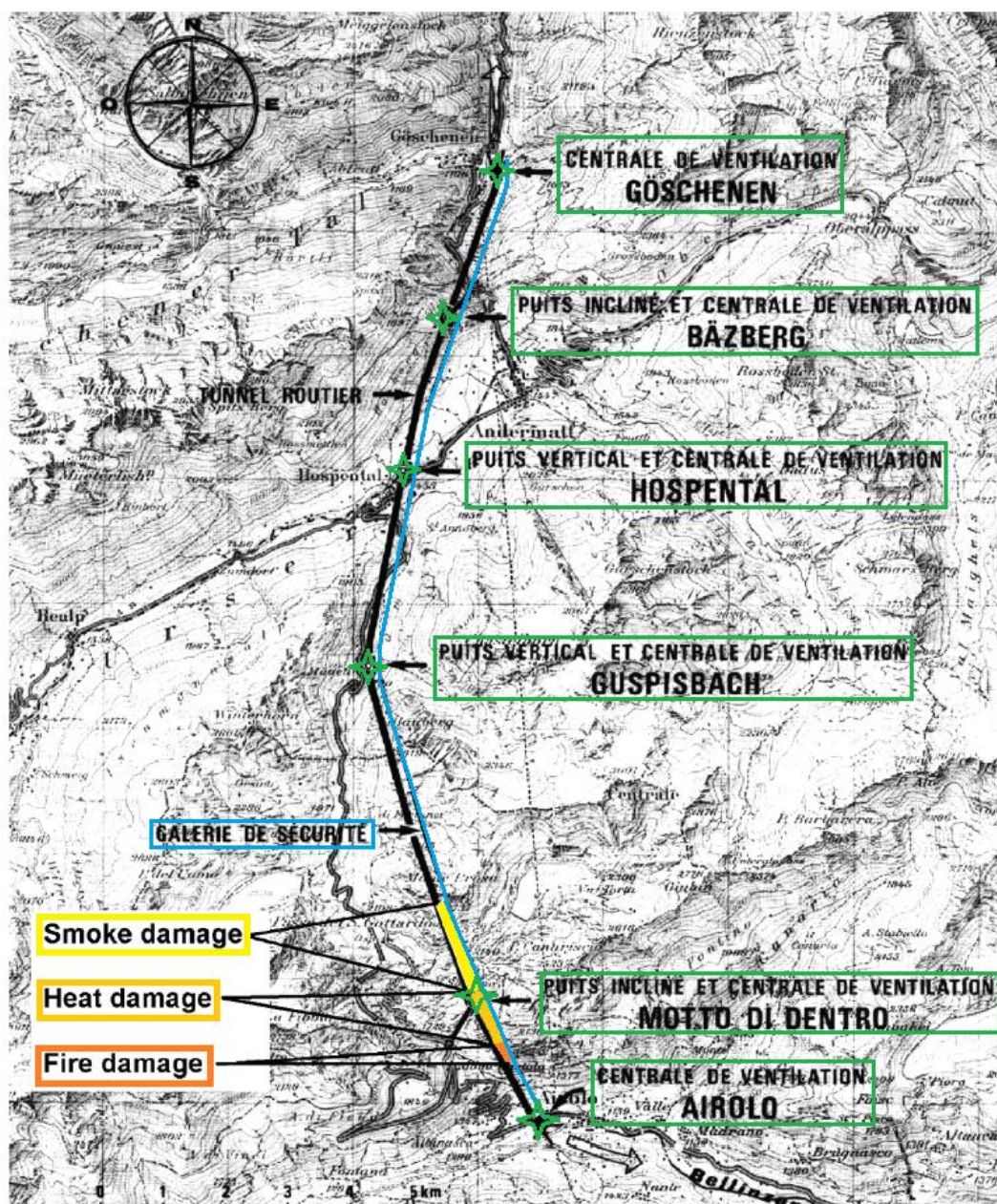


Figura 41 Carta topografica della galleria del San Gottardo. Sono indicati l'estensione dell'incendio, calore e fumi.

Durante gli studi, ad ogni veicolo coinvolti nell'incidente è stato assegnato un numero come mostrato nella seguente galleria.

L'aria fresca viene estratta ai portali e distribuita sulla parte destra della galleria, mentre l'aria viziata viene estratta nella parte sinistra della galleria. A causa della ventilazione, durante l'incendio le fiamme sono state sospinte verso il lato occidentale della galleria come si può vedere dai danni osservabili nella figura successiva.



Figura 43 Fotografie dell'autocarro 1 e 2 scattate durante e successivamente all'incendio

Sopra il veicolo italiano, posizionato sulla carreggiata orientale, la calotta risulta intatta in alcuni punti mentre in altri si possono osservare collassi localizzati. Sopra il veicolo belga invece la il collasso è totale nel lato della carreggiata mentre al centro risulta ancorato al muro separatore dei condotti d'aria. Questi danni sono osservabili nella seguente figura.



Figura 44 Danni strutturali sopra l'autocarro 1 e l'autocarro 2

Le fiamme e i prodotti dell'incendio, insieme a gas non combustibili, sono stati sospinti in direzione verso il portale nord. Questo è comprovato dalla distribuzione di fuliggine e altri prodotti di combustione in galleria. Questa propensione verso una direzione specifica, come il rilascio di calore in direzione preferenziale, ha

propagato l'incendio verso nord coinvolgendo gli autocarri in coda sulla carreggiata sinistra. Segue quindi che nell'incendio sono state coinvolti i due autocarri dell'incidente iniziale e altri cinque autocarri in coda al veicolo italiano (*veicoli dal 3 al 7*). I suddetti veicoli in coda sono mostrati nella seguente immagine.



Figura 45 Autocarri dal 3 al 7 coinvolti nell'incendio. I suddetti veicoli erano in coda dietro l'autocarro italiano coinvolto nell'incidente iniziale

Le operazioni di lotta antincendio sono state concentrate sui suddetti veicoli:

- Le squadre antincendio provenienti da Airolo ed entrati nel portale sud della galleria, hanno attaccato l'incendio che coinvolgeva i due veicoli coinvolti nell'incidente iniziale;
- Le squadre antincendio provenienti da Göschenen hanno provato ad estinguere l'incendio su tutti i veicoli che riuscivano a raggiungere con le autopompe;

- Un altro gruppo di lotta antincendio, proveniente dal portale nord ha cercato, con successo, di estinguere l'incendio che coinvolgeva l'autocarro *numero 7*, l'incendio infatti non si è propagato oltre questo punto;
- Attraverso il rifugio vicino i *veicoli 3 e 4*, un altro gruppo antincendio è stato in grado di raggiungere i *veicoli 3, 4 e 2*. Tuttavia, il gruppo di lotta antincendio è stato costretto a ritirarsi nella galleria di emergenza a causa del collasso della calotta.

Altri veicoli abbandonati, principalmente a causa della mancanza di visibilità, sono stati ricoperti di fuliggine. La carrozzeria in plastica dei veicoli più vicini all'incendio, a causa dell'energia radiativa si è sciolta.

Le vittime dell'incendio sono state ritrovate a nord dell'incidente a circa *1250 metri*. Alcuni sono stati ritrovati all'interno dei propri veicoli mentre altri lungo le carreggiate della strada. Dalle autopsie dei corpi si sono riscontrate *10 vittime* per inalazione di fumi. Il corpo carbonizzato dell'undicesima vittima, ritrovato nell'autocarro *numero 4*, non ha lasciato abbastanza informazioni al fine di formulare un'assunzione sulle cause della morte.

2.3.4 Cronologia dell'incidente

Identificare la cronologia degli eventi che sono avvenuti nelle fasi iniziali dell'incendio è di grande importanza al fine di comprendere non solo l'evoluzione iniziale dell'incendio ma anche la velocità di propagazione dei fumi verso nord. Inoltre, è possibile una stima del tempo di resistenza al fuoco della calotta della galleria. Segue quindi che grande sforzo è stato dato nelle investigazioni al fine di ricostruire la cronologia dell'evento. Sono quindi state raccolte le testimonianze dei sopravvissuti ed addetti coinvolti e i dati e segnali dei sistemi di sicurezza al fine di ricostruire a scala intera l'incendio a partire dall'incidente iniziale.

2.3.5 Discussione della cronologia

La cronologia è stata strutturata in base alle testimonianze raccolte da personale professionale, magistrati ed ufficiali giudiziari. Alle testimonianze si sono aggiunti anche i dati raccolti dai sistemi di monitoraggio posti ad Airolo e Göschenen. I dati a disposizione quindi erano di grande affidabilità e la loro bontà è stata valutata attraverso controlli incrociati delle fonti. Le informazioni chiave ottenute sono state:

- Successivamente all'incidente tra l'autocarro numero 1 e numero 2 c'è stato uno sversamento di liquido sulla pavimentazione stradale.
- Nel primo minuto successivo all'incidente, si svilupparono i fumi. Poco dopo si osservarono fiamme visibili sulla pavimentazione stradale.
- Circa 3 minuti dopo si osservò la propagazione delle fiamme su entrambi i veicoli. Le fiamme raggiunsero la calotta della galleria.
- In 15 minuti circa successivamente all'incidente, i fumi e prodotti di combustione si sono propagati per 2.5 km in direzione del portale nord.
- I fumi erano densi e viaggiavano a grande velocità (gli utenti hanno comparato il fenomeno ad una valanga);
- La resistenza al fuoco degli elementi in calcestruzzo della calotta è stata di 30 minuti.
- Si è avuta una forte esplosione circa 30 minuti dopo l'intervento delle squadre antiincendio (37 minuti dopo l'incidente).
- L'intensità dell'esplosione è stata sufficiente a sorprendere le squadre antincendio e la sua forza è stata in grado di far oscillare l'autocarro posto più vicino ad Airolo.

2.3.6 Le origini dell'incendio

I due autocarri coinvolti nella collisione che ha dato luogo all'incendio hanno le seguenti caratteristiche. L'autocarro numero 1 era un autoarticolato pesante composto di una unità motrice (motore 12816 cc turbodiesel, 460 cavalli e un serbatoio di capacità 600 litri) e un rimorchio chiuso (costituito di due porte sul lato posteriore e 7500 kg di merce al momento dell'incidente). L'autocarro numero 2 è un autoarticolato composto di un'unità motrice (motore 13798 cc turbodiesel, 470 cavalli e un serbatoio di capacità 600 litri e 300 litri di riserva). Al momento dell'incidente il serbatoio principale era vuoto e quello di riserva aveva approssimativamente 200-300 litri. Il rimorchio telonato conteneva un carico di circa 15200 kg.

Il rimorchio dell'autocarro numero 1 conteneva circa 7500 kg di merce costituita principalmente in abbigliamento, accessori da abbigliamento, materiale tessile e 2230 kg di pellicola fotografica. Diverse centinaia di kilogrammi di merce, imballate in cartoni e disposte sul pianale del rimorchio, sono state ritrovate intatte. Gli imballaggi hanno prevenuto ogni contatto con l'ossigeno contenuto nell'aria. Conseguentemente solo gli imballaggi sono rimasti parzialmente bruciati e gli involucri in plastica si sono sciolti proteggendo parzialmente i beni come si osserva nella prossima figura.



Figura 46 Immagine del rimorchio dell'autocarro numero 1

Il rimorchio dell'autocarro numero due conteneva 1099 pneumatici per automobili, per un peso complessivo di circa 15200 kg. Il carico è stato completamente distrutto e si è conservato solo l'involucro di metallo del rimorchio (completamente ricoperto di uno spesso strato di fuliggine) e le fibre di acciaio del rinforzo strutturale degli pneumatici. Tutto ciò è visibile nella prossima immagine.



Figura 47 I resti dell'autocarro numero 2

I periti forensi, appena entrati in galleria, hanno scoperto uno spazio confinato completamente ricoperto di fuliggine. Hanno visto sette autocarri incendiati, ricoperti di detriti di calcestruzzo provenienti dalla calotta. Non sono state svolte indagini circa i veicoli non coinvolti nell'incendio. La prima squadra aveva il ruolo di localizzare con esattezza il luogo di origine dell'incendio.

Molti elementi hanno contribuito alla localizzazione della localizzazione di origine dell'incendio. Alcuni di questi: sono la progressione dell'incendio, le tracce della combustione, la cronologia dell'evento, le dichiarazioni dei testimoni e delle squadre antincendio. Va ricordato che molte prove materiali sono state distrutte a causa della severità e della durata dell'incendio. È stato quindi necessario studiare le prove fotografiche ottenute nelle fasi iniziali dell'incendio.

Dallo studio fenomenologico degli incendi si riscontrano sempre tre fattori combinati che danno luogo ad un incendio: vapori di combustibile o gas infiammabili, ossigeno (generalmente contenuto in aria) e una sorgente iniziale di calore. Qualsiasi sia la velocità di propagazione di incendio o di esplosione, la reazione di combustione incomincia sempre in un punto preciso di origine. L'incendio poi si propaga consumando nuovo combustibile. Successivamente ad un incendio è possibile seguire la propagazione delle fiamme e svolgere una *backanalysis* per ritrovare il punto di origine. Nelle indagini si è dimostrata una sola direzione di propagazione dall'analisi dei fumi. I fumi infatti si sono dispersi da sud verso nord. Dall'analisi la propagazione dell'incendio si è osservato che sono rimasti coinvolti i due autocarri dello scontro e gli autocarri in fila in direzione nord. Da queste analisi si riscontra quindi che l'incendio ha avuto origine in prossimità degli autocarri numero 1 e numero 2 coinvolti nell'incidente stradale.

A volte è possibile localizzare l'origine anche di un incendio che ha causato danni limitati. Quando il carico d'incendio è dovuto al contributo combinato di combustibile e comburente è possibile localizzare l'origine come il punto in cui ci sono tracce più intense di incendio. Questa assunzione la si fa sulla base del fatto che,

in questo caso, si hanno tracce più intense di incendio nel punto di origine a causa di esposizione di incendio più prolungata.

In questo caso, nell'incendio della galleria del San Gottardo è difficile utilizzare le tracce di incendio per localizzare l'origine dell'incendio a causa dell'estensione dei danni. Tutto il materiale combustibile dell'autocarro numero 2, nella motrice, nel rimorchio e il carico, è stato distrutto. È stato impossibile distinguere una superficie o un volume che è stato più intensamente incendiato del resto. Tutto il materiale della motrice dell'autocarro numero 1 è stato distrutto dall'incendio. Tuttavia, all'interno del rimorchio parte del carico si è salvato. Questo significa che la propagazione dell'incendio è partita dalla motrice e si è sviluppata verso il rimorchio, assumendo che la lotta antincendio ha coinvolto uniformemente l'intero autocarro. Questa assunzione è valida perché la lancia ad alta pressione usata attacca simultaneamente l'intera superficie dell'incendio.

Tutti i rapporti di testimonianza, incluse le dichiarazioni dell'autista dell'autocarro numero 2, localizzazione l'origine dell'incendio in una delle due motrici degli autocarri coinvolti nell'incidente. Si è inoltre osservato che dopo la collisione una grande quantità di liquido si è sversato sulla pavimentazione stradale. I serbatoi erano posizionati nella parte laterale e posteriore della motrice. Pochi secondi dopo le fiamme si sono sviluppate nella pavimentazione stradale. Un liquido infiammabile può essere visto nella grondaia orientale nella prima foto dell'incidente



Figura 48 Liquido infiammabile nella grondaia

L'origine dell'incendio è quindi ricavata da tre parametri:

- La progressione e propagazione dell'incendio;
- Le tracce dell'incendio;
- La cronologia dell'evento.

Grazie alle indagini su questi elementi si è concluso che l'incendio ha avuto origine nei pressi dell'autocarro numero 1 e si è poi propagato verso l'autocarro numero 2. Questo scenario è sostenuto dall'osservazione di tracce dell'origine dell'incendio in prossimità della motrice dell'autocarro numero 1. A causa della collisione tra i due veicoli si è inoltre generato anche il calore necessario all'innesco dell'incendio. Se l'incendio ha avuto origine in prossimità dell'autocarro numero 1 è logico supporre che le fiamme sono state inizialmente

trasmesse alla parte più vicina dell'autocarro adiacente per poi propagarsi alla motrice dell'autocarro numero 2. Questa assunzione è supportata dall'estensione delle fiamme visibile nella prima immagine dell'incendio.

2.3.7 Le cause dell'incendio

L'interpretazione di diversi elementi durante le indagini ha permesso di dedurre la natura del combustibile che una volta innescato ha dato luogo all'origine dell'incendio. Questi elementi sono testimonianza dell'autista dell'autocarro numero 3, che si è fermato in coda dietro all'autocarro numero 2.

Immediatamente dopo la collisione l'autista dell'autocarro numero 3 ha abbandonato il suo veicolo, si è avvicinato alla scena dell'incidente e ha udito il rumore di un liquido sversarsi sulla pavimentazione stradale. Tuttavia, per quanto concerne gli autocarri, vi sono numerosi liquidi che possono essere dispersi dopo un urto meccanico. Si possono disperdere:

- olii lubrificanti;
- olii idraulici;
- liquido refrigerante;
- carburante.

Alcuni autocarri dispongono inoltre di altri sistemi idraulici, per esempio olii per il controllo idraulico del rimorchio, ma i veicoli coinvolti nell'incidente non possedevano questi sistemi.

Prima che siano state osservate le fiamme, le testimonianze descrivono un gas simile a fumo rilasciato dalla zona dell'incidente. Le circostanze dell'incidente e la natura dei carichi trasportati escludono ogni emissione massiva di polvere. Poiché in quel momento non è stata osservata nessuna combustione, si assume che il fumo osservato non è il risultato di una combustione. Segue quindi che i gas osservati dai testimoni possono essere stati originati solo dalla volatilizzazione di un liquido.

Le misure di temperatura, effettuate su due autocarri identici a quelli dell'incidente e trasportanti gli stessi carichi, sono state svolte nella zona meridionale della galleria del San Gottardo il 18 e il 19 febbraio 2002. I risultati di questi esperimenti hanno mostrato che le superfici più calde nel motore, ovvero il turbocompressore e il sistema di scarico, raggiungono temperature di 400-600°C. Questi valori sono poi funzione della coppia esercitata dal motore che a sua volta è funzione della livelletta affrontata (solo della pendenza a causa del fatto che il carico era lo stesso di quello dell'incidente). Gli intervalli di temperatura osservati sono più alti del punto di ebollizione di tutti i liquidi descritti che possono essere presenti in un autocarro. È quindi logico supporre che il fumo osservato dall'autista testimone erano prodotti della volatilizzazione dei liquidi a contatto con la superficie calda della motrice.

Seguendo l'emissione dei vapori, i testimoni hanno osservato delle piccole fiamme svilupparsi a livello della pavimentazione stradale. Chiaramente le condizioni della pavimentazione stradale erano tali che l'innescò dell'incendio era favorevole. Appena il liquido si è sversato il vapore ha incominciato a volatilizzare nell'atmosfera circostante. Al fine di avere un incendio è necessario che ci sia una concentrazione di combustibile volatilizzato nell'aria, questa concentrazione viene detta limite di infiammabilità. La concentrazione di combustibile volatilizzato dipende poi dalla pressione di vapore. Il tutto è controllato dalla temperatura: maggiore è la temperatura, maggiore la concentrazione di combustibile volatilizzato. Nelle condizioni iniziali dell'incendio di un liquido sversato, le relative basse temperature del liquido producono solo una limitata quantità di vapore, che rilasciato, entra nell'intervallo di infiammabilità e brucia dando luogo a delle piccole fiamme. Questo effetto viene descritto con maggior precisione nel capitolo dedicato alla dinamica degli incendi in galleria, nello specifico, ciò che concerne la trattazione della lunghezza della fiamma.

Nella prima foto, scattata circa 5-6 minuti dopo l'apparizione delle piccole fiamme descritte dal conducente dell'autocarro numero 3, le fiamme coprono una parte significativa della superficie della strada sotto i due autocarri. Successivamente queste fiamme si sono propagate di fronte all'autocarro numero 2 e verso i drenaggi. È possibile quindi affermare che una grande quantità di liquido si è sversata sulla pavimentazione. Dopodiché il liquido è fluito nella direzione sud est seguendo la pendenza. Per questo motivo si è sicuri che il liquido sia stato di tipo infiammabile in quanto il liquido di raffreddamento sarebbe stato troppo poco viscoso per permettere una significativa propagazione. Sono stati scartati, per incompatibilità di tipo dinamico, anche l'olio motore e l'olio del cambio. Successivamente sono state stimate le quantità dei liquidi infiammabili possibili. Si sono ricavate le seguenti quantità: 20-25 litri di olio motore, 10 litri di olio del cambio, 5-10 litri di olio idraulico, 600 litri di combustibile dell'autocarro 1 e 900 litri dell'autocarro 2 (considerando le capacità dei serbatoi). Solo i combustibili degli autocarri soddisfano le quantità riscontrate nell'incendio. Queste ipotesi sono state poi confermate dalle perizie meccaniche svolte sulle due motrici.

Tutte le ipotesi riportate fino ad ora si basano per una buona parte sulla testimonianza di una singola persona e sulle osservazioni delle prime fasi dell'incendio. Da questo si è dedotto che sono il combustibile proveniente da uno dei due autocarri può essere responsabile degli incendi visibili in fotografia. Questa ipotesi è supportata dalle prove materiali dalle scene dell'incidente. Le prove sono le tracce di combustibile riscontrate nella pavimentazione stradale sotto e nelle immediate vicinanze dell'autocarro 1 e autocarro 2.

Quando un combustibile liquido è sversato su una superficie bituminosa, parte del combustibile viene adsorbito dalla superficie. La parte adsorbita è sottoposta solo in parte alle alte temperature e cosa più importante non viene a contatto con l'ossigeno. A causa della bassa esposizione, la parte adsorbita non è soggetta a combustione. Otto campioni sono stati estratti dalla porzione della strada che è stata soggetta a sversamento del combustibile. Sei altri campioni, di peso equivalente, sono stati raccolti a 14, 20, 25, 60, 110 e 210 metri dal luogo dell'incidente. Tutti i campioni sono poi stati trasportati in contenitori a vuoto e sono stati analizzati nei laboratori della polizia scientifica. I campioni sono stati analizzati con il metodo della gascromatografia seguita da una spettrometria di massa. Tracce di combustibile sono state trovate in tutti i campioni, ma nei campioni più vicini al luogo dell'incidente si è riscontrata una maggior concentrazione. Da questa analisi è certo che il combustibile si è propagato su tutta la superficie della zona in cui si sono sviluppate le fiamme nella fase iniziale dell'incendio. È quindi possibile concludere che lo sversamento del combustibile riscaldato è stato responsabile dell'innesco dell'incendio a livello stradale e che la propagazione del combustibile sulla pavimentazione ha contribuito alla propagazione dell'incendio.

La temperatura ambiente della galleria del San Gottardo rimane approssimativamente costante sui 20°C. Il combustibile contenuto nei serbatoi degli autocarri ha una temperatura di circa 25°C. Questa temperatura, è dovuta al ritorno di combustibile dal sistema di iniezione. Alla temperatura di 25°C la pressione di vapore del combustibile in aria è molto bassa, attorno al 2.5 mbar. Tuttavia, poiché il limite di infiammabilità è tra i 0.9% e 2.2%, significa che il combustibile è stato riscaldato molto prima di avere l'innesco. Questa affermazione è corroborata dal *flashpoint* dei combustibili liquidi, generalmente attorno agli 80-110°C. Da esperimenti svolti il *flashpoint* di combustibile è stato stabilito a 83.6°C. l'esperimento è stato svolto su 18 litri di combustibile svolto ai laboratori CSI, a Milano il 18 febbraio 2002. Nelle circostanze della galleria del San Gottardo, dove si avevano superfici di temperatura tra i 175 e 360°C, il combustibile ha volatilizzazione quasi immediatamente creando una atmosfera localizzata dove la percentuale di combustibile dell'aria è maggiore del limite di infiammabilità. Una volta innescata la combustione, si crea un ciclo per cui per via del calore sempre più combustibile viene volatilizzato.

Dalla perizia sui serbatoi degli autocarri e dallo studio del luogo dell'incidente è possibile dedurre l'origine dello sversamento. L'unico serbatoio dell'autocarro numero 1 e il serbatoio principale dell'autocarro 2 sono installati sulla parte destra inferiore della motrice. Si ipotizza che il combustibile sversato sulla pavimentazione stradale provenga dal serbatoio dell'autocarro numero 1. La quantità di combustibile nel

serbatoio è sconosciuta ma si ipotizza che il serbatoio non fosse pieno per via delle testimonianze. Se il serbatoio è parzialmente vuoto, sottoposto ad alte temperature, si innesca un aumento di temperatura che porta al serbatoio del serbatoio. In riferimento all'autocarro numero 1 non si sono riscontrate esplosioni, quindi si ipotizza che ci sia stata uno scioglimento o rottura del serbatoio che ha portato allo sversamento del combustibile. Per quanto concerne l'autocarro numero 2 non si riscontrano perdite in quanto il serbatoio principale era completamente vuoto (dalla testimonianza dell'autista). Inoltre si è certi che ci sia stata l'esplosione del serbatoio di riserva durante l'incendio.

In un veicolo stazionario vi sono due possibili sorgenti di energia che possono portare all'innescare di una miscela di vapori combustibili in aria: le superfici calde o le scintille prodotte da cortocircuito.

Dalle misure sperimentali svolte su turbocompressori e sistema di gas esausti di autocarri posti in viaggio sulla galleria del San Gottardo, appare che le temperature di queste parti di veicolo possono arrivare fino a 600°C. Generalmente i combustibili innescano spontaneamente alla temperatura prossima di 300°C, con piccole variazioni in riferimento alla qualità del combustibile. Questo significa, che alle temperature che erano presenti in galleria, l'innescare del combustibile potrebbe essere stato anche spontaneo, senza la necessità di una fiamma pilota o una scintilla. Dagli studi dei tecnici forensi si pensa che il turbocompressore e il sistema di scarico possano essersi comportati come superfici radianti ed aver vaporizzato i combustibili liquidi. In questa situazione si è potuta creare una miscela aria/gas combustibile di concentrazione all'interno del limite di infiammabilità.

Come visto l'innescare potrebbe essere dato anche da una scintilla elettrica. Bastano infatti pochi *millijoule* per un innescare una miscela di gas combustibili. Generalmente la scintilla è data dal cortocircuito, ovvero quando vi è il contatto tra conduttori a differente potenziale elettrico. Generalmente il fenomeno è permesso per ridottissimi intervalli di tempo. Infatti, in presenza di interruttori differenziali o altri dispositivi di sicurezza, il cortocircuito porta inevitabilmente all'arresto del sistema elettrico. Tuttavia nel caso di danneggiamento dei dispositivi di sicurezza la produzione di scintille e calore da cortocircuito viene permessa. In generale, i dispositivi elettrici nei veicoli sono alimentati dalla differenza di potenziale è creata dai due poli (positivo e negativo) della batteria dell'autoveicolo. Qualsiasi difetto di isolamento dei due poli nella batteria può portare al cortocircuito e possibili scintille.

Dalle perizie svolte sull'autocarro numero 1 si può osservare che il circuito elettrico principale e la batteria erano allocate nella parte destra del motore dell'autocarro. Esattamente nella zona di collisione ed impatto durante l'incidente. Tracce significative di fusione elettrica sono state riscontrate nella zona di alimentazione. Questa è una prova della presenza di scintille da cortocircuito. Il cortocircuito può essere dato, in questo caso, solo dal danneggiamento del sistema di isolamento interno della batteria e dall'assenza di sistemi di protezione elettrica, in questo tipo di autocarro. Come si può osservare nelle immagini di sotto riportate, i danni sono significativi di un cortocircuito durato a lungo sino all'esaurimento della energia interna alla batteria.



Figura 49 Immagine rappresentativa dell'entità dei danni dovuti al cortocircuito della batteria nell'autocarro numero 1

Dalle perizie svolte, e presentate sino ad ora in questa sede, segue che vi possono essere stati due possibili fenomeni di innesco. In primis le superfici radianti delle parti più calde della motrice, ovvero il compressore e il sistema di scarico dei gas esausti. In secondo luogo le scintille prodotte dal cortocircuito della batteria. Fisicamente entrambi i fenomeni possono aver dato l'innesco, tuttavia statisticamente, l'ipotesi di innesco di tipo elettrico è maggiormente plausibile. Per questo motivo i periti forensi sono più inclini verso questa ipotesi.

Per quanto concerne l'esplosione percepita dalle squadre antincendio, si attribuisce il fenomeno all'esplosione degli pneumatici del veicolo e del serbatoio principale dell'autocarro numero 2 (si ricorda che il serbatoio principale era vuoto). In entrambi i casi l'esplosione è data dall'incremento di pressione dovuto alla temperatura con conseguente rilascio improvviso di energia, sia per quanto concerne i pneumatici (mescola di diversi tipi di gomma vulcanizzata e rinforzo in fibre d'acciaio) che il serbatoio.

2.3.8 Propagazione da autocarro numero 1 ad autocarro numero 2

Durante le prime fasi di innesco dell'incendio sulla pavimentazione stradale, le fiamme hanno raggiunto i pneumatici sia dell'autocarro numero 1 che l'autocarro numero 2. Soggetti ad alte temperature i pneumatici degradano molto velocemente. Esperimenti svolti su autocarri hanno rilevato che raggiunto la temperatura di *flashpoint* del carburante sversato (84°C), dopo *90 secondi*, i gas emessi dagli pneumatici hanno innescato un incendio che ha propagato velocemente coinvolgendo tutto il veicolo. In pochi minuti le fiamme hanno raggiunto l'altezza di *2.5 metri* producendo una enorme quantità di fumi. Dopo *5 minuti*, la temperatura raggiunta ai pneumatici era di 1200°C . L'aumento delle fiamme alle gomme ha portato la propagazione delle fiamme anche all'interno della cabina della motrice. Si stima che lo sviluppo delle fiamme all'interno della motrice sia avvenuto *4-5 minuti* dall'innesco dell'incendio.

Nell'autocarro numero 1 il carico era posizionato in maniera compatta all'interno del rimorchio, il che ha rallentato la diffusione dell'incendio dalla motrice al carico, per via del ridotto apporto di ossigeno. Nonostante questo, dopo pochi minuti le fiamme si sono propagate dalla parte anteriore del rimorchio.

Per l'autocarro numero 2 invece gli pneumatici erano accumulati semplicemente nel rimorchio e telonati. La propagazione dell'incendio è avvenuta rapidamente ed in pochi secondi ha coinvolto il carico e l'intero autocarro. Le fiamme si sono sviluppate dalla base del rimorchio fino alla calotta della galleria. L'autocarro è stato completamente bruciato.

2.3.9 Propagazione dell'incendio agli autocarri numero 3, 4, 5, 6 e 7

La parte posteriore dell'autocarro numero 1 era parzialmente protetta dagli sforzi fatti dalle squadre antincendio provenienti da Airolo. Il rimorchio dell'autocarro numero 7 non è stato distrutto dall'incendio grazie agli sforzi dalle squadre antincendio provenienti di Goschenen che sono riusciti a contenere ed estinguere l'incendio, che invece ha distrutto la motrice.

L'incendio che coinvolgeva gli autocarri numero 1 e numero 2, a causa della presenza della calotta, è stato deflesso e sospinto dalla ventilazione in direzione del veicolo numero 3. La distanza era tale da non permettere una propagazione diretta delle fiamme, tuttavia i processi di convezione ed irraggiamento hanno fornito il calore necessario per l'innesco dell'incendio che poi coinvolgerà i veicoli 3, 4, 5, 6 e 7. Il meccanismo convettivo ed irraggiamento ha fatto sì che si propagasse l'incendio a partire dalla parte posteriore del rimorchio dell'autocarro numero 2 alla parte anteriore della motrice dell'autocarro numero 3, per una distanza di circa *30 metri*. Anche la successiva propagazione nei successivi mezzi ha seguito i processi descritti fino ad ora. La distanza maggiore, ovvero quella tra la parte posteriore del rimorchio dell'autocarro numero 3 alla parte anteriore della motrice dell'autocarro numero 4, è di *48 metri*. La propagazione, laddove non è

venuta in maniera diretta è avvenuta mediante il trasferimento di calore tramite convezione ed irraggiamento.

2.3.10 La degradazione termica dei veicoli dietro l'autocarro numero 7

Nei 110 metri posteriori all'autocarro numero 7, un numero di veicoli è stato coinvolto dal calore dell'incendio, ma nonostante ciò nessun veicolo prese fuoco. Nove veicoli, numerati da 8 a 16, sono stati esposti a gas caldi, fumi, ceneri e irraggiamento provenienti dai primi sette veicoli e che si propagavano in direzione nord. Alcuni veicoli, nella parte di carrozzeria esposta a sud, hanno riportato segni di degradazione termica di gomme e parti plastica a causa del raggiungimento della temperatura di rammollimento. Il motivo della mancata propagazione dell'incendio nei veicoli citati è dovuto all'intervento delle squadre antincendio. Le squadre antincendio provenienti da Goschenen, cercando di estinguere l'incendio nella parte posteriore dell'autocarro numero 7 hanno limitato la propagazione di calore verso gli altri veicoli. L'intervento delle squadre di emergenza ha quindi prevenuto la propagazione dell'incendio nonostante non abbia estinto l'incendio.

Tra i *110 metri* e i *1750 metri* dal punto dell'incidente, vi erano sette veicoli numerati da 17 a 23. Questi veicoli, coperti di ceneri, non hanno subito nessun danno. Tuttavia, l'autista dell'autocarro numero 21 è stato ritrovato deceduto nella cabina del veicolo. Dalle prove emerge, che dopo l'incidente abbia comunicato con la propria impresa per via telefonica prima di soccombere a causa dei gas tossici contenuti nei fumi.

3 Dinamica degli incendi in galleria

3.1 Introduzione

Incendi di tipo catastrofico hanno messo in luce la necessità di studiare in maniera dettagliata la dinamica degli incendi; in particolare studiare l'influenza della ventilazione nel tasso di rilascio di calore nel tempo (*HRR Heat Release Rate*) e di come si sviluppano gli incendi e i fumi all'interno della galleria. Il punto di partenza per questi studi sono state le ricerche, già svolte ampiamente in passato, degli incendi compartimentati: ovvero quegli incendi in ambiente chiuso (come ad esempio un edificio). La maggior parte dello studio si prefigge come obiettivo la comprensione dei fenomeni di dispersione dei fumi e gli effetti locali dell'incendio in un singolo veicolo.

Nel tempo sono stati svolti pochi studi sperimentali in relazione allo studio di questi fenomeni, in particolare alla propagazione degli incendi tra veicoli. Molte conoscenze derivano quindi da incendi compartimentati e da backanalysis di grandi incendi avvenuti in gallerie e miniere.

Si vedranno in seguito le similitudini con gli incendi compartimentati e si vedranno metodi per il calcolo analitico della temperatura dei gas, stratificazione dei gas, lunghezza di fiamma, il flusso radiativo e la propagazione degli incendi tra i veicoli.

3.2 Incendi in galleria e a cielo aperto

Gli incendi in galleria differiscono dagli incendi a cielo aperto per due motivi principali. Prima di tutto, gli effetti del calore prodotto sono maggiori in galleria a causa del confinamento. Vi è una sorta di conservazione dell'energia termica. Questo porta che un veicolo che per determinati motivi non brucia intensamente all'esterno può bruciare vigorosamente all'interno della galleria. Per esempio, (Carvel, Beard, & Jowitt, 2001) ha concluso che il *HRR* all'interno di una galleria può essere fino a 4 volte superiore per lo stesso materiale rispetto allo all'esterno. Oltretutto in galleria vi può essere una mancanza di ossigeno rispetto agli incendi a cielo aperto. Gli incendi in galleria possono svilupparsi come controllati dal combustibile se parte dell'ossigeno non reagisce completamente oppure controllati dal comburente quando l'apporto di aria non è sufficiente alla completa combustione. Nell'ultimo caso vengono prodotti fumi tossici (monossido di carbonio) e prodotti di non completa combustione.

In secondo luogo, l'incendio interagisce con la ventilazione producendo un disturbo aereodinamico nel flusso di aria. Questo può portare una modifica nello schema aereodinamico innescando flussi indesiderati come il flusso controcorrente di gas caldi e fumi (backlayering) dall'incendio verso la direzione di flusso di ventilazione. Questo può portare alla veloce propagazione di gas caldi e fumi in tutta la galleria complicando le attività svolte dai Vigili del Fuoco.

3.3 Incendi in galleria e incendi compartimentati

Gli incendi in galleria differiscono da quelli compartimentati negli edifici in tre modi principali. Prima di tutto, il massimo *HRR* degli incendi compartimentati solitamente è dettata dalla ventilazione naturale (come ad esempio il fattore di ventilazione $A_0 h_0^{1/2}$ ($m^{5/2}$) dove A_0 è la superficie delle aperture in m^2 e $h_0^{1/2}$ l'altezza delle aperture in m (Drysdale, 2011). Nelle gallerie, tuttavia, la dimensioni degli incendi, la pendenza, il profilo della galleria, la lunghezza, tipologia di galleria (calcestruzzo, roccia naturale), condizioni meteorologiche ai portali sono i parametri che governano la ventilazione naturale e non bastano solo le aperture. Le gallerie lavorano più o meno come dei vasi comunicanti ed un eccesso d'aria disponibile per la combustione è di un ordine superiore rispetto agli incendi compartimentati. L'influenza poi della ventilazione (naturale o forzata) è significativamente differente negli incendi in galleria (Hartman & H., 2006). Le gallerie sono inoltre spesso

dotate di ventilazione meccanica forzata come ventilazione esausta e ventilazione a turbina sul tetto della galleria. L'influenza della ventilazione sulla efficienza della combustione e sul HRR in galleria è differente.

In secondo luogo. Gli incendi compartimentati si sviluppano velocemente a *flashover* in pochi minuti (*flashover* è definito come la rapida transizione ad uno stato di totale superficie coinvolta nell'incendio di un materiale). Inoltre, il *flashover* raramente può avvenire all'esterno di un compartimento. Nonostante il *flashover* difficilmente può avvenire nell'ambiente interno della galleria (per via delle perdite di calore attraverso le pareti di quest'ultima), il *flashover* avviene frequentemente all'interno di veicoli come compartimenti di treni o cabine di autocarri. Oltre a ciò, il rischio di un'esplosione dovuta a gas secondari per via dei incendi sotto ventilati (controllati dalla presenza di comburente), è molto più basso nelle gallerie rispetto agli incendi compartimentati. Questo è dovuto alle differenze nella ventilazione e alle perdite di calore nelle gallerie.

Quando un potente sistema di ventilazione è attivato durante una condizione sotto ventilata le conseguenze possono essere drammatiche. Le fiamme possono improvvisamente aumentare in direzione e lunghezza e l'incendio si può facilmente propagare verso altri veicoli (già preriscaldati) nella direzione del flusso di ventilazione. Tuttavia questo fenomeno non è identificabile come *flashover*. Questa situazione può essere molto pericolosa per i Vigili del Fuoco e per le persone intrappolate all'interno della galleria. L'avviamento del sistema di ventilazione successivamente all'innescio dell'incendio ed in presenza di un'alta densità di veicoli può essere estremamente rischioso e deve essere assolutamente evitato. Ultimo ma non meno importante, la formazione dello strato di fumi differisce. Nelle prime fasi degli incendi compartimentati si forma uno strato di fumi che galleggia sopra di uno strato privo di fumi. Uno strato simile si forma nelle gallerie nelle prime fasi dell'incendio in assenza di ventilazione longitudinale. Tuttavia gradualmente, a distanza dell'incendio, la nuvola di fumi discende verso il basso. Se la galleria è molto lunga la nuvola di fumo può discendere verso la superficie inferiore della galleria. La distanza alla quale avviene questo fenomeno dipende da:

- Dimensione dell'incendio;
- Tipologia di galleria (pareti in calcestruzzo o roccia naturale);
- Perimetro della sezione;
- Altezza della sezione.

Quando la ventilazione longitudinale è gradualmente aumentata la stratificazione dei fumi gradualmente si dissolve. Si crea un backlayering dei fumi a monte dell'incendio rispetto al flusso di ventilazione. La stratificazione a valle della direzione di flusso è invece controllata dalle perdite di calore e dal miscelamento turbolento tra i leggeri strati di fumo e i freddi flussi di ventilazione provenienti in direzione opposta. Il gruppo adimensionale che determina la stratificazione di uno strato sopra un altro è il numero di *Richardson (Ri)* che controlla il trasferimento di massa tra strati.

3.4 Sviluppo dell'incendio

Lo sviluppo di un incendio compartimentato si divide in tre fasi separate (Drysedale, 2011):

- *Pre-flashover*;
- *Post-flashover*;
- Decadimento

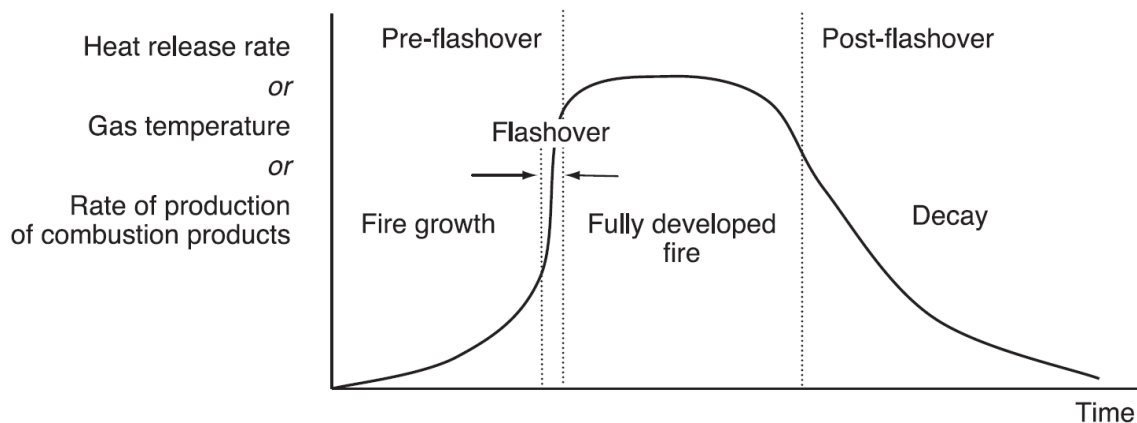


Figura 50 Fasi di sviluppo di un incendio (Carvel & Beard, 2005)

Nel primo periodo avviene la fase di crescita, nella seconda fase si ha il pieno sviluppo e il decadimento è l'ultima fase dell'incendio. Nella fase di crescita, l'incendio in un compartimento, ha sufficiente ossigeno per la combustione e l'incendio è dettato completamente dall'inflammabilità e geometria del combustibile e l'incendio viene definito come controllato dal combustibile. Durante la fase di crescita, l'incendio continuerà a crescere anche oltre al punto in cui l'interazione con le pareti di compartimentazione diventeranno significative (*flashover*). L'incendio inizierà la fase di decadimento se vi sarà mancanza di combustibile o incomincerà ad essere controllato dalla ventilazione se la dimensione dell'incendio è dettata dall'apporto di aria nuova alla base della fiamma.

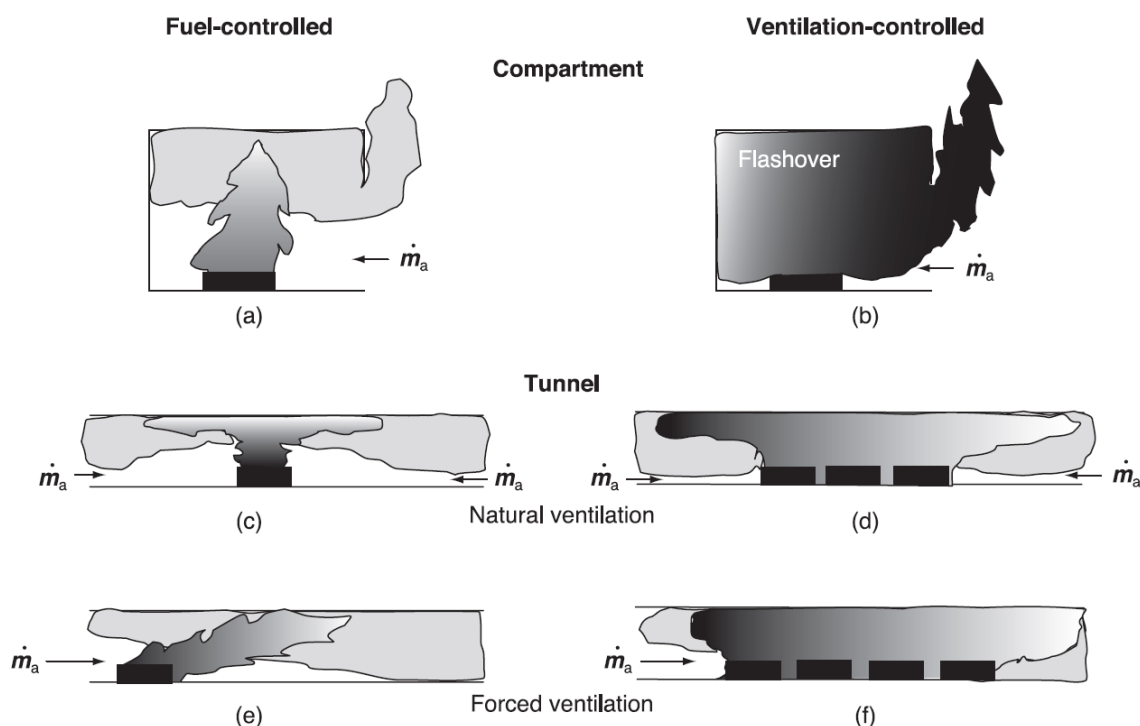


Figura 51 (a) Schema di incendio controllato dal combustibile (b) incendio controllato dalla ventilazione in una situazione compartimentata (c) e (d) galleria naturalmente ventilata (e) e (f) effetti della ventilazione forzata (Carvel & Beard, 2005)

Gli incendi in galleria generalmente si ha una situazione di controllo dettato dall'apporto di combustibile mentre nei gravi incidenti che coinvolgono molteplici veicoli (come quello avvenuto nel 1999 nella galleria del Monte Bianco) si ha un incendio controllato dall'apporto di comburente (ventilazione).

Se la base della fiamma è totalmente circondata di aria viziata l'incendio si può autoestinguere. L'aria viziata, una miscela di ossigeno e prodotti di combustione, deve contenere un livello di ossigeno inferiore al 13% per far sì che l'incendio si autoestingua. Tuttavia questo valore può essere influenzato largamente dalla temperatura (Beyler, Flammability limits of premixed and diffusion flames, 1995) (Quintiere & Rangwala, 2003). L'aumento della temperatura tende ad abbassare il limite di infiammabilità.

In un incendio compartimentato se qualcuno apre una porta, appena prima che l'incendio si autoestingua, l'intero compartimento può venire pervaso da fiamme se nuova aria è trascinata verso la sorgente calda e si miscela con i gas prodotti dal combustibile che non ancora coinvolti in combustione. Questo fenomeno è conosciuto come "*backdraught*" è estremamente pericoloso per i Vigili del Fuoco. Nelle gallerie questo fenomeno può accadere all'interno dei veicoli (compartimenti di treni e autocarri). Avviare la ventilazione longitudinale quando l'incendio è già innescato può essere estremamente pericoloso per via dell'alta produzione di prodotti volatili derivati dal combustibile sotto condizione quando il combustibile e le superfici circostanti sono molto calde. Quando l'ossigeno (aria) è immediatamente trasportato verso la zona in cui sono presenti questi prodotti aeriformi si crea un ottimo miscelamento tra combustibile e comburente e le fiamme si sviluppano drammaticamente in dimensione.

Negli incendi in galleria con un alto grado di *backlayering* (per esempio le gallerie a ventilazione naturale), il flusso controcorrente di aria verso l'incendio può contenere aria molto viziata (miscela di prodotti di combustione ed aria di ventilazione) che può influenzare l'efficienza della combustione. Le correnti di aria pulita che fluiscono sulla superficie inferiore della galleria alimentano e sostengono l'incendio con sufficiente apporto di ossigeno. Quindi la possibilità che l'incendio si autoestingua in galleria per via dell'aria viziata è particolarmente remota.

3.4.1 Flashover

I parametri che governano lo sviluppo e la propagazione dell'incendio includono il carico di incendio, dimensione del compartimento e le aperture per la ventilazione oltre le proprietà termiche delle pareti circostanti. Il *flashover* in un compartimento viene associato ad una instabilità termica causata da un tasso di generazione di energia crescente dettato da un contributo favorevole della temperatura decisamente maggiore rispetto al contributo resistente delle perdite di calore (Thomas, Bullen, Quintiere, & McCaffrey, 1980).

$$\dot{Q}_{gen} \gg \dot{Q}_{lost}$$

Questo porta ad una esponenziale generazione di calore. Solitamente questo fenomeno avviene in un breve periodo con un conseguente rapido aumento di HRR, temperature di gas e produzione di prodotti di combustione. Dopo il *flashover*, il tasso di generazione di calore HRR porterà a temperature di 900-1100°C. La fase successiva al *flashover* è conosciuta come *post-flashover*. Durante questa fase il HRR è controllato dal flusso di ossigeno dalle aperture e l'incendio viene detto controllato dalla ventilazione. Il HRR è funzione dalla quantità di aria disponibile nel compartimento. Il flusso di massa d'aria dalle aperture può essere espresso come:

$$\dot{m}_a = \rho_a \delta \sqrt{g} A_0 \sqrt{h_0}$$

Dove δ è una costante di proporzionalità che una funzione "*debole*" della temperatura T , A_0 è l'area delle aperture in m^2 e h_0 è l'altezza delle aperture in m. Il valore di δ è stato stimato come 0.08 nella fase *pre-flashover* degli incendi e 0.13 per la fase *post-flashover* (Tewarson, Fully developed enclosure fires of wood cribs, 1984).

$$\delta = \tilde{f}(T)$$

	δ
pre-flashover	0.08
post-flashover	0.13

Tabella 11 Valori del parametro δ nelle due fasi dell'incendio

Il valore di $\rho_a \delta \sqrt{g}$ è pari a 0.3 (kg/s m^{-5/2}) nella fase di *pre-flashover* (controllata dal combustibile) e 0.5 (kg/s m^{-5/2}) nella fase di *post-flashover* (controllata dalla ventilazione) assumendo una densità, ρ_a , pari a 1.22 kg/m³ e g pari a 9.81 m/s².

	$\rho_a \delta \sqrt{g}$	U.M.
pre-flashover	0,3	kg/s m ^{-5/2}
post-flashover	0,5	kg/s m ^{-5/2}

Tabella 12 Valore del parametro $\rho_a \delta \sqrt{g}$ nelle due fasi dell'incendio

Il termine $A_0 \sqrt{h_0}$ è conosciuto anche come fattore di ventilazione e può essere ricavato dall'applicazione dall'equazione di Bernoulli applicata al flusso attraverso una singola apertura (Drysdale, 2011). Non è consigliabile usare il fattore di ventilazione nel calcolo del flusso di massico d'aria nelle gallerie. Si deve ricorrere ad altri metodi per la stima di $\dot{m}_a$. Il metodo più semplice è utilizzare l'equazione di Bernoulli per il flusso lungo un tubo nota la velocità di flusso media naturale u come nell'equazione sottostante:

$$u = \sqrt{\frac{2g \Delta h \left(1 - \frac{T_a}{\bar{T}}\right)}{\frac{\bar{T}}{T_a} + K_1 + \frac{f_D}{D_h} \left[L + L_S \left(\frac{\bar{T}}{T_a} - 1\right)\right]}}$$

Dove Δh è l'altezza dello strato di fumi caldi in metri, $\bar{T}$ la temperatura media dei fumi caldi (in Kelvin) lungo l'altezza dello strato Δh , T_a è la temperatura ambiente (generalmente 293°K), L_S la lunghezza della galleria esposta ai fumi caldi, f_D il parametro di definizione delle perdite di carico, D_h il diametro idraulico della galleria in metri, K_1 il coefficiente di perdita all'imbocco pari a 0.5. Se l'intera galleria è riempita di gas caldi, $\Delta h = \theta L/100$; dove θ è la pendenza della galleria espressa in percentuale. La trattazione più precisa di questa equazione verrà fatta in seguito.

Nota la velocità media di flusso u è facile ricavare il flusso massico $\dot{m}_a$:

$$\dot{m}_a = u A \rho_a$$

Dove A è la sezione della galleria.

Assumendo che ogni kilogrammo di ossigeno usato nella combustione produca 13.1 10³kJ (Parker, 1984) (Huggett, 1980) e che la frazione massica di ossigeno nell'aria sia 0.231, si può stimare il massimo HRR che si può avere in un incendio compartimentati durante la fase controllata dalla ventilazione.

$$HRR_{max} = Q_{max} (kW) = 13.1 \cdot 10^3 kJ \cdot 0.231 \cdot \dot{m}_a$$

Utilizzando l'equazione ricavata precedentemente:

$$\dot{m}_a = \rho_a \delta \sqrt{g} A_0 \sqrt{h_0}$$

$$Q_{max} (kW) = 13.1 \cdot 10^3 kJ \cdot 0.231 \cdot \rho_a \delta \sqrt{g} A_0 \sqrt{h_0}$$

Come visto precedentemente, in caso di incendio compartimentato, nella fase controllata dalla ventilazione (*post-flashover*) $\rho_a \delta \sqrt{g} = 0.5 (\text{kg/s m}^{-5/2})$. Segue quindi che il tasso di flusso di calore può essere stimato come:

$$Q_{max} (kW) \approx 1500 A_0 \sqrt{h_0}$$

In questo caso, si ipotizza che tutto l'ossigeno entrato nel compartimento sia consumato durante la combustione interna al compartimento. In molti casi il flusso d'aria entrante nel compartimento non è sufficiente per una completa combustione di tutti i gas volatili prodotti dal combustibile. In questi casi, questi gas, fluiscono insieme ai prodotti di combustione verso l'esterno del compartimento. Questo fenomeno produce delle fiammate esterne attraverso le aperture (Drysdale, 2011).



Figura 52 Propagazione di un incendio attraverso fiammate esterne nel grattacielo Neo-Soho a Jakarta (2016) (Reprinted with permission from MDM Publishing Ltd: Asia Pacific Fire Magazine April 2017 Issue 61)

Nel nostro caso questo fenomeno diventa importante quando si vuole stimare la massima HRR in fase di *post-flashover* di un incendio interno ad un compartimento, come può essere un autocarro, all'interno di una galleria. L'equazione proposta precedentemente in questo caso sottostima la massima HRR perché considera che i gas volatili prodotti vengano bruciati esternamente. Tuttavia nel caso interno di una galleria questi gas, anche se esternamente al compartimento, verranno bruciati sempre all'interno della galleria. Da alcune prove sperimentali è stato dimostrato che il HRR massimo interno alla galleria è del 67% superiore rispetto a quello presentato precedentemente (Ingason & Bobert, Fire Development in a Train Coach using Model Scale Test, 2004). Questo significa che circa il 40% di tutto il combustibile volatilizzato all'interno del compartimento viene bruciato esternamente alle aperture. Bullen e Thomas (Bullen & Thomas, 1979) hanno mostrato come quella quantità che viene bruciata esternamente dipende dal fattore di ventilazione $A_0 \sqrt{h_0}$. Assumendo tuttavia che il parametro $A_0 \sqrt{h_0}$ rimanga pressoché costante per tutte le tipologie di compartimenti interni alle gallerie stradali, si può stimare rapidamente il massimo HRR in post-flash over interna alla galleria a partire dal massimo HRR calcolato per il compartimento:

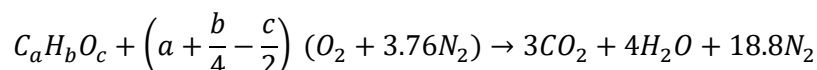
$$HRR_{max,galleria} = 1.67 \cdot HRR_{max,compartimento}$$

3.5 Gli incendi controllati dal combustibile e quelli controllati dalla ventilazione

La ventilazione è uno degli elementi chiave nella sicurezza antincendio nelle gallerie. Di grande importanza risulta comprendere la differenza tra la combustione tra le due tipologie di combustione, quelle controllate dal combustibile e quelle controllate dalla ventilazione (apporto di comburente). Gli incidenti più gravi nelle gallerie avvenuti hanno portato la nascita l'esigenza di conoscere gli incendi controllati dalla ventilazione nelle gallerie.

Le fasi controllate dal combustibile sono quelle di decadimento e di *pre-flashover*. Le fasi controllate dal combustibile implicano che l'ossigeno è in una disponibilità illimitata e che il tasso di combustione è indipendente dall'apporto di ossigeno e determinato dall'apporto di combustibile (flusso massico di combustibile vaporizzato). Il comportamento della combustione è simile alla combustione a cielo aperto.

La fase controllata dalla ventilazione invece è ottenuta durante il *post-flashover*. In contrasto con quanto visto nelle fasi controllate dalla combustione, qui l'apporto di ossigeno è limitato e il tasso di combustione è determinato sia dal flusso di aria non viziata che dall'apporto di combustibile. L'efficienza della combustione è determinata dall'apporto di combustibile relativo all'apporto di ossigeno. Quando la quantità di ossigeno necessaria è fornita per completare la combustione si dice che la miscela è *stechiometrica*. Nel caso di combustione di un generico combustibile ($C_aH_bO_c$) in aria la reazione chimica stechiometrica è:



Dove 3.76 è il rapporto tra moli di ossigeno e moli di azoto nell'aria. Si introduce il coefficiente stechiometrico, r , che definisce il rapporto tra le masse d'aria e combustibile necessarie per la combustione stechiometrica del combustibile al fine di produrre anidride carbonica ed acqua. Il coefficiente r è ottenibile con la seguente equazione:

$$r = \frac{137.8 \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)}{12a + b + 16c}$$

Dove 137,8 è il peso dell'aria in grammi per 4.76moli. Il valore di r indica in maniera semplice la massa di aria necessaria (misurata in kilogrammi) per un kilogrammo di un determinato combustibile. Se ad esempio, per un generico combustibile, $r = 10$, significa che sono necessari 10kg di aria per 1kg di quel combustibile.

Vi sono molti modi per caratterizzare la relazione tra apporto di aria (ossigeno) ed apporto di combustibile. Un modo è quello attraverso il rapporto di equivalenza aria-combustibile ϕ (Tewarson, Generation of heat an chemical compounds in fires, 1988):

$$\phi = \frac{\dot{m}_a}{r \dot{m}_f}$$

Dove $\dot{m}_a$ è il flusso massico di aria, $\dot{m}_f$ il flusso massico di combustibile e r il coefficiente stechiometrico di completa combustione. Determinato il valore ϕ è possibile individuare se si tratta di un incendio controllato dall'apporto di combustibile o dall'apporto di comburente (aria). Infatti nel caso di $\phi \geq 1$ siamo nel caso di incendio controllato dall'apporto di combustibile mentre per $\phi < 1$ l'incendio è controllato dall'apporto di aria.

ϕ	CONDIZIONE
$\phi \geq 1$	Combustione controllata dall'apporto di combustibile
$\phi < 1$	Combustione controllata dall'apporto di aria

Tabella 13 Tipologie di combustione in funzione del valore del rapporto di equivalenza aria-combustibile ϕ

3.5.1 Combustione controllata dall'apporto di combustibile

Nel caso $\phi < 1$ siamo in una situazione dove la combustione è controllata dall'apporto di combustibile. Segue quindi che il HRR è direttamente proporzionale al flusso massico di combustibile $\dot{m}_f$. In questo caso la concentrazione di ossigeno presente nei gas esausti è maggiore di zero. Il HRR chimico, direttamente proporzionale al flusso massico di combustibile $\dot{m}_f$ (kg/s), può essere calcolato come:

$$Q = \dot{m}_f \chi H_T$$

Dove H_T è il calore netto di completa combustione (kJ/kg). Negli incendi la combustione non è mai completa, e l'effettivo calore di combustione H_{ec} è sempre minore di H_T . Il rapporto tra i due viene definito come:

$$\chi = \frac{H_{ec}}{H_T}$$

e rappresenta il grado di efficienza della combustione tanto più è vicino all'unità (Tewarson, Generation of heat an chemical compounds in fires, 1988). Definito il flusso massico di combustibile espresso per unità di superficie di combustibile (A_f), $\dot{m}_f''$, si può sostituire $\dot{m}_f$ con $\dot{m}_f'' A_f$ e poi ricavare il HRR per unità di superficie di combustibile definito come:

$$Q = \dot{m}_f'' A_f \chi H_T$$

$$\frac{dQ}{dA_f} = \dot{m}_f'' \chi H_T$$

3.5.2 Combustione controllata dalla ventilazione

In caso $\phi < 1$, l'incendio è definito come controllato dalla ventilazione e il HRR è direttamente proporzionale al flusso massico di aria, $\dot{m}_a$ disponibile per la combustione. In questa condizione, la concentrazione di ossigeno nei gas esausti è nulla. Un modo per il calcolo del HRR è assumere che la completa combustione e che quindi tutto l'aria $\dot{m}_a$ sia consumata. In questo caso:

$$Q = \dot{m}_a \frac{H_T}{r}$$

Dove il rapporto H_T/r è pari a circa 3000kJ/kg di aria consumata per la maggior parte dei materiali a base di carbonio (Huggett, 1980). Se tutto l'ossigeno viene consumato durante l'incendio l'energia sviluppata corrisponde a $13.1 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$, assumendo una concentrazione di ossigeno pari a 23.1% nell'aria:

$$13.1 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3000 / 0.231 \text{ kJ/kg}$$

3.5.3 Determinazione della tipologia di combustione

Allo scopo di semplificare la verifica della tipologia di combustione si combinano le equazioni viste al fine di ricavare il rapporto di equivalenza aria-combustibile ϕ :

$$\phi = 3000 \frac{\dot{m}_a}{Q}$$

Se tutta l'aria viene consumata durante la combustione allora

$$\dot{m}_a = \frac{Q}{3000}$$

Quindi $\phi = 1$. Potrebbe essere di interesse conoscere quanto ossigeno è stato consumato durante la combustione. In questo caso, assumendo una combustione stechiometrica, si può ricavare la frazione di ossigeno che non reagisce con le fiamme attraverso la seguente relazione:

$$\beta = \frac{\dot{m}_a - \frac{Q}{3000}}{\dot{m}_a}$$

In questo caso la quantità d'aria consumata è definita dal rapporto $\frac{Q}{3000}$ mentre $\dot{m}_a$ indica la quantità d'aria totale. Definita la quantità di aria consumata come $\dot{m}_a^*$ si può riscrivere la relazione come:

$$\beta = \frac{\dot{m}_a - \dot{m}_a^*}{\dot{m}_a} = 1 - \frac{\dot{m}_a^*}{\dot{m}_a}$$

Il parametro β definisce la frazione di ossigeno ancora disponibile nei gas esausti.

Quando la concentrazione di ossigeno diventa nulla, ad una certa distanza a valle dell'incendio e in condizione di ventilazione forzata, l'incendio incomincia gradualmente a cambiare da controllato dall'apporto di combustibile a controllato dalla ventilazione. Una buona indicazione del fenomeno è quando il rapporto tra flusso massico di monossido di carbonio $\dot{m}_{CO}$ e il flusso massico di anidride carbonica $\dot{m}_{CO_2}$ incomincia a crescere considerabilmente. I lavori di (Tewarson, Generation of heat and chemical compounds in fires, 1988) presentano una correlazione tra il rapporto di flusso massico di monossido di carbonio e anidride carbonica e ϕ nel caso di un compartimento contenente legno. In questo caso l'incendio passa a controllato da ventilazione nel caso in cui:

$$\frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_{CO_2}} > 0.036$$

Mentre le fiamme dovute a diffusione di propano e propilene diventano controllate dalla ventilazione quando:

$$\frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_{CO_2}} > 0.1$$

Il rapporto è quindi un indicatore delle condizioni di combustione negli incendi in galleria.

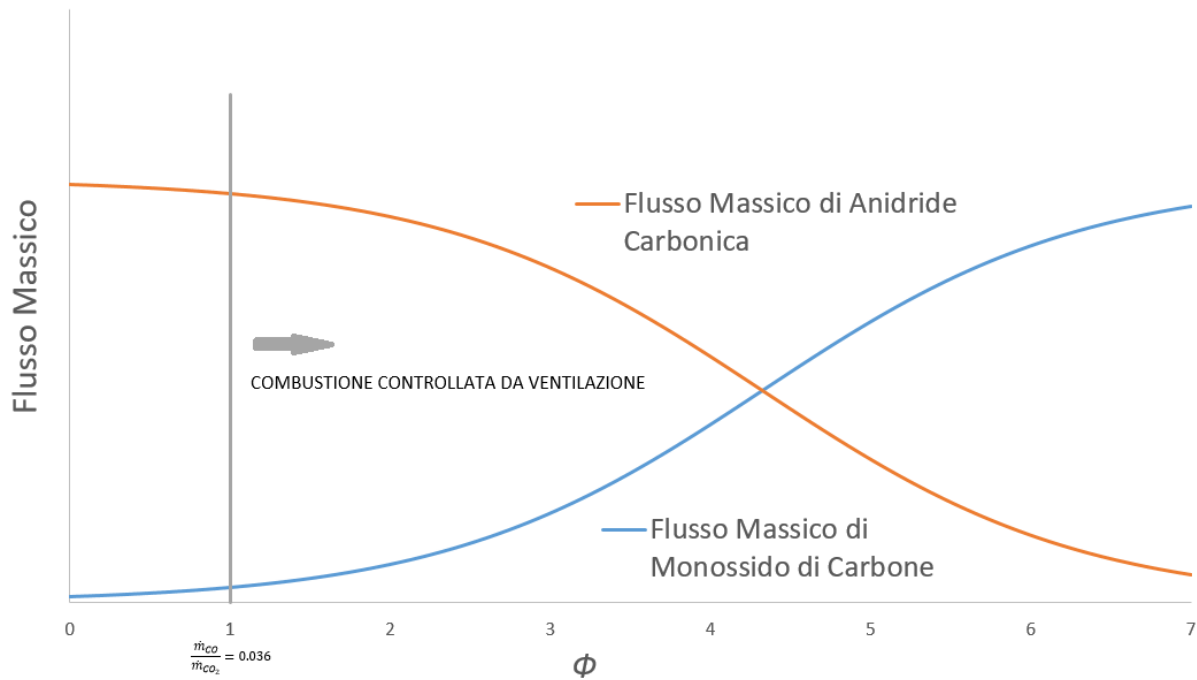


Figura 53 Andamento qualitativo dei flussi massici in funzione del parametro e dominio del regime di combustione

Il rapporto può essere espresso come:

$$\frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_{CO_2}} = \frac{M_{CO} X_{CO}}{M_{CO_2} X_{CO_2}} = 0.636 \frac{X_{CO}}{X_{CO_2}}$$

Dove X è la frazione molare ed M massa molecolare. Definite le quantità precedenti si ricava che in un compartimento contenente legno l'incendio passa a controllato da ventilazione nel caso in cui:

$$\frac{X_{CO}}{X_{CO_2}} > 0.057$$

Mentre le fiamme dovute a diffusione di propano e propilene diventano controllate dalla ventilazione quando:

$$\frac{X_{CO}}{X_{CO_2}} > 0.157$$

3.6 La stratificazione dei fumi in galleria

In questa sezione verranno discussi gli incendi controllati da combustibile in cui fumi si stratificano. La stratificazione dei fumi è importante per l'evacuazione della galleria. Le caratteristiche di diffusione dei fumi sono largamente dipendenti dalla velocità dell'aria all'interno della galleria. Si identificano tre intervalli di velocità di aria all'interno della galleria:

- (1) Velocità d'aria bassa o assente (0-1m/s)
- (2) Velocità d'aria moderata (1-3m/s)
- (3) Velocità d'aria alta (>3m/s)

Nel primo caso (1) la stratificazione dei fumi è generalmente alta in prossimità all'origine dell'incendio. In questo gruppo generalmente abbiamo una ventilazione naturale. The *backlayering* si propaga per lunghe distanze e spesso lo sviluppo della nuvola di fumo avviene in alcuni casi quasi in maniera simmetrica in

entrambe le direzioni. Nel caso in cui la velocità sia prossima ad 1m/s si ha un *backlayering* pari a circa 17 volte l'altezza della galleria. La correlazione tra il *backlayering* e la distanza in galleria, L_b , è ottenuto dal lavoro sviluppato da (Thomas, Movement of Buoyant Fluid against a Stream and the Venting of Underground Fires, 1958) (Thomas, The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against an Air Flow, 1968):

$$\frac{L_b}{H} \propto \left(\frac{g Q}{\rho_a c_p T_a u^3 H} \right)^{1/3}$$

Dove c_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante (kJ/kg K), T_a la temperatura ambiente (293°K). L'unica dimensionale della galleria è l'altezza. Non vengono considerati altri parametri geometrici. La costante di proporzionalità è stata studiata sperimentalmente. La conclusione dei lavori sperimentali di (Vantelon, Quach, Son, Gabay, & Dallest, 1991) (Guelzim, et al., 1994) (Oka & Atkinson, 1995) (Saito, et al., 1995) è stata quella di ricavare un intervallo di validità del coefficiente di proporzionalità. Il suddetto coefficiente è stimato essere all'interno dell'intervallo:

$$0.6 \leq K \leq 2.2$$

A causa della grande variabilità si assume solitamente un valore medio di:

$$K \approx 1.4$$

Segue quindi che l'equazione vista precedentemente diventa:

$$\frac{L_b}{H} \approx 1.4 \left(\frac{g Q}{\rho_a c_p T_a u^3 H} \right)^{1/3}$$

Questa relazione non deve essere in condizione di velocità inferiori a 0.5m/s o più alte di 3m/s (considerata la velocità critica). Si deve anche considerare che questa è una equazione che restituisce un valore suscettibile ad errori grossolani a causa delle semplificazioni adottate. Inoltre, per esempio non vengono considerate né forma né geometria della sezione della galleria e nemmeno pendenza.

Nel secondo intervallo (2) di flusso moderato, in vicinanza dell'incendio, la stratificazione è fortemente influenzata dalla velocità di flusso. In questo intervallo si può avere sia ventilazione naturale che ventilazione forzata. La distanza di *backlayering* varia nell'intervallo:

$$0 \leq L_b \leq 17 H$$

Nel terzo gruppo (3) di flusso elevato, abbiamo solitamente una bassa stratificazione dei fumi a valle dell'incendio e solitamente nessun *backlayering*. In questo gruppo solitamente abbiamo gallerie a ventilazione forzata. Si definisce velocità critica come la velocità necessaria per prevenire ogni tipo di *backlayering*.

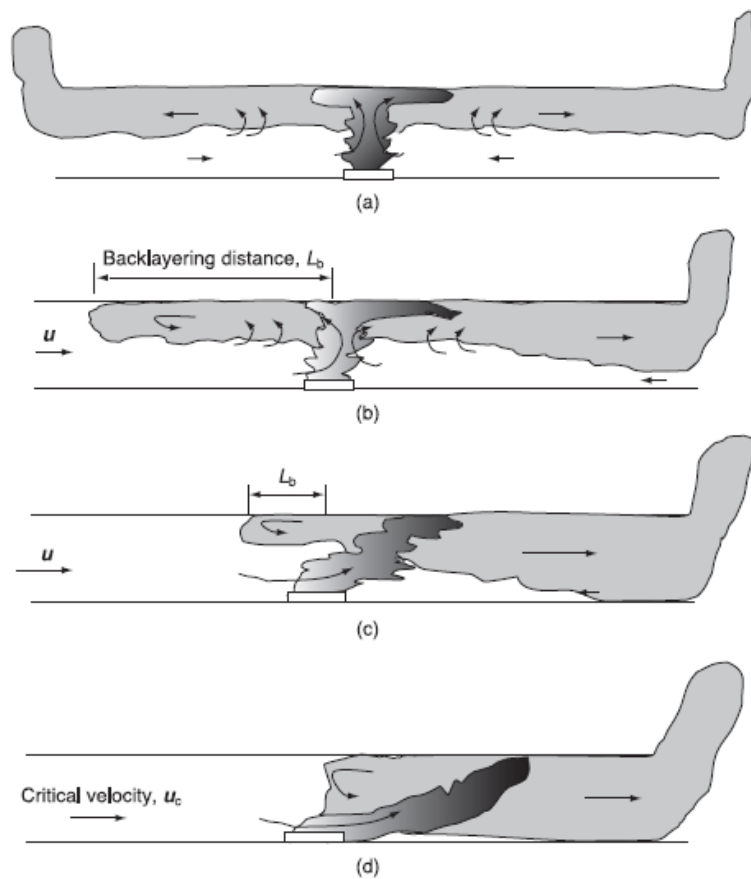


Figura 54 Schemi da (Carvel & Beard, 2005) (a) stratificazione di fumi in una galleria velocità d'aria molto bassa 0-0.3m/s, (b) stratificazione di fumi in una galleria con una velocità d'aria pari a 1m/s (c) stratificazione di fumi tipica del gruppo (2) (d) stratificazione di fumi tipica del gruppo (3) con una velocità di flusso maggiore della velocità critica u_c

La stratificazione a valle dell'incendio è il risultato di un processo di miscelazione tra aria fredda e il flusso del *plume* dei gas esausti prodotti dalla combustione. Questo è un fenomeno che si sviluppa tridimensionalmente nelle vicinanze dell'incendio. I principali percorsi dei due flussi di densità sono indicati nella figura successiva (Carvel & Beard, 2005). Le forze gravitazionali, dettate dalla densità funzione della temperatura, tendono a sopprimere la miscelazione turbolenta tra i due diversi flussi. A favore della miscelazione c'è quindi la turbolenza dettata dal flusso mentre a sfavore ci sono le forze gravitazionali di galleggiamento correlate con la differenza di temperatura.

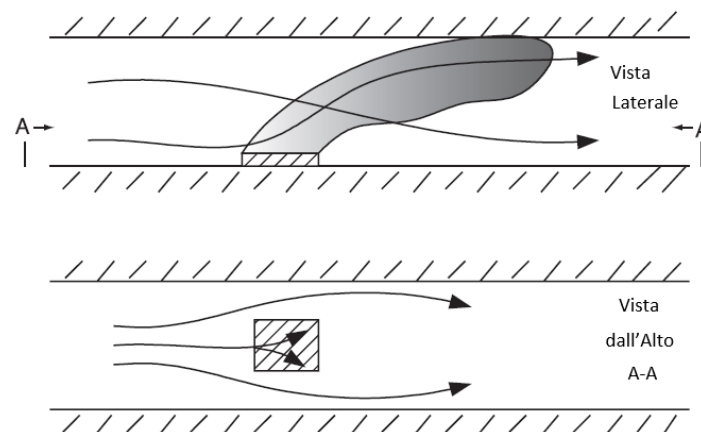


Figura 55 I principali percorsi di flusso in prossimità del plume dell'incendio (Carvel & Beard, 2005)

Le forze agenti sulla miscelazione spiegano il perché è possibile che il flusso d'aria fredda possa passare attorno all'incendio senza miscelarsi con il *plume* dell'incendio. L'estensione del combustibile ha un ruolo fondamentale nel definire la miscelazione. (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984) ha mostrato come, in ambienti sviluppati in una dimensione, vi è una correlazione tra la temperatura locale della stratificazione e la concentrazione degli elementi chimici. Successivamente (Ingason & Persson, Prediction of optical density using CFD, 1999) hanno mostrato come vi è una correlazione tra la densità ottica dei fumi (o visibilità), la densità locale (o temperatura) e la concentrazione di ossigeno in galleria. E' ragionevole assumere che vi è una correlazione tra stratificazione della temperatura come visto da (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984) e la composizione chimica dei gas (CO, CO₂, O₂ ecc..) e la stratificazione dei fumi. La stratificazione della temperatura non è dettata solamente dalla velocità dell'aria ma anche dal HRR e dall'altezza della galleria. Questi parametri possono essere relazionati localmente al numero di *Froude* (Fr) o di *Richardson* (Ri). (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984) ha presentato un metodo molto semplice nella valutazione della stratificazione dei gas in galleria usando il numero di *Froude* calcolato a livello locale. Nella sua trattazione, (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984) divide il dominio in tre distinte regioni di stratificazione per temperatura.

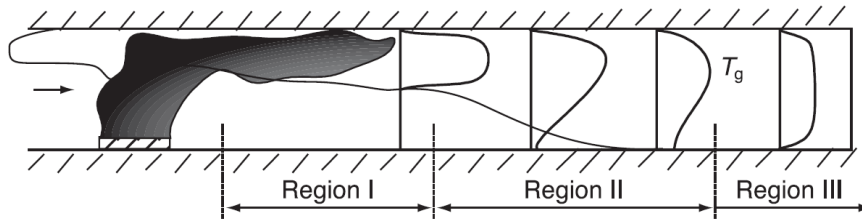


Figura 56 Schematizzazione delle tre regioni in funzione della stratificazione della temperatura (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984)

- La prima regione, per $Fr \leq 0.9$, mostra una stratificazione considerevole e i caldi prodotti di combustione fluiscono lungo la parte superiore della galleria. Nella prima regione la temperatura dell'aria in prossimità del piano campagna è pressoché quella ambiente.
- La seconda regione, per $0.9 \leq Fr \leq 10$, è dominata da una forte interazione tra flusso orizzontale e le forze gravitative verticali, quindi non si osserva una stratificazione particolarmente pronunciata a causa dei forti gradienti di temperatura che mantengono un controllo sulla miscelazione. Vi è quindi una forte interazione tra il flusso d'aria orizzontale e le forze di galleggiamento indotte dalla temperatura.
- Nella terza regione, per $Fr \geq 10$, non si ha un significativo gradiente verticale di temperatura e quindi di conseguenza non c'è una stratificazione visibile come mostrato in figura.

Nel lavoro di (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984) si è stabilito anche il valore del numero di *Froude*, assunte le ipotesi teoriche presentate precedentemente:

$$Fr = \frac{u_{avg}^2}{1.5 \frac{\Delta T_{avg}}{T_{avg}} g H}$$

Dove H è l'altezza della galleria, T_{avg} la temperatura (°K) dei gas mediata sulla sezione ad una certa posizione all'interno della galleria, dei gas lungo tutta la sezione della galleria, $\Delta T_{avg} = T_{avg} - T_a$ gradiente di temperatura media rispetto alla temperatura ambiente ad una determinata posizione in galleria, $u_{avg} = u T_{avg}/T_a$ è il parametro di input per poter identificare il tipo di regione (*Regione I*, *Regione II* o *Regione III*) noto T_{avg} , parametro trattato nella seguente sezione.

3.7 Condizioni medie di flusso nel caso di flusso d'aria longitudinale

Al fine di identificare la regione di appartenenza è necessario conoscere il campo delle temperature medie a valle dell'incendio. Però risulta di estremo interesse conoscere anche i campi di velocità, concentrazione, visibilità e HRR. Per la trattazione teorica si fanno la seguente ipotesi: i gas prodotti sono completamente miscelati e a causa della velocità longitudinale; la velocità dei gas, la loro temperatura media e la loro concentrazione sono funzioni della sola distanza dall'incendio.

3.7.1 Temperatura e velocità dei gas

L'equazione che governa il flusso di energia monodimensionale per il flusso di una miscela è:

$$\dot{m}_a c_p \frac{dT_{avg}}{dx} = h_c P (T_{avg} - T_w) + \varepsilon_{g-w} F_w P \sigma (T_{avg}^4 - T_w^4)$$

Dove h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo medio con le pareti (kW/m²K), P il perimetro della galleria in metri, T_w la temperatura delle pareti in Kelvin, F_w fattore di vista, ε_{g-w} effettiva emessività tra gas e pareti, σ è la costante di *Stefan-Boltzmann* (kW/m²K⁴). In questa equazione il termine $\dot{m}_a c_p \frac{dT_{avg}}{dx}$ rappresenta la variazione di energia lungo la direzione x , il termine $h_c P (T_{avg} - T_w)$ il flusso di energia scambiata per via convettiva e il termine $\varepsilon_{g-w} F_w P \sigma (T_{avg}^4 - T_w^4)$ il flusso di energia scambiata per via radiativa.

L'equazione presentata precedentemente può essere risolta solo per via numerica. Tuttavia l'equazione si può risolvere per via analitica introducendo l'ipotesi di coefficiente di scambio di energia puntuale h . In questo caso $h = h_c + h_r$, quindi si può procedere ad omettere il termine radiativo. Trascurando il termine radiativo la precedente equazione diventa:

$$\dot{m}_a c_p \frac{dT_{avg}}{dx} = h P (T_{avg} - T_w)$$

L'equazione differenziale di primo grado può essere quindi risolta imponendo le condizioni al contorno di temperatura indisturbata pari alla temperatura ambiente T_a :

$$T_{avg}(x, t) = T_a + [T_{avg, x=0}(\tau) - T_a] e^{-\left(\frac{h P x}{\dot{m}_a c_p}\right)}$$

Dove $T_{avg}(x, t)$ è la temperatura media lungo la galleria al tempo t , $T_{avg, x=0}(\tau)$ è la temperatura media dei gas nella posizione dell'incendio ($x = 0$) al tempo $\tau = t - (x/u)$. Questo significa che è necessario il tempo (x/u) per trasportare l'energia generata in prossimità dell'incendio fino alla generica posizione x . Questo parametro è fondamentale durante le fasi di sviluppo dell'incendio e a lunghe distanze dall'incendio. In questa trattazione non è considerato l'aumento di velocità dei gas dovuto all'aumento di temperatura. Diventa fondamentale conoscere il valore del coefficiente di diffusione h , in questo caso secondo (Carvel & Beard, 2005):

$$0.02 \frac{kW}{m^2 K} \leq h \leq 0.04 \frac{kW}{m^2 K}$$

La temperatura mediata lungo la sezione T_{avg} in prossimità dell'incendio $x = 0$ al tempo τ :

$$T_{avg, x=0}(\tau) = T_a + \frac{2}{3} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a c_p}$$

Questa temperatura dei gas è decisamente inferiore rispetto a quella delle pareti in prossimità dell'incendio a causa degli effetti di scambio turbolento.

Nei grandi incendi in galleria (>50MW) le pareti superiori della galleria possono raggiungere temperature che oscillano tra 900-1350°C in funzione delle condizioni di ventilazione, la geometria della galleria e il carico d'incendio. Nel caso trattato in questa sede si è assunto che un terzo del HRR sia disperso per via radiativa. Attraverso le equazioni mostrate si possono ricavare T_{avg} , ΔT_{avg} , u_{avg} e F_r al fine di verificare se la stratificazione avviene nella *Regione I*, *Regione II* o *Regione III*.

Nel caso di un incendio in una galleria con una ventilazione naturale dovuta alla pendenza della galleria si può calcolare la velocità dell'aria di ventilazione u , usando l'equazione di Bernoulli:

$$u = \sqrt{\frac{2g \Delta h \left(1 - \frac{T_a}{\bar{T}}\right)}{\frac{\bar{T}}{T_a} + K_1 + \frac{f_D}{D_h} \left[L + L_s \left(\frac{\bar{T}}{T_a} - 1\right)\right]}}$$

Dove Δh è l'altezza dello strato di fumi caldi in metri, $\bar{T}$ la temperatura media dei fumi caldi (in Kelvin) lungo l'altezza dello strato Δh , T_a è la temperatura ambiente (generalmente 293°K), L_s la lunghezza della galleria esposta ai fumi caldi, f_D il parametro di definizione delle perdite di carico, D_h il diametro idraulico della galleria in metri, K_1 il coefficiente di perdita all'imbocco pari a 0.5. Se l'intera galleria è riempita di gas caldi, $\Delta h = \theta L/100$; dove θ è la pendenza della galleria espressa in percentuale. Il valore di f_D è funzione del numero di Reynolds e per molte gallerie vale tra 0.015 e 0.03. In questo caso la temperatura media dei fumi:

$$T_{avg} = T_a + \frac{2}{3} \frac{Q(\tau)}{P h L_s}$$

3.7.2 La concentrazione di gas

La frazione media molare $X_{i,avg}$ di CO_2 , CO e HCN lungo la sezione della galleria ad una certa distanza a valle dell'incendio può essere calcolata con la seguente equazione:

$$X_{i,avg} = Y_i \frac{M_a}{M_i} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a \chi H_T}$$

Ipotizzando $\dot{m}_a \approx \dot{m}_g$, dove $\dot{m}_g$ è il flusso di gas combustibile. M_a è la massa molecolare dell'aria, M_i la massa molecolare della specie chimica i , Y_i la resa massica della specie chimica i . Le rese di CO_2 , CO e HCN , per differenti combustibili, in condizioni ben ventilate, sono state ottenute dai lavori (Tewarson, Generation of heat and chemical compounds in fires, 1988) (Tewarson, Generation of heat and chemical compounds in fires, 1995).

Combustibile	Y_{CO_2} (kg/kg)	Y_{CO} (kg/kg)	Y_{HCN} (kg/kg)	H_{ec} (MJ/kg)
Legno	1,27	0,004	0	12,4
Schiuma rigida di poliuretano	1,5	0,027	0,01	16,4
Polistirene	2,33	0,06	0	27
Olio minerale	2,37	0,041	0	31,7

Tabella 14 Resa massica di diversi composti chimici per diverse tipologie di combustibile

Per quanto riguarda la combustione di veicoli, un interessante risultato, è stato ottenuto da (Lonnermark & Blomqvist, 2006). Di seguito si riportano le rese di gas inorganici durante test sperimentali su grande scale.

<i>Specie chimica</i>	<i>Quantità totale (kg)</i>	<i>Resa (g/kg)</i>
CO₂	265	2400
CO	6.9	63
HCN	0.17	1.6
HCl	1.4	13
SO₂	0.54	5.0

Tabella 15 Resa chimica durante la combustione di un autoveicolo s (Lonnermark & Blomqvist, 2006)

La frazione molare media di ossigeno nei gas di combustione ad una certa distanza è approssimata dalla seguente equazione:

$$X_{O_2,avg} = 0.2095 - \frac{M_a}{M_{O_2}} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a 13100}$$

Dove 0.2095 è la frazione molare di ossigeno nell'aria in condizione ambiente, M_a è la massa molecolare dell'aria (28.95 g/mol), M_{O_2} è la massa molecolare dell'ossigeno (32 g/mol) e 13100 kJ/kg è l'energia rilasciata per kg di ossigeno.

3.7.3 Visibilità

L'uso di modelli pratici per il calcolo della visibilità è determinato dalla necessità di mantenere la visibilità lungo le vie di fuga per il tempo di fuga di progetto. Il tempo di fuga va comparato con il tempo esposizione delle persone alle condizioni presenti nell'incendio. Si fa riferimento a gli studi di (Tewarson, Generation of heat an chemical compounds in fires, 1988), (Jin & Yamada, Irritating effects of fire smoke on visibility, 1985) (Ostman, 1992).

La visibilità in condizione di fumi è correlata al coefficiente di estinzione C_s , (Jin & Yamada, Irritating effects of fire smoke on visibility, 1985) mediante l'equazione ottenuta da (Ostman, 1992):

$$C_s = \frac{OD}{L} \log_e(10)$$

Dove OD è la densità ottica (definita come il logaritmo decimale del rapporto tra intensità di luce incidente e intensità di luce trasmessa) e L la lunghezza del percorso di luce nel fumo. C_s è pari a ξ , costante di *Lambert-Beer* (Hwang & Wargo, 1986), moltiplicata per la concentrazione massica delle particelle di fumo. Segue quindi che la densità ottica si può anche esprimere in altro modo secondo (Tewarson, Generation of heat an chemical compounds in fires, 1988):

$$\frac{OD}{L} = \xi Y_s \frac{\dot{m}_f}{\dot{V}_T}$$

Dove ξ è il coefficiente di estinzione dei fumi (m²/kg), Y_s resa dei fumi (kg/kg), $\dot{m}_f$ è il consumo massico di combustibile (kg/s), $\dot{V}_T$ il flusso volumetrico di aria e prodotti di combustione (m³/s). Il parametro ξY_s determina la densità di massa ottica, D_{mass} (m²/kg) ed è stata stimata da per differenti combustibili da (Tewarson, Generation of heat an chemical compounds in fires, 1988). Riscrivendo $\dot{m}_f$ e definita la quantità ξY_s si può riscrivere l'equazione precedentemente scritta:

$$\dot{m}_f = \frac{Q(\tau)}{H_{ec}}$$

$$\frac{OD}{L} = D_{mass} \frac{Q(\tau)}{u A H_{ec}}$$

Combustibile	$D_{mass} (m^2/kg)$
Legno	37
Schiuma rigida di poliuretano	304
Polistirene	335
Olio minerale	0

Tabella 16 Densità di massa ottica per diversi tipi di combustibile

Dagli studi di (Jin & Yamada, Irritating effects of fire smoke on visibility, 1985) per pareti, soffitti, pavimentazione e porte in vie sotterranee, la relazione tra visibilità attraverso fumi non irritanti e il coefficiente di estinzione è:

$$V = \frac{2}{C_s}$$

La visibilità attraverso fumi irritanti è considerevolmente inferiore come è stato dimostrato da (Jin, Studies on human behaviour and tenability in the fire smoke, 1997). Secondo l'autore la visibilità decade a zero per valori di C_s maggiori di $0.55 m^{-1}$, nel caso di una insegna antincendio illuminata in presenza di fumi irritanti. Inoltre C_s può essere correlato facilmente ad "obscura" unità di misura di riferimento agli studi di (Rasbash & Pratt, 1980). Definita N come *obscura*:

$$N = \frac{10 C_s}{2.3}$$

Da letteratura è noto che un N corrisponde ad una visibilità compresa tra 8-10m in fumi non irritanti per non oggetto auto illuminato.

Combinando le equazioni viste precedentemente si ottiene la correlazione tra visibilità V e il HRR ad una determinata posizione della galleria e ad un certo tempo:

$$V = 0.87 \frac{u A H_{ec}}{Q(\tau) D_{mass}}$$

L'equazione fornisce un valore medio di visibilità lungo la sezione. Inoltre si ricorda che in caso di gas irritante la visibilità diminuisce considerevolmente.

Non vi sono molte informazioni in letteratura riguardanti il parametro D_{mass} . Tuttavia dagli studi di (Steinert, 1994) si può ricavare il parametro in funzione del tipo di carico di incendio per alcuni tipi di veicoli stradali:

Veicolo	$D_{mass} (m^2/kg)$
Autoveicolo (acciaio)	381
Autoveicolo (plastica)	330
Autobus	203
Autocarro	76-102

Tabella 17 Parametri D_{mass} per alcuni carichi di incendio stradali presentati nel lavoro di (Steinert, 1994)

3.8 Determinazione di HRR negli incendi in galleria

Il parametro principale che regola la maggior parte degli incendi in galleria e fenomeni correlati è il HRR ovvero il tasso di rilascio di calore di un incendio. Per il suo calcolo si devono distinguere le due condizioni di combustione, ovvero la situazione di combustione controllata dall'apporto di combustibile o combustione controllata dall'apporto di comburente (ovvero dalla ventilazione). Nel caso di gallerie ove è presente una ventilazione longitudinale forzata, la stima di HRR, passa dalla calorimetria della combustione dell'ossigeno.

3.8.1 Calorimetria legata al consumo di ossigeno

Si può calcolare la quantità di calore a partire dal consumo di ossigeno, come mostrato nella seguente equazione elaborata da (Janssens & Parker, 1992):

$$Q = 14330 \dot{m}_a \left[\frac{X_{O_2}(1 - X_{CO_2}) - X_{O_2}(1 - X_{O_2,CO_2})}{1 - X_{O_2} - X_{CO_2}} \right]$$

Dove X_{O_2} è la concentrazione molare di ossigeno in aria a condizione ambiente (pari a 0.2095) e X_{O_2,CO_2} la concentrazione molare di anidride carbonica in aria a condizione ambiente (pari a circa 0.000333), mentre X_{O_2} e X_{CO_2} sono le concentrazioni di ossigeno ed anidride carbonica a valle dell'incendio. Queste ultime due quantità sono misurate mediante un analizzatore di gas. Se non è possibile svolgere la misura di X_{CO_2} si può considerare nulla la concentrazione di anidride carbonica a valle dell'incendio. In questo caso l'errore sul HRR finale sarà minore del 10%. Mediante l'equazione mostrata precedentemente è possibile calcolare il HRR nel punto di misura dell'analizzatore gas. Segue quindi che il HRR in posizione dell'incendio sarà quindi semplicemente spostato temporalmente di un tempo x/u . Si assume che il calore rilasciato per ciascun kg di ossigeno è 13100 kJ/kg mentre per il flusso massico d'aria vale sempre:

$$\dot{m}_a = \rho_a u A$$

Altre assunzioni sono un'umidità relativa di 50% a condizioni ambiente e temperatura ambiente di 15°C.

3.8.2 Tecnica del rapporto CO/CO_2

Dai lavori di (Tewarson, Experimental evaluation of flammability parameters of polymeric materials, 1982) è stata sviluppata la tecnica del rapporto CO/CO_2 che consente la stima del HRR a partire dal rapporto tra monossido di carbonio ed anidride carbonica. La specifica equazione è la seguente:

$$Q = \dot{m}_{CO_2} \left(\frac{H_T}{k_{CO_2}} \right) + \dot{m}_{CO} \left(\frac{H_T - H_{CO}k_{CO}}{k_{CO}} \right)$$

Dove H_{CO} è il calore di combustione del monossido di carbonio (kJ/g), k_{CO_2} e k_{CO} sono le massime rese rispettivamente di anidride carbonica e monossido carbonica (g/g). Le quantità $\frac{H_T}{k_{CO_2}}$ e $\frac{H_T - H_{CO}k_{CO}}{k_{CO}}$ sono valori risultati costanti per vari tipi di materiale, mentre $\dot{m}_{CO_2}$ e $\dot{m}_{CO}$ sono i flussi massici di anidride carbonica e monossido di carbonio. L'equazione presentata può essere riscritta in funzione del flusso massico di aria, assumendo $\dot{m}_a \approx \dot{m}_g$, come descritto da (Carvel & Beard, 2005):

$$Q = \dot{m}_a \left[\frac{M_{CO_2}}{M_a} X_{CO_2} \left(\frac{H_T}{k_{CO_2}} \right) + \frac{M_{CO}}{M_a} X_{CO} \left(\frac{H_T - H_{CO}k_{CO}}{k_{CO}} \right) \right]$$

Dai lavori di (Grant & Drysdale, 1997) si assume un valore di 12.5 kJ/g e 7.02 kJ/g rispettivamente per $\frac{H_T}{k_{CO_2}}$ e $\frac{H_T - H_{CO}k_{CO}}{k_{CO}}$, per la stima di HRR nel caso di un autocarro adibito al trasporto di merci. Si ricorda che X_{CO_2} e X_{CO} sono gli aumenti di concentrazione rispetto al livello ambiente. Segue quindi che ai valori misurati devono essere sottratti del livello ambiente per ottenere gli incrementi, necessari per il calcolo.

Nel lavoro pubblicato da (French, 1994) è possibile osservare dati sperimentali (in forma grafica) del test HGV-EUREKA. Secondo il grafico la massima concentrazione di CO_2 e CO è stimata a 9.4% per l'anidride carbonica e 0.08% per il monossido di carbone dopo circa 18-19 minuti. La concentrazione minima di ossigeno a valle dell'incendio non è stata possibile. Al raggiungimento del picco dell'incendio, il filo della sonda di

misurazione (posizionata a 100m dal combustibile) è stato danneggiato. Tuttavia, grazie a test sperimentali su scala ridotta è stato possibile, in funzione delle concentrazioni di CO_2 e CO , ricondurre una concentrazione di ossigeno prossima al 10%.

3.8.3 Influenza della ventilazione nel HRR

L'interazione del flusso di ventilazione con il HRR è stata investigata da (Carvel, Beard, & Jowitt, 2001). Nel lavoro si è concluso che il HRR di un autocarro (HGV) può aumentare di un fattore 4 per una velocità di flusso di 3m/s e di un fattore 10 per una velocità di 10m/s in galleria. Inoltre, il tasso di crescita dell'incendio può aumentare di un fattore 5 per una velocità di 3m/s e di un fattore 10 per una velocità di 10m/s.

L'aumento di HRR e di tasso di crescita dell'incendio dovuto all'aumento di velocità di flusso dell'aria è un effetto del miglior scambio termico tra fiamme e superficie di combustibile e del più efficiente trasporto di ossigeno nel letto dell'incendio migliorando la miscelazione tra gas combustibile e ossigeno. Nell'incendio che potrebbe essere localmente sotto ventilato in assenza di ventilazione, in caso di ventilazione forzata, il flusso d'aria porta allo scambio di ossigeno verso le zone sotto ventilate incrementando consistentemente la combustione e quindi il rilascio di calore. Tuttavia, sotto alcuni intervalli di velocità d'aria, il raffreddamento convettivo è dello stesso ordine del flusso di calore tra fiamme e combustibile. In questi casi l'effetto di ventilazione forzata su HRR e tasso di crescita dell'incendio potrebbe essere ridotto o assente. Non si conoscono ancora bene gli intervalli quantitativi tra questi due domini ma è certo, sperimentalmente, che non esiste un punto di transizione per quanto concerne gli incendi che coinvolgono mezzi pesanti. In questi casi infatti, gli effetti radiativi dettati dai grandi volumi delle fiamme incidono consistentemente sulla superficie del combustibile innescando un forte squilibrio termico.

3.9 Lunghezza delle fiamme

La lunghezza delle fiamme in un incendio in galleria è molto importante quando si considera il propagarsi dell'incendio tra i veicoli. Le conoscenze legate alla lunghezza delle fiamme in galleria disponibili in letteratura sono limitate. L'argomento in questione è ancora un campo aperto. Tuttavia, nella seguente trattazione verranno fornite alcune conoscenze basilari su altezza e lunghezza delle fiamme.

Dagli studi è noto che l'altezza delle fiamme luminose è governata da apporto di combustibile, il grado di volatilizzazione ed infine geometria e proprietà di combustibile. Gran parte di liquidi e solidi bruciano emanando fiamme luminose. L'energia diffusa dalle fiamme è per il 70% energia convettiva mentre il 30% è diffusa per via radiativa. Il caratteristico colore giallognolo è il risultato di emissioni di piccole particelle a base di carbonio che si formano all'interno della fiamma (particelle *soot*). La potenza netta di emissione delle fiamme (flusso radiativo) dipenderà dalla concentrazione di queste particelle e dallo spessore della fiamma. La maggior parte di fiamme di idrocarburi diventano visibilmente spesse quando il diametro minimo delle fiamme è di 3 metri. Questo significa che il flusso radiativo massimo misurato è quello in queste condizioni. Dall'altra parte per grandi incendi di idrocarburi una grande porzione di flusso radiativo può essere assorbita dai fumi attorno alla fiamma riducendo la quantità di radiazione destinata all'ambiente circostante alla fiamma. Tuttavia, occasionalmente, i fumi si disperdono, permettendo alla fiamma di rilasciare in maniera impulsiva all'ambiente circostante una quantità di energia radiativa.

Vi sono numerose relazioni in letteratura sulle fiamme di incendi a cielo aperto (Beyler, Fire plumes and ceiling jets, 1986) (McCaffrey, Flame height, 1995), la più semplice è stata proposta da (McCaffrey, purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results, 1979):

$$h_{free} = 0.2 Q^{2/5}$$

Nella relazione presentata l'altezza della fiamma è funzione della potenza di HRR. Questa equazione è valida per incendi asimmetrici. Vi sono due fattori che devono essere presi in considerazione quando si deve determinare la lunghezza delle fiamme in galleria:

- la presenza della calotta;
- la presenza di ventilazione.

3.9.1 Presenza della calotta

Nei lavori di (Babrauskas, Flame Lengths under Ceilings, 1980) si è fatto una revisione delle informazioni disponibili sul compartimento delle fiamme sotto calotta non combustibili e si è dimostrato che vi è una correlazione tra l'altezza di fiamma impedita h_{cut} e la propagazione orizzontale della fiamma h_{hor} come mostrato in figura.

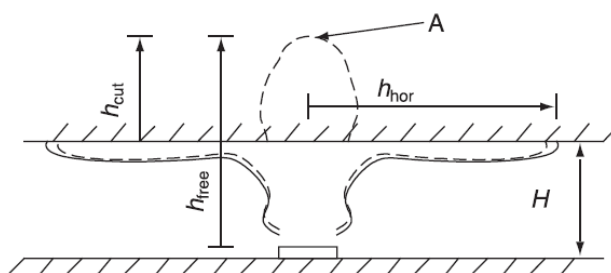


Figura 57 Parametri geometrici fiamma in presenza della calotta

L'analisi, bidimensionale, fa affidamento su una grande numero di assunzioni dove si esamina quanta aria è necessaria alle fiamme orizzontali alla calotta h_{hor} per bruciare gli eccessi di gas combustibile che fluiscono alla calotta. Lo scambio di ossigeno lungo la calotta orizzontale è stato studiato da (Alpert, 1971). Nei lavori di (Babrauskas, Flame Lengths under Ceilings, 1980) è stato stimato il rapporto h_{hor}/h_{cut} per differenti scenari (geometria tridimensionale). Gli scenari, riferiti alle gallerie, più interessanti sono lo scenario di calotta infinitamente estesa e il caso di corridoio. Nel caso di corridoio, l'estensione delle fiamme è in una sola direzione: nel caso di calotta orizzontale infinitamente estesa il rapporto h_{hor}/h_{cut} è pari a 1.5 (in tutte le direzioni). Mentre per il caso di corridoio largo 3m il rapporto h_{hor}/h_{cut} è stato stimato con il valore 1.81 e per un corridoio largo 2m il valore del rapporto è stato stimato come 2.94. Segue quindi che in caso di presenza di una calotta deve essere considerato che si avrà un'estensione orizzontale lungo la calotta che va da 1.5 a 3 volte la lunghezza di fiamma impedita h_{cut} . In questo caso di studio non è stato considerato l'effetto della ventilazione. L'effetto di quest'ultima è considerata nel paragrafo successivo.

3.9.2 L'effetto della ventilazione longitudinale sulla lunghezza della fiamma

In presenza di una velocità di flusso d'aria considerevole si innesca un miscelamento turbolento dell'apporto di ossigeno con il flusso di combustibile che aumenta l'efficienza della combustione. L'effetto è un accorciamento della fiamma. Per flussi longitudinali moderati, tuttavia, la lunghezza della fiamma potrebbe aumentare all'aumentare della velocità dell'aria. Questo allungamento di fiamma può essere spiegato dal fatto che a basse velocità, i gas di volatilizzazione pirolizzati devono disperdersi per lunghezze maggiori prima inglobare sufficiente ossigeno per completare la combustione. Al ridursi della velocità trasversale, inoltre, le fiamme si riducono in estensione orizzontale e l'interazione con la calotta si fa sempre più pronunciata riducendo l'inglobamento di ossigeno all'interno della fiamma. La riduzione di apporto di ossigeno è detta dalla minor superficie a contatto con l'aria (Rew & Deaves, 1999). Se invece la ventilazione forzata è assente all'interno della galleria, le fiamme a contatto con la calotta si propagheranno in entrambe le direzioni come

mostrato in figura. In generale ci aspetta che l'inglobamento dell'ossigeno lungo la calotta sia funzione del numero di *Richardson*, Ri .

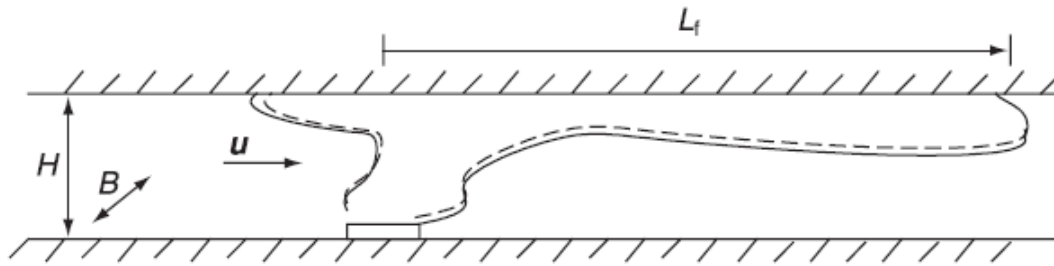


Figura 58 Influenza della velocità di ventilazione sulla lunghezza della fiamma

(Rew & Deaves, 1999) hanno presentato un modello di descrizione di lunghezza di fiamma in galleria, che include HRR e velocità di ventilazione. Mancano tuttavia i parametri geometrici di galleria. Gran parte della teoria presentata si rifà alle investigazioni sull'incendio della Galleria del Canale della Manica del 1996 e i test d'incendio HGV-EUREKA 499 (French, 1994) e Memorial test (Massachusetts Highway Deptment, 1995). Il modello ha definito la lunghezza di fiamma orizzontale, L_f , come la isoterma 600°C , dal centro o dal retro del mezzo pesante. Nel caso si prenda come riferimento il retro del mezzo pesante, l'equazione che si ottiene è:

$$L_f = 20 \left(\frac{Q}{120} \right) \left(\frac{u}{10} \right)^{-0.4}$$

L'equazione ottenuta è una stima conservativa ottenuta da limitati dati sperimentali. I dati fanno riferimento alla ricerca HGV-EUREKA 499 mostrati nella seguente figura. Come si evince dalla equazione precedente, l'effetto della velocità è quello di ridurre la lunghezza della fiamma. Gli effetti della velocità, nell'equazione, possono essere tali da avere una lunghezza finale inferiore a quella ottenuta dai lavori di (McCaffrey, purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results, 1979). Questo ovviamente non è possibile poiché sappiamo con certezza che l'aumento della lunghezza di fiamma, a contatto con la calotta, può essere incrementato fino a 3 volte. Risulta quindi naturale pensare in qualche modo di limitare l'influenza della velocità dell'aria nella stima della lunghezza della fiamma. Lavori successivi di (Babrauskas, Flame Lenghts under Ceilings, 1980) sulla altezza della fiamma in presenza della calotta in corridoio indicano che larghezza e altezza del corridoio sono parametri fondamentali. Un modo per rappresentare questi parametri è utilizzando il diametro idraulico della galleria D_h .

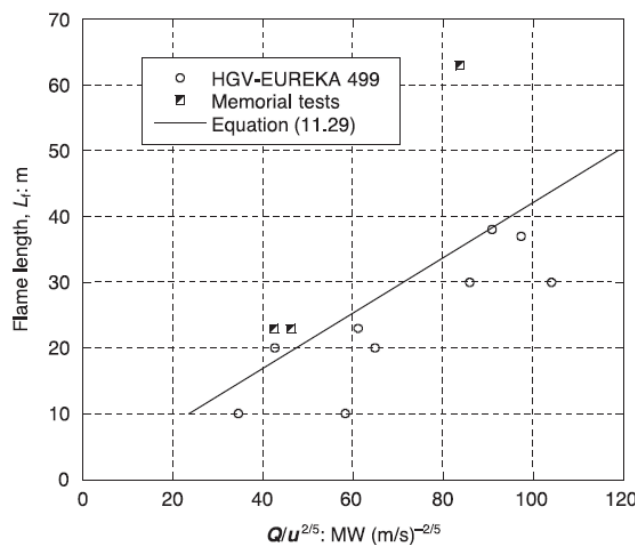


Figura 59 Comparazione tra i dati HGV-EUREKA 499 e Memorial test

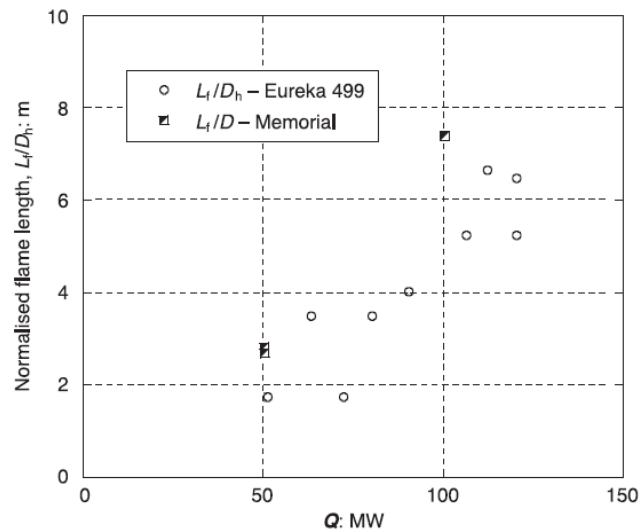


Figura 60 Andamento della lunghezza di fiamma non dimensionale in funzione di HRR

Se rappresentiamo i dati di HGV-EUREKA 499 e Memorial test, considerando come parametro il rapporto tra lunghezza di fiamma e diametro idraulico otteniamo un risultato più coerente. Se oltre a ciò omettiamo la velocità nell'analisi otteniamo la linearizzazione ottimale dei dati. Questo indica che la geometria della galleria (larghezza, altezza, forma) è un parametro che deve essere incluso mentre la velocità dell'aria non è un parametro così fondamentale.

3.10 Grandi incendi in galleria in presenza di flusso longitudinale

In questa sezione verrà studiato con maggior precisione le situazioni in cui vi è la propagazione dell'incendio da un veicolo all'altro e la combustione diventa controllata dalla ventilazione. Nello specifico questi fenomeni avvengono in gallerie dotate di ventilazione ad alto flusso longitudinale.

Da esperimenti svolti si è concluso che incendi controllati da ventilazione accadono in maniere più rada in passaggi stretti ad elevata ventilazione, maggior carico d'incendio e più sorgenti combustibili. Questi fattori implicano che si ha combustione controllata da ventilazione quando la miscelazione turbolenta nella zona di combustione è intensa sufficientemente da impedire l'apporto di aria. Questo significa che, nel caso di gallerie stradali, questa situazione si ha quando sono coinvolti almeno due o più veicoli pesanti (alto carico d'incendio).

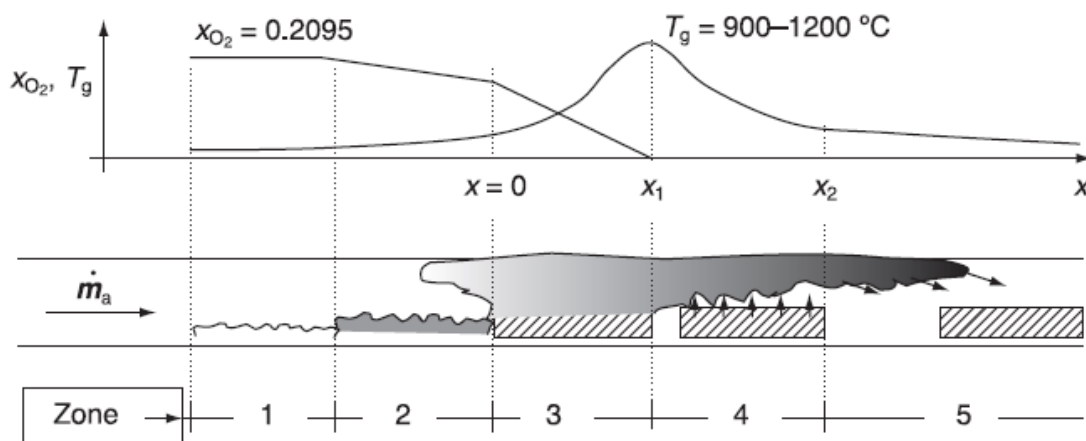


Figura 61 Le zone caratteristiche di un incendio in gallerie ad alta densità veicolare

Dai lavori di (de Ris, 1970) si è schematizzato come gli incendi diventino controllati da ventilazione. La descrizione fornita può essere utilizzata nel caso di gallerie stradali. La figura sovrastante mostra lo schema descrittivo di incendi controllati da relativamente intensa ventilazione longitudinale. Il processo di combustione può essere visto come stazionario. Al fine di spiegare il processo di combustione si assumono cinque zone:

1. Zona di raffreddamento successivo a combustione
2. Zona di ceneri calde e non ancora spente
3. Zona di combustione
4. Zona di eccesso di combustibile
5. Zona di preriscaldamento

Nel caso di un'alta densità di traffico veicolare queste differenti zone sono dinamica e susseguono coinvolgendo via via sempre più veicoli. La zona di raffreddamento coinvolge veicoli che sono stati completamente consumati nell'incendio. Qui i gas combustibili si sono raffreddati. La zona delle ceneri contiene veicoli che sono nelle ultime fasi di decadimento dell'incendio. In questa zona tuttavia la temperatura media è ancora elevata e la combustione non si è ancora totalmente esaurita. Nella zona di combustione (alla quale ipoteticamente si assegna la posizione $x = 0$) sono contenuti veicoli che stanno bruciando intensamente (incendi totalmente sviluppati) e dove vi è sufficiente vaporizzazione dei gas a supporto della combustione in fase gassosa. La produzione di fiamme è tipica di queste zone. Attraverso le fiamme vengono trasferiti alti quantitativi di energia da gas verso combustibile solido aumentando il tasso di volatilizzazione dei gas a partire dai combustibili solidi. La temperatura della fase gas, oltre $x = 0$, aumenta rapidamente. In maniera simultanea, l'ossigeno si riduce in concentrazione a causa del fatto che la temperatura raggiunge il suo massimo per $x = x_1$, appena oltre la zona di combustione. La zona di eccesso di combustibile inizia per $x = x_1$, dove la concentrazione di ossigeno è nulla. Il combustibile vaporizza dai veicoli presenti in questa zona, tuttavia non vi sono combustioni a causa della mancanza di ossigeno. La vaporizzazione avviene fino al punto in cui il flusso dei gas raffredda alla temperatura di vaporizzazione (T_{vap} è circa 300°C per la maggior parte dei solidi). Oltre questo punto non avviene vaporizzazione del combustibile, tuttavia i gas fluiscono nella zona di preriscaldamento in cui scambiano energia con pareti strutturali della galleria e veicoli presenti.

I lavori di (de Ris, 1970) mostrano come la lunghezza delle zone di combustione e di eccesso di combustibile è proporzionale al flusso di ventilazione nelle fasi di incendio controllato da ventilazione. I lavori di (Comitis, Glasser, & D., 1996) hanno mostrato come in questi casi l'incendio si propagherà a velocità costante se vi è sufficiente materiale combustibile disponibile. Questo mostra l'importanza di una ventilazione longitudinale nella propagazione degli incendi in galleria.

I lavori di (Delichatsios, 1975) hanno concluso che un incendio attivo in un condotto costituito di plastica fibrorinforzata si propaga per una lunghezza massima corrispondente $\frac{L_c}{D_h} = 10$, dove D_h è il raggio idraulico e L_c la lunghezza attiva dell'incendio. Questo significa che l'ossigeno inglobato verrà consumato all'interno della zona di combustione. Il rapporto $\frac{L_c}{D_h}$ è quindi un indicatore della magnitudo della lunghezza attiva di effettiva combustione nel caso di incendio controllato da ventilazione, in gallerie ad alta densità di traffico. Assumendo un rapporto pari a 10, come visto nelle ricerche di (Delichatsios, 1975), si può concludere che per incendi controllati da ventilazione viene coinvolto un tratto pari a circa 50-100 metri considerando un diametro idraulico pari a 10 metri.

3.11 Propagazione dell'incendio in galleria

In questa sezione si discuterà del rischio di propagazione incendi tra veicoli. Basandosi sulle temperature, si possono stimare le condizioni necessarie affinché venga innescato un incendio per un dato materiale posto ad una certa distanza dal fuoco. La possibilità di innesco di un oggetto è definita dalla sua superficie esposta e alla temperatura critica. La temperatura critica solitamente viene stimata come 600°C per flusso radiante e 500°C per flusso convettivo nel caso di superficie esposta e innesco spontanea. Questi valori sono stati ottenuti da prove sperimentali di (Kanury, 1995).

Dalle ricerche di (Newman & Tewarson, Flame propagation in ducts, 1983) si conclude che l'innescò avviene per $T_{cr} \approx T_{avg}$, ovvero quando la temperatura media del materiale raggiunge la temperatura critica. La temperatura critica è stata stimata dal flusso critico di calore

$$q''_{cr} \approx \sigma T_{cr}^4$$

Questa è una semplificazione che non tiene conto la dipendenza del tempo nel processo di innesco. Secondo (Newman & Tewarson, Flame propagation in ducts, 1983), la radiazione critica per diversi materiali è nell'intervallo tra 12-22kW/m² e la temperatura critica nell'intervallo 680-790°K. Il flusso di calore verso un veicolo, ad una certa posizione dall'incendio, può essere stimato dalla successiva equazione:

$$q''_{cr} = h_c(T_{avg} - T_a) + \sigma(T_{avg}^4 - T_a^4)$$

Si ricorda che nell'equazione le temperature vanno considerate in gradi Kelvin. Questa equazione può essere utilizzata per stimare il flusso di calore ad una certa dell'incendio. La temperatura media dei gas è ottenibile dalla successiva equazione, già vista in precedenza:

$$T_{avg}(x, t) = T_a + [T_{avg, x=0}(\tau) - T_a] e^{-\left(\frac{h P x}{\dot{m}_a c_p}\right)}$$

I lavori di hanno postulato i meccanismi di propagazione di incendio. Il primo meccanismo è il *flame impingement*: a causa della bassa ventilazione le fiamme sono deflesse dalla presenza della calotta, principalmente in direzione del flusso di ventilazione. Il secondo meccanismo è il *surface spread*: le fiamme si propagano lungo la superficie. Il terzo meccanismo è il *remote ignition*: ovvero avviene l'innescò spontaneo dei veicoli grazie alle alte temperature dovute all'incendio. Il quarto meccanismo è il *fuel transer*: ove si hanno le perdite di combustibile dai serbatoi. L'ultimo meccanismo è l'esplosione dei serbatoi, che può innescare un ulteriore incendio nei veicoli circostanti.

4 Effetti sulle strutture di sostegno

4.1 Introduzione

La storia incidentale nelle gallerie insegna che vi possono essere numerosi problemi strutturali alle gallerie durante gli incendi. I supporti in calcestruzzo armato possono subire seri e numerosi danni. I suddetti danni possono avvenire sia durante la fase di esercizio delle gallerie che durante la fase di costruzione.

L'integrità strutturale è un aspetto di fondamentale rilevanza e le conseguenze possono essere numerose, l'argomento è stato affrontato da (Carvel & Beard, 2005):

- Perdita di integrità strutturale con conseguente innesco di infiltrazioni d'acqua e persino collasso precedentemente alla piena evacuazione del personale coinvolto. Questo è un aspetto rilevante nelle gallerie sottofalda.
- Un incendio può causare un danno significativo. Questo può portare a grandi danni economici diretti di riparazione e manutenzione della galleria oltre che i danni indiretti dovuti alla non funzionalità e il mancato esercizio della galleria.
- I servizi di emergenza (come Vigili del Fuoco e i servizi di primo soccorso) possono incontrare una situazione di rischio (rischio sconosciuto) nel quale devono operare (assistenza all'evacuazione e lotta antincendio).
- Altre misure antincendio, come la ventilazione, le vie di fuga, sistemi di ancoraggio per la ventilazione possono danneggiarsi portando ad un maggiore danno complessivo.

4.2 Tipologie di gallerie

Nell'analisi dell'integrità strutturale di una galleria durante un incendio è importante distinguere la tipologia delle gallerie sulla base dei materiali impiegati e metodologie di costruzione. In questa sede si dissente da ciò che propone (Carvel & Beard, 2005) riguardo alle tipologie di supporti tuttavia ci si trova in accordo con le metodologie di costruzione. Molte gallerie moderne sono costruite secondo uno dei seguenti metodi:

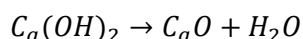
- *Cut and cover*. La galleria è scavata lungo una trincea. I diaframmi e il solettone sono costruiti, mentre la calotta è posata in posto. Successivamente lo scavo, sopra la calotta, viene ritombato con il terreno da scavo. Queste gallerie generalmente hanno un profilo rettangolare.
- *Gallerie a tubo immerso*. Queste gallerie sono costituite di segmenti prefabbricati. Questi elementi vengono assemblati in una trincea scavata sul letto di un mare/fiume. Queste gallerie normalmente hanno un profilo rettangolare ma vengono utilizzati anche profili di tipo diverso.
- *Bored tube*. La galleria è scavata nel mezzo roccioso o in altre tipologie di litologie ed è supportata da elementi prefabbricati in calcestruzzo armato posati all'interno della cavità. Vanno distinte le gallerie scavate *in tradizionale* con quelle scavate *in meccanizzato*. Mentre le prime sono dotate anche di supporti primari (costituiti generalmente di bulloni, reti elettrosaldate, centine e calcestruzzo proiettato) le seconde generalmente vengono scavate con macchine scudate che posano ed assemblano in posto direttamente gli elementi prefabbricati in calcestruzzo. Mentre *in tradizionale* si può avere qualsiasi tipologia di sezione (generalmente viene utilizzata la cosiddetta sezione "a ferro di cavallo") *in meccanizzato* si hanno solo sezioni circolari per via della forma della macchina da scavo).
- *New Austrian Tunnel Method (NATM)*. Questo metodo permette di scavare la galleria a sezioni parzializzate. Generalmente lo scavo avviene con metodologia tradizionale tuttavia di rado vengono utilizzate anche TBM. I supporti sono gli stessi utilizzati per le gallerie scavate in tradizionale.

4.3 Il comportamento del calcestruzzo soggetto ad incendio

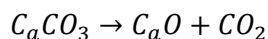
Non tutte le miscele di calcestruzzo sono uguali, come i processi di produzione o l'ambiente di esercizio. Tuttavia si riscontra una tendenza alla maggiore durabilità e resistenza di calcestruzzi con minore porosità e permeabilità. I calcestruzzi usati nelle gallerie della tipologia *Bored Tube* hanno generalmente alte resistenze, alte densità, bassa porosità mentre per le gallerie immerse si tende ad avere bassa densità ed alta porosità (Both, van de Haar, Tan, & Wolsink, 1999). Queste differenze influenzano il comportamento del calcestruzzo quando questo è soggetto a condizioni di incendio.

Nei supporti costruiti con calcestruzzo ad alta resistenza e con miscele a bassa porosità il processo di rottura dominante è dettato dal fenomeno dello "*spalling*". Sottoposto a condizioni di alte temperature, pezzi di calcestruzzo possono "esplodere" e venire proiettati dalla superficie del supporto ad alte velocità. Il meccanismo dello *spalling* non è ancora totalmente conosciuto ma si pensa che sia dovuto principalmente agli eccessi di pressione interna al calcestruzzo dovuta alla formazione di vapore acqueo (Van der Graaf, C., & Wolsink, 1999). Nella pratica, nella porosità del calcestruzzo si annida una certa quantità di acqua in forma liquida. Questa sottoposta ad una temperatura maggiore di 100°C diventa vapore acqueo. Se la pressione del vapore acqueo eccede la capacità della porosità del calcestruzzo di rilasciare la pressione, avviene il fenomeno dello *spalling*.

A temperature maggiori di 400°C l'idrossido di calcio contenuto nel cemento del calcestruzzo sarà sottoposto ad un fenomeno di idratazione che produrrà vapore acqueo.



Non solo questo fenomeno accelererà lo *spalling*, ma anche ridurrà la resistenza meccanica del calcestruzzo (Wetzig, 2001). Altri processi chimici possono avvenire negli aggregati del calcestruzzo ad elevate temperature. Per esempio, il quarzo subisce trasformazioni mineralogiche a 575°C che portano ad un aumento di volume, mentre negli aggregati dei calcari avviene un processo di decomposizione alla temperatura di 800°C (Wetzig, 2001):



Se la porosità del calcestruzzo non è sufficiente da permettere la fuoriuscita del gas, si innesca una sovrappressione con successivo fenomeno di *spalling*.

Lo *spalling* è stato osservato in alcune tipologie di calcestruzzi a temperature appena superiori a 200°C (Both, van de Haar, Tan, & Wolsink, 1999). Si precisa inoltre che il fenomeno dello *spalling* instabilizza il sistema innescando un continuo aumento di temperatura con conseguente autoeccitamento del sistema. Segue quindi che una volta iniziato, il fenomeno dello *spalling*, in mancanza di forze esterne, si esaurisce solo con il collasso strutturale. Sono stati proposti diversi modelli per predire e simulare il fenomeno dello *spalling* come quelli di (Zhang, Zeiml, Pichler, & Lackner, 2014) e sono stati svolti anche diversi studi sperimentali come quello di (Wang, et al., 2019). Tuttavia, si è ancora lontani da una piena comprensione del fenomeno. Segue quindi che per la valutazione degli effetti del fenomeno sono necessarie prove sperimentali che simulino lo *spalling* nelle condizioni di progetto.

Un incendio in galleria non ha delle conseguenze solo sul calcestruzzo ma anche sulle armature in acciaio. I metalli esibiscono una naturale espansione e una riduzione delle caratteristiche di resistenza meccaniche se sottoposti ad aumenti di temperatura. Per esempio, a 700°C la resistenza delle armature in acciaio viene ridotta di 20% rispetto alla temperatura ambiente di esercizio. Acciai a basso contenuti di carbonio sono noti per mostrare una irregolarità tra i 200°C e i 300°C. Come conseguenza del fenomeno è raccomandata la protezione delle armature in acciaio dalle temperature maggiori di 250-300°C (Wetzig, 2001).

Come molti materiali, anche il calcestruzzo esibisce una espansione termica. Questo porta ad una flessione degli elementi in calcestruzzo con possibile innesco di rottura. Questo effetto è particolarmente significativo nella parte centrale della calotta. L'espansione termica di acciaio e calcestruzzo è simile nell'intervallo di temperature tra 0-400°C, ma a temperature maggiori il comportamento di espansione termica è significativamente differente, e questo porta al danneggiamento del calcestruzzo armato (Wetzig, 2001). Generalmente i supporti in gallerie scavate sono fortemente armati, infatti in fase di esercizio le armature sono debolmente caricate. Le armature sono progettate principalmente per supportare i carichi durante la fase di costruzione (come ad esempio la spinta di avanzamento esercitata dai martinetti delle TBM) ma in fase di esercizio risultano sovradimensionate poiché i supporti dovrebbero essere sottoposti a tensioni di pura compressione (Van der Graaf, C., & Wolsink, 1999). Segue quindi che le misure di protezione antincendio sono utilizzate esclusivamente per prevenire lo *spalling*.

Questo non avviene in gallerie realizzate con metodo *cut and cover* e le *gallerie immerse*. Queste gallerie generalmente sono costruite con calcestruzzo meno denso, più poroso e le armature in acciaio sono necessarie per prevenire il collasso della calotta (Both, van de Haar, Tan, & Wolsink, 1999). Il maggiore livello di porosità e la minore resistenza del calcestruzzo, combinate con la tipologia di sezione (rettangolare), portano al fatto che il meccanismo di collasso, in fase di incendio, non è necessariamente dettato dallo *spalling*. Di maggiore rilevanza risulta la resistenza meccanica e l'impermeabilizzazione della calotta al fine di prevenire il collasso e le venute d'acqua.

Nonostante i fenomeni di rottura sono diversi i requisiti della protezione antincendio sono sempre gli stessi:

- prevenire o posticipare l'aumento di temperature in galleria;
- prevenire o limitare gli effetti dell'eccessivo flusso di calore nei supporti.

I metodi di protezione antincendio si dividono in due categorie principali (Carvel & Beard, 2005):

- Protezione antincendio passiva: come ad esempio innesco di materiali isolanti;
- Protezione antincendio attiva: come ad esempio sistemi sprinkler ad acqua per abbassare la temperatura assorbendo calore interno alla cavità raffreddando le pareti.

4.4 Protezione antincendio passiva

Le misure di protezione passiva prende una delle seguenti tre forme (Carvel & Beard, 2005):

- Uno strato secondario di calcestruzzo o materiale inerte applicato alla superficie interna della galleria;
- Rivestimento: pannelli di materiale protettivo, fissato alle pareti della galleria;
- Aggiunta di alcune fibre, ecc., nella miscela del calcestruzzo da aumentare le sue caratteristiche di resistenza al fuoco.

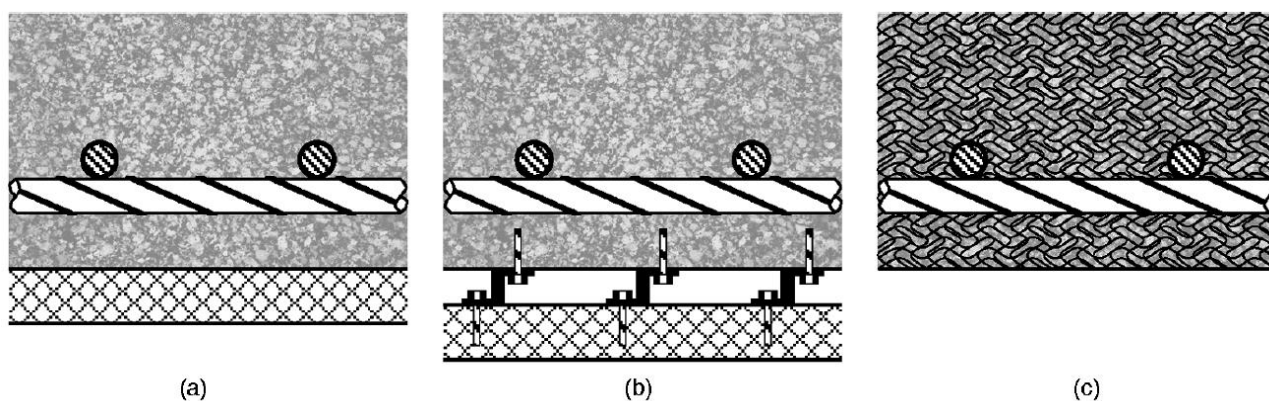


Figura 62 Tipologie di protezione antincendio passiva: (a) secondo strato di materiale isolante applicato direttamente al supporto; (b) pannello di rivestimento; (c) aggiunta di fibre alla miscela di calcestruzzo. (Carvel & Beard, 2005)

Ad oggi non esiste uno standard internazionale o legislazione specifica per il livello di protezione antincendio da usare in galleria. Diversi paesi hanno leggi prescrittive riguardo all'argomento. In questa sede si citano gli standard ZTV-RABT (standard utilizzati in Germania) e gli standard del *Rijkswaterstaat* (standard utilizzati nei Paesi Bassi). In particolare, quest'ultimi richiedono (Van Olst, 1998) (Bjegovic, et al., 2001):

- la temperatura delle armature in acciaio non deve superare i 250°C;
- la temperatura esterna dei supporti non deve superare i 380°C.

Nella progettazione, al fine di determinare l'ammissibilità dei requisiti, vengono usate le curve tempo-temperatura largamente utilizzate per testare le proprietà di resistenza al fuoco degli elementi da costruzione. In questo caso nei Paesi Bassi è stata sviluppata una curva tempo-temperatura sperimentale, in riferimento allo standard sviluppato da *Rijkswaterstaat* assieme alla *TNO* (Van der Leur, 1991) (un'organizzazione di ricerca scientifica).

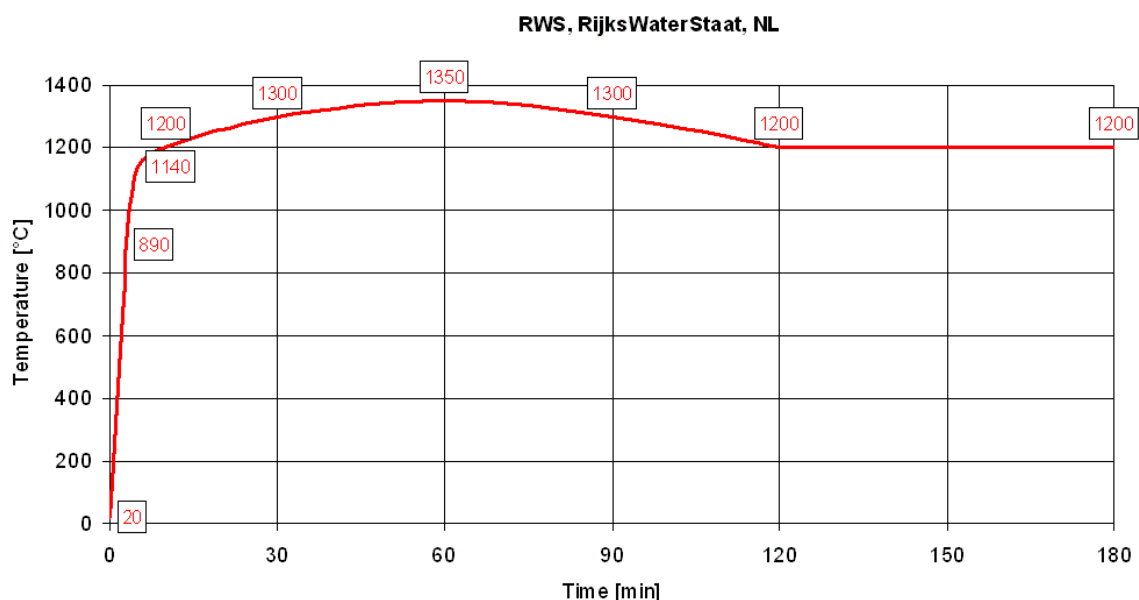


Figura 63 Curva tempo-temperatura elaborata da *Rijkswaterstaat* sviluppata in riferimento allo standard dei Paesi Bassi

La curva mostra una temperatura superiore a 1100°C in 5 minuti e picchi di 1350°C dopo 1 ora. Altre curve sono state sviluppate in Germania come la curva RABT (Ministero Federale Tedesco del Traffico, 2002) (Eisenbahn-Bundesamt). In queste è possibile identificare una differente fase di raffreddamento.

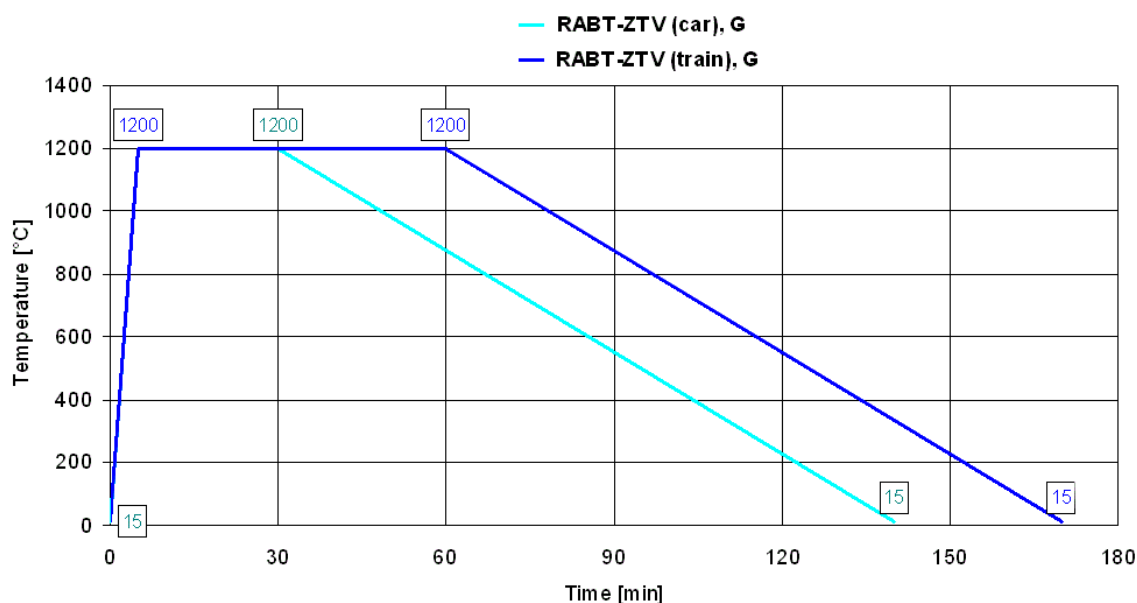


Figura 64 Curva RABT (conosciuta come curva ZTV)

La fase di raffreddamento è particolarmente importante perché in questa fase si evidenziano sperimentalmente i collassi. Durante un test svolto nella galleria sperimentale di Hagerbach (Svizzera) un provino di calcestruzzo ha resistito a temperature fino a 1600°C per 2 ore senza collassare. Tuttavia, dopo 30 minuti nella fase di raffreddamento il provino è collassato in maniera esplosiva (Wetzig, 2001).

4.4.1 Sistemi a strato secondario

Il metodo più semplice e spesso più economico è costituito da uno strato secondario. Questo è iniettato come strato interno al supporto primario. Esso costituisce una barriera termica passiva. Lo strato è spesso costituito da intonaco compatto a base di vermiculite espansa e cemento Portland, da applicare a mano o a spruzzo con macchine intonacatrici a pre-impasto. Atossico, completamente esente da amianto e silice libera cristallina è un prodotto resistente e stabile nel tempo, specificamente studiato per la protezione contro il fuoco di strutture in acciaio e calcestruzzo normale e precompresso, in ambienti ad elevato carico di incendio e rapido raggiungimento del *flashover* come gallerie stradali, ferroviarie e metropolitane. Questo è un materiale inorganico non infiammabile, non produce fumi o rilascia gas tossici ad alte temperature. Sugli elementi di calcestruzzo armato, oltre a garantire il grado di protezione al fuoco richiesto, protegge la superficie più esterna dal fenomeno dello *spalling* (Perlite Italiana). I test svolti (Barry, 1998) mostrano che uno strato di cemento di vermiculite, spesso 23 millimetri, è sufficiente per proteggere i supporti tipici in riferimento ai requisiti degli standard *Rijkswaterstaat*. Altri esperimenti hanno dimostrato che questa tipologia di protezione può far resistere i supporti sotto condizioni di incendio estremo fino a 24 ore. Tecnologie di questo tipo sono facili da riparare in caso di danno. *Cafco* è uno dei produttori principali di barriere termiche passive. Deve però essere prestata particolare attenzione nell'applicazione del materiale proiettato. Deve essere garantito uno spessore costante e sufficiente oltre che una corretta miscelazione degli elementi al fine di garantire una omogeneità delle proprietà del materiale.

Un'altra tecnologia è quella denominata *FireBarrier*, utilizzata nella protezione ai supporti dei rifugi di emergenza della galleria del Monte Bianco. Questa installazione è stata svolta nell'ambito dei lavori di ristrutturazione successivi agli eventi accaduti nel 1999. Questo è un materiale ceramico refrattario a base cementizia.



Figura 65 Montaggio del sistema FireBarrier a protezione dei supporti dei rifugi di emergenza della galleria del Monte Bianco durante la ristrutturazione (Carvel & Beard, 2005)

Le nuove linee guida della galleria del Monte Bianco richiedono che la temperatura interna ai rifugi rimanga sotto i 60°C per 4 ore sulla base della curva tempo-temperatura ISO 834 (International Standard Organisation ISO834).

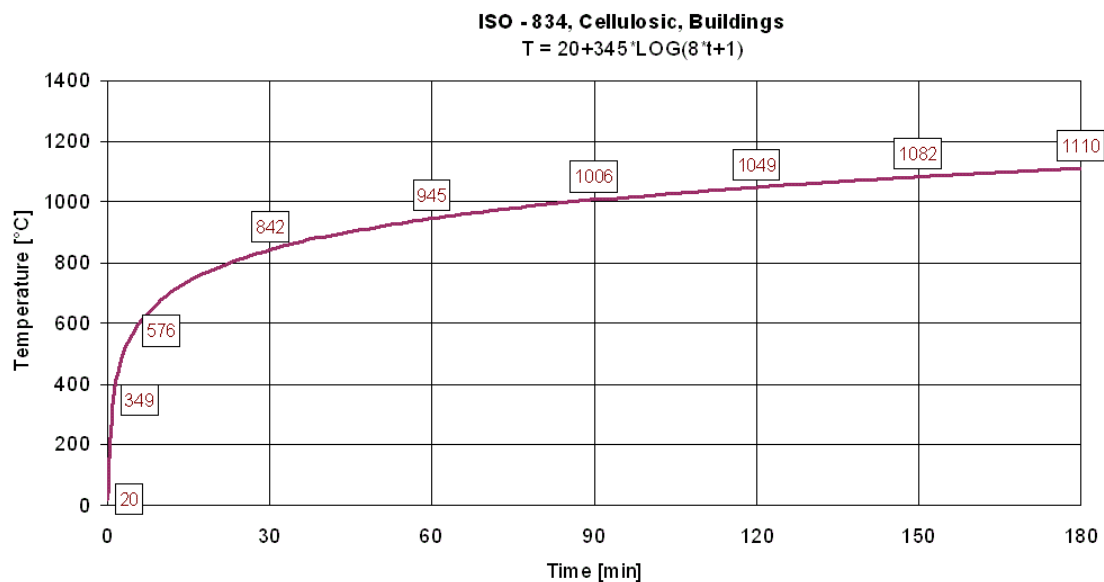


Figura 66 Curva tempo-temperatura ISO 834

La tecnologia ha mostrato migliori prestazioni rispetto all'intonaco a base di vermiculite. Questa tecnologia mostra una maggior resistenza a calore e pressione oltre che maggior resistenza ad abrasione. Ciò porta ad una maggiore durabilità all'erosione di pulizia e manutenzione. La superficie può essere anche pitturata a scopo decorativo. L'alta resistenza meccanica inoltre rende lo strato strutturalmente in grado di ospitare ancoraggi di impianti di illuminazione ecc.... (Beeston, 2002) I prodotti refrattari non vengono applicati direttamente ai supporti della galleria ma sono spesso applicati a sistemi formati di pannelli.

4.4.2 Sistema di protezione a pannelli

Molte gallerie, in particolare gallerie stradali, montano uno strato di supporti secondari costituito di pannelli. Se originalmente i pannelli venivano utilizzati solo a fini estetici, negli anni più recenti questi sistemi sono stati impiegati soprattutto a fini strutturali e di protezione antincendio. Questi sistemi sono costituiti di pannelli omogenei di materiali come silicati di calcio, intonaci a base di vermiculite, fibre di cemento o lana minerale, o sono compositi costituiti da una superficie esterna rigida (come ad esempio acciaio) con uno strato interno di materiale interno come lana di vetro o lana minerale. Questi prodotti sono facili da installare e hanno il vantaggio di essere prefabbricati ed installati in situ. Lo svantaggio di questi sistemi è la loro installazione, che può richiedere diverso tempo, in confronto ad altri sistemi di copertura.

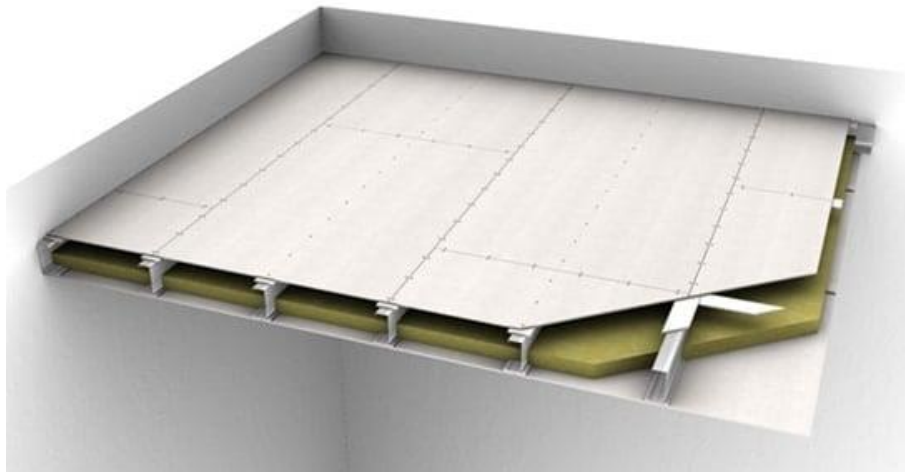


Figura 67 Pannello Promat

Fino a tempi più recenti, i sistemi a pannelli richiedevano spessori minimi di 70 millimetri, ma è noto che recentemente lo spessore dei prodotti nel mercato è diminuito a parità di prestazioni. In riferimento ai sistemi di inerti a base di vermiculite, quest'ultimi per uno spessore di 45 millimetri offrono le stesse prestazioni di pannelli spessi 27 millimetri.

Recentemente è stata sviluppata una tecnologia di supporti antincendio in Germania. Sono pannelli costituiti di materiale ceramico ed acciaio. Si tratta di due lamiere di acciaio smaltate divise da uno strato d'aria di 20 millimetri. La verniciatura protegge l'acciaio ad alte temperature in modo che la struttura non collassi, anche ad alte temperature, persino superiori alla temperatura di fusione dell'acciaio. Su test sperimentali non si è superata la temperatura di 200°C lungo i supporti strutturali nonostante la temperatura esterna avesse raggiunto i 650°C. Tuttavia, sopra la posizione dell'incendio, nella calotta si è raggiunta una temperatura superiore 400°C che non soddisfa i requisiti presentati precedentemente.

Questa tipologia di sistemi non solo isolano termicamente i supporti strutturali più interni ma anche contribuisce al flusso di calore in altre direzioni:

- per riflessione verso l'interno della cavità della galleria;
- per conduzione longitudinalmente tra i pannelli;
- per convezione longitudinalmente tramite il flusso d'aria interna ai pannelli.

Mentre la dispersione di calore può essere benefica a livello strutturale può avere un effetto negativo in quanto può innescare ulteriori incendi.

4.4.3 Additivi al calcestruzzo

Un altro metodo di protezione del calcestruzzo strutturale è rendere il calcestruzzo più resistente al fuoco. Come visto in precedenza lo *spalling* avviene per via dell'innescò di pressione di vapore interno al

calcestruzzo. Se una miscela di calcestruzzo contiene materiali che rilasciano la pressione in maniera più efficiente questo porta ad una resistenza al fuoco maggiore prima della rottura. Recenti studi hanno investigato due tipologie di additivi:

- Fibre di polipropilene;
- Fibre di acciaio.

Lo scopo delle fibre di polipropilene nella miscela di calcestruzzo è permettere l'espansione di canali per l'uscita dalla sovrappressione dovuta al vapore acqueo durante l'incendio (Wetzig, 2001). Lo scopo dell'introduzione di fibre acciaio è quello di incrementare la duttilità del calcestruzzo aumentando la resistenza a pressione interna e ritardando lo *spalling*.

I risultati di una serie di esperimenti testati su una grande varietà di miscele di calcestruzzi sottoposti a condizione di incendio (ISO 834 e RWS) sono stati presentati durante una conferenza sul tema (Wetzig, 2001). Dalla conferenza sono emerse due conclusioni:

- L'inclusione di fibre in monofilamento di propilene (1 kg/m^3) in un calcestruzzo ad alta densità e bassa porosità hanno ridotto il rischio di *spalling* durante incendi estremi (curva RWS).
- Le fibre di acciaio non hanno contribuito sulla resistenza a *spalling* in assenza di fibre in polipropilene.

Lo studio inoltre ha evidenziato le potenzialità delle fibre monofilamento di propilene rispetto a quelle multifilamento.

4.4.4 Altri sistemi di protezione antincendio passivi

Oltre i sistemi visti precedentemente vi sono anche altri sistemi di protezione antincendio passiva. In questa sede si citano:

- Uso supporti in elementi prefabbricati di calcestruzzo armati già dotati di strati compositi di protezione antincendio (Bjegovic, et al., 2001) (Planinc, et al., 2002).
- Uso di compositi fibro-rinforzati.
- Uso di coperture organiche come prodotti che formano uno spesso strato di schiume che assorbono calore e sublimano in prodotti che a loro volta assorbono calore vaporizzando (Barry, 1998).

L'uso di elementi organici tuttavia può produrre elementi tossici, quindi il sistema non è consigliabile per gallerie a flusso di passeggeri.

4.5 Protezione antincendio attiva

I sistemi di protezione antincendio attiva sono molto usati nelle gallerie. Questi richiedono un'attivazione che può essere manuale oppure automatica. I sistemi maggiormente utilizzati sono:

- Sistema di ventilazione;
- Sistema di soppressione incendi ad acqua.

La capacità degli effetti dei sistemi di ventilazione sugli incendi verrà trattata ampiamente in un altro capitolo.

I sistemi di soppressione ad acqua come sistemi sprinkler, sistemi a diluvio e sistemi ad acqua nebulizzata. Questi sistemi sono ancora ampiamente discussi tra chi è a favore e chi è contrario. Chi è a favore sostiene che questi sistemi proteggono attivamente i supporti e permettono l'esodo delle persone mentre i contrari dibattono sulla incapacità di questi sistemi di estinguere un incendio in un veicolo oltre al fatto che non interagiscono con i vapori di combustibile che potrebbero innescare un successivo di incendio.

Dall'esperienza però si è constatato che la presenza di questi sistemi permette l'avvicinamento dei Vigili del Fuoco all'incendio permettendo il loro lavoro. I sistemi di questo tipo sono generalmente sconsigliati per gallerie stradali. I sistemi sprinkler possono portare a numerosi problemi elencati in seguito:

- L'acqua può causare esplosioni in combustibili ed altre sostanze chimiche se non propriamente combinata con determinati additivi.
- Vi è sempre il rischio che ad incendio estinto vengano prodotti gas infiammabili che possono causare un'esplosione.
- Il vapore acqueo può ustionare le persone.
- L'efficienza di questi sistemi è bassa per incendi interni a veicoli.
- Lo strato di fumi è raffreddato e de-stratificato in modo che ricopra l'intera superficie della galleria.
- La manutenzione può essere costosa.
- I sistemi sprinkler sono difficili da maneggiare manualmente.
- La visibilità è ridotta.

Di conseguenza i sistemi di questo tipo non possono essere attivati prima dell'evacuazione tutte le persone presenti. Sono quindi solo sistemi di protezione strutturale delle gallerie.

A lungo si è dibattuto sul fatto se questi sistemi debbano essere attivati manualmente o in maniera automatica. Nonostante si è arrivati alla conclusione che questi sistemi debbano essere attivati solo ad evacuazione ultimata una risposta unanime sull'attivazione non è ancora stata raggiunta.

4.6 Un sistema di prevenzione o soppressione alternativo: il sistema FirePASS

In questa sede non si può fare a meno di citare il sistema FirePASS (Fire Prevention And Suppression System). Questo sistema si prefigge l'obiettivo di sopprimere gli incendi in galleria controllando la quantità di ossigeno nell'aria all'interno della galleria. Come noto, gli incendi possono avvenire solo in presenza di una certa quantità minima di ossigeno. Se la percentuale in volume di ossigeno nell'aria è inferiore al 16.8% a normali condizioni di temperatura e pressione l'incendio non può avvenire (Kotliar, 2002). Tuttavia, è possibile respirare fino a qualche punto percentuale sotto questo livello di ossigeno. Da numerosi studi inoltre si evidenzia come l'incendio può essere soppresso con il raggiungimento di un livello in volume di ossigeno pari a 16.2%.



Figura 68 Sistema FirePASS

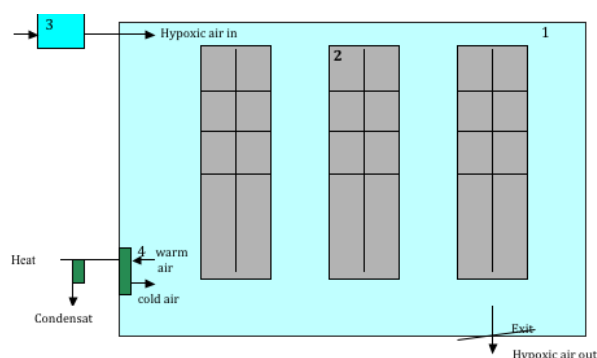
L'idea del sistema FirePASS in prevenzione è quello di mantenere il livello di ossigeno intorno al 15-16% al fine di prevenire l'innesco di qualsiasi incendio. Questo però è possibile (o almeno è raccomandato) per

gallerie ove i passeggeri costantemente rimangono all'interno del mezzo di trasporto e non vi siano scambi d'aria tra l'interno e l'esterno del mezzo. È il caso per esempio delle gallerie ferroviarie, ove i mezzi generalmente non necessitano di ossigeno (mezzi elettrici) e i passeggeri rimangono all'interno del treno. Questo sistema risulta quindi praticabile per gallerie a bassa frequenza di traffico. Il sistema FirePASS non risulta però ottimale nel caso di gallerie stradali, dove la frequenza di traffico è generalmente alta. In questa situazione il sistema FirePASS è utilizzato solo in caso venga rilevato un incendio. Una volta attivato il sistema, la galleria viene inondata da aria ipossica contenente il 10-12% di ossigeno, che rapidamente rimpiazza l'atmosfera presente in galleria. Questo fa sì che si estingua l'incendio in pochi minuti e si evacuino i gas di combustione. Un flusso moderato di aria ipossica viene mantenuto anche successivamente all'estinzione dell'incendio fino alla completa evacuazione di tutte le persone.

Si sostiene che questo sistema mantenga un'atmosfera respirabile, preventiva nei confronti degli incendi e con una pressione tale da impedire all'aria esterna, ricca di ossigeno, di entrare all'interno della galleria e permettere una possibile un nuovo innesco.

Questo metodo tuttavia solleva anche un certo numero di dubbi e questioni. Per esempio, non si conoscono ancora bene gli effetti della respirazione di un'aria contenente il 12% di ossigeno (Angerer & Nowak, 2003) (e contenete anche un alto livello di monossido di carbonio) su differente fasce di popolazione, a partire da giovani in salute ad anziani/disabili. Oltretutto, l'effetto di un minor quantitativo di ossigeno potrebbe avere un'influenza sulle decisioni ed azioni prese oltre che sulla percezione del rischio. In riferimento a quest'ultimo argomento si rimanda a studi più approfonditi come quello di (Pighin, et al., 2012). Il sistema inoltre ha un effetto anche sulla funzionalità dei normali motori a combustibile.

In questa sede si crede di dover dare spazio a intensa attività sperimentale del sistema prima del suo utilizzo, nonostante questo è già ampiamente utilizzato nei *Data Center* per la prevenzione degli incendi.



FirePASS fire prevention scheme in Data Center

1. Protected enclosed area – data center or computer room;
2. Equipment racks;
3. FirePASS® generator;
4. Split a/c system.

Figura 69 Esempio di schema di sistema FirePASS per la prevenzione di incendi in un Data Center (FirePASS)

4.7 Conclusioni

La protezione delle gallerie è una necessità in molti casi. Ha il ruolo di mantenere l'integrità strutturali nell'evento di un incidente, riducendo successivamente i costi di riparazione (diretti e indiretti) in termini economici e di tempo. Tuttavia, questi sistemi devono essere considerati come sistemi che garantiscono la protezione strutturale e non della vita umana. Segue quindi la necessità di uno studio approfondito al fine

dell'utilizzo dei sistemi senza arrecare ulteriori possibili danni alle persone, tenendo in mente il principio per cui la priorità di beni e strutture è di un ordine inferiore rispetto a quella della vita umana.

5 Effetti della presenza dei veicoli a trazione elettrica sugli incendi

5.1 Introduzione

In Italia, come nel mondo, sempre più persone acquistano veicoli a propulsione elettrica o ibrida. La crescita di sensibilità ambientale, oltre che possibili vantaggi economici, invogliano fasce di popolazione sempre più ampie alla scelta di veicoli di questa tipologia. Numerose sono le statistiche e le previsioni sul mercato futuro, ma diversi studi di settore, svolti da analisti, convergono su di un'ipotesi. Questi studi infatti stimano che fra circa 20 anni, la vendita di auto elettriche ed ibride supererà il 50% di tutte le auto vendute.

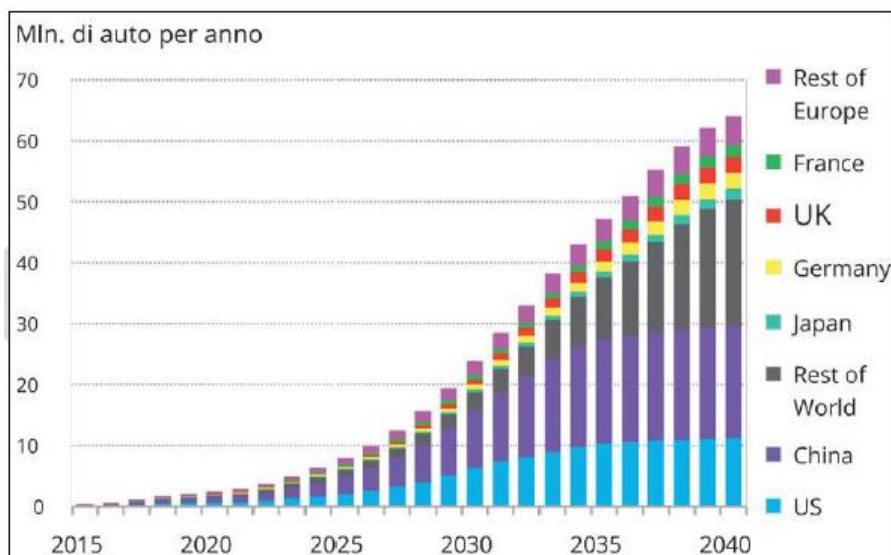


Figura 70 Stima di auto elettriche ed ibride negli anni

Al fine di garantire la sicurezza della popolazione, in particolar modo degli utenti, diverse tipologie di tecnici sono chiamati ad un ruolo di responsabilità nel garantire la sicurezza di quei sistemi e dispositivi che costituiranno quella che sarà la prossima rivoluzione digitale. Se da una parte i tecnici del settore automobilistico hanno il dovere e la responsabilità di garantire la prevenzione degli incidenti nell'utilizzo di questi sistemi, altri tecnici hanno il ruolo di definirne la protezione, mitigando possibili danni e studiando strumenti di emergenza che prevedano i comportamenti degli attori coinvolti nell'incidente. In primis il comportamento degli utenti nei confronti dell'incidente: prevedendo tutta la fascia di possibili persone, dal più sano al menomato e dal più esperto al più ignorante. In secondo luogo, il comportamento e le azioni da svolgere da parte degli operatori chiamati al primo soccorso. Quest'ultimi devono essere formati ed addestrati al fine di possedere nozioni facili e di pronto utilizzo. Viene da sé, che in questi casi la gestione del tempo è di primaria importanza. Si necessita quindi di uno specifico *Piano Operativo Standard* o POS, strumento fondamentale per gli addetti al primo soccorso.

Sebbene la tematica degli incendi che coinvolgono veicoli elettrici è affrontata da qualche anno da enti statali di diversi paesi, come ad esempio gli Stati Uniti, in Italia, si è iniziato ad approcciare il problema solo nell'ultimo anno. Nella scorsa primavera infatti, si è elaborata una bozza recante le prime linee guida di operatività per i Vigili del Fuoco. Sperando in veloci sviluppi futuri, lo scopo della seguente parte è quello di affrontare i fondamenti basilari di quello che sono i problemi principali, mettendo in luce differenze e similitudini del problema ad altre situazioni ormai ben consolidate.

5.2 Sicurezza elettrica nei sistemi di accumulo utilizzati in impianti FTV e AUTOMATIVE

Si vogliono definire alcune linee guida per la esecuzione delle operazioni di soccorso in presenza di sistemi elettrici. Per questo processo si farà riferimento alle norme sul lavoro elettrico sotto tensione e fuori tensione.

Si farà una panoramica sui fattori di rischio che interessano il soccorritore, gli azionamenti elettrici ed i supporti energetici che l'operatore deve conoscere e saper riconoscere

5.2.1 Il *Thermal Runaway* e il rischio di incendio ed esplosione delle batterie agli ioni di litio

Dallo studio degli incidenti avvenuti negli ultimi anni, emerge che il problema principale in termini di rischio incendi per quanto concerne i veicoli elettrici ed ibridi risiede nel fenomeno del *thermal runaway*. Il *thermal runaway* è quel fenomeno che coinvolge le batterie agli ioni di litio. Le batterie agli ioni di litio in determinate circostanze, circostanze del tutto eccezionali, possono portare ad un rapido ed inarrestabile incremento di temperatura. L'aumento di temperatura porta ad una sorta di reazione a catena che porta alla rottura dell'equilibrio termico del sistema e alla distruzione completa delle batterie e della vettura. Il flusso di ioni di litio da anodo a catodo (batteria in uso) oppure da catodo ad anodo (batteria in ricarica) può surriscaldare la batteria fino a far reagire l'elettrolita con altri elementi chimici presenti, aumentando ulteriormente la temperatura fino a produrre gas che, aumentando la pressione interna, producono ulteriore calore. In condizioni di normale esercizio questo aumento di temperatura è tenuto sotto controllo, ma in condizioni estreme o in presenza di gravi difetti di fabbricazione può crearsi un effetto a catena che può portare all'incendio/esplosione della batteria ed alla produzione di fumo fuoriuscente dal blocco batterie (luogo di ubicazione delle batterie). Dagli studi effettuati sulla storia incidentale dei veicoli elettrici, il problema principale riguarda i difetti di fabbricazione del separatore fra anodo e catodo, che dovrebbe evitare il verificarsi di cortocircuito. Oltre i difetti di fabbricazione, l'abuso meccanico, quello elettrico e quello termico possono portare all'innesco di fenomeni di instabilità termica. Si ricorda però che il *thermal runaway* è un fenomeno estremo, ovvero avviene in condizioni estreme. Per esempio, da studi *Tesla* si conclude che il *thermal runaway* potrebbe avvenire se le batterie sono esposte a 80°C per più di 24 ore, o a più di 150°C per alcuni minuti. In ogni caso le batterie devono essere esposte a fiamma diretta.

In Cina nel 2012 si è avuto uno dei primi casi di *thermal runaway*, dovuto a difetti di fabbricazione delle batterie e a materiali scadenti, seguito da diversi altri incidenti avvenuti successivamente, con alcuni incendi che hanno coinvolto vetture Tesla, con grande risalto sulla stampa. Inoltre, dopo l'uragano Sandy, sempre nel 2012, diverse vetture elettriche hanno preso fuoco mentre erano parcheggiate su un molo nel New Jersey. Si trattava di alcune Prius e di ben 16 Fisker Karma. L'indagine rivelò che gli incendi erano dovuti a cortocircuito dovuto alla corrosione salina: le auto erano rimaste sommerse in acqua salata per molte ore. A seguito di questi incidenti, la *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*, un'agenzia federale statunitense, ha condotto uno studio sul rischio incendio connesso alle batterie agli ioni di litio.

Un'interessante presentazione tenuta a Washington il 18 maggio 2011 da David Howell del *US Department of Energy*, ha concluso che le condizioni anomale che possono condurre al *thermal runaway* sono tre:

1. Urti meccanici;
2. Problemi elettrici (cortocircuito, sovraccarico, eccessiva ricarica);
3. Problemi termici (eccessivo riscaldamento dovuto a causa interne oppure cause esterne).

Fra questi, il pericolo connesso a forti urti meccanici è di gran lunga il maggiore. Il principale problema di tipo elettrico è l'uso di materiali scadenti o trasformazioni effettuate dopo la produzione in fabbrica (per esempio veicoli nati *HEV-Hybrid Electric Vehicle* e successivamente trasformati in *PHEV-Plug-in Hybrid Electric Vehicle*),

aspetti che però non riguardano le maggiori case automobilistiche. Uno dei problemi maggiori di tipo termico è legato al cortocircuito, in particolar modo a causa del separatore fra anodo e catodo.

È interessante notare quanto emerso in riferimento agli eventi termici, i quali possono apparire risolti ma continuare in modo occulto e riproporsi dopo diverso tempo, addirittura dopo più giorni; per la limitazione del danno è cruciale che ai soccorritori venga consentito un rapido accesso al pacco batterie.

5.2.2 Veicoli elettrici

Il veicolo elettrico, denominato EV (*Electric Vehicle*), è un veicolo alimentato solamente da energia elettrica accumulata in apposite batterie. L'energia elettrica deriva da rete elettrica, con la quale si ricarica le batterie una volta completato il processo di scarico. Le batterie utilizzate sfruttano tre tipologie di tecnologia:

- Nickel-metil-idrato (NiMH);
- Piombo-gel (PbGel/Silicon);
- Ioni di Litio (Li).

È presente inoltre un sistema di management per la scarica e carica della batteria a seconda della richiesta di coppia del motore (*BMS Battery Management System*).

Poiché si preferisce avere degli azionamenti con motore alimentato da corrente trifase, è necessario interporre tra sistema di regolazione e motore un inverter in grado di produrre la tensione necessaria. Inoltre, il motore è in grado di fungere da generatore recuperando parte dell'energia dissipata in frenata oppure in tratti di discesa.

L'efficienza, in termini di rendimento, è molto buona se confrontata con i veicoli alimentati con motore a combustione interna. Infatti, i motori elettrici garantiscono un notevole spunto avendo una notevole coppia motrice ad un basso numero di giri tra i vantaggi di un veicolo elettrico possono essere elencati i seguenti:

- Zero emissioni allo scarico;
- Recupero parziale di energia (motore-generatore);
- Possibilità di ricarica mediante fonti rinnovabili (impatto zero);
- Notevole affidabilità dei componenti elettrici rispetto alla controparte meccanica e manutenzione ridotta;
- Possibilità di ricarica autonoma mediante stazioni proprie di ricarica.

Oltre i vantaggi, i veicoli elettrici presentano anche qualche svantaggio tecnologico importante. I principali sono evidenziati da:

- Un'autonomia limitata delle batterie;
- Carenza di stazioni di rifornimento per autovetture convenzionali (in Italia).

In entrambi i casi, visto che si tratta di problemi tecnologici, si tratta di ambiti trattati dalla ricerca attuale al fine di limitare o arginare queste due problematiche. Per quanto concerne la manutenzione si tratta per lo più di manutenzione della motorizzazione elettrica, che consiste in una manutenzione che richiede meno sostituzione programmate delle componenti vista la struttura intrinsecamente più robusta. In caso di guasto tuttavia per la riparazione è necessario verificare, in merito alla sicurezza, è necessario verificare con certezza l'assenza di tensione sulle zone di lavoro del manutentore.

MODELLI DI VEICOLI SOLO ELETTRICI

COMPONENTI AD ALTA TENSIONE

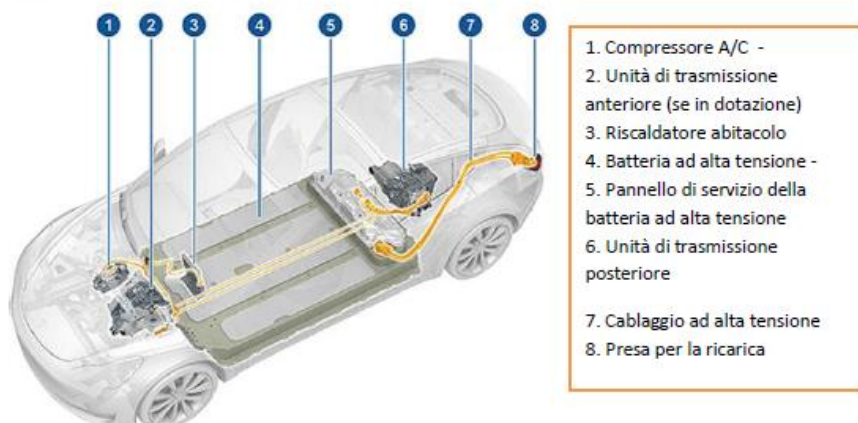


Figura 71 Componenti ad alta tensione dei veicoli elettrici

Di seguito sono riportati i tipici cavi per corrente in alta tensione presenti nell'abitacolo dei veicoli elettrici.

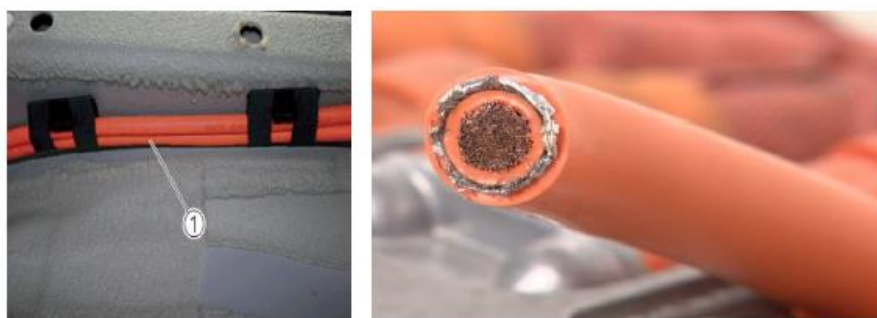


Figura 72 Cavi per corrente in alta tensione

Si mostrano successivamente anche la tipologia *Dual Motor*. I veicoli senza unità di trasmissione anteriore sono simili.

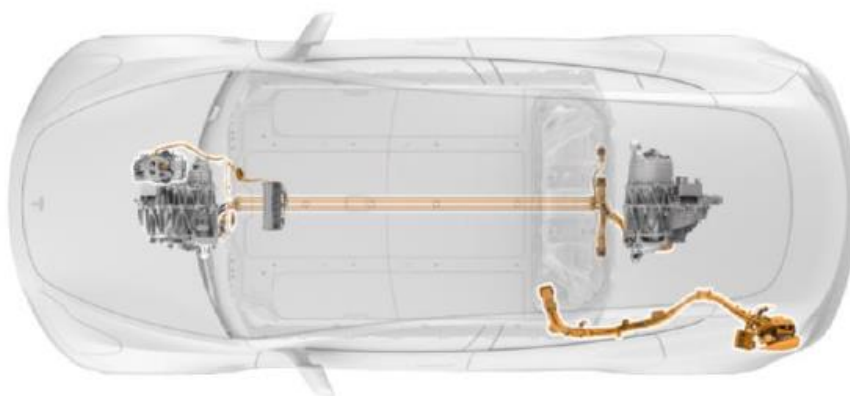
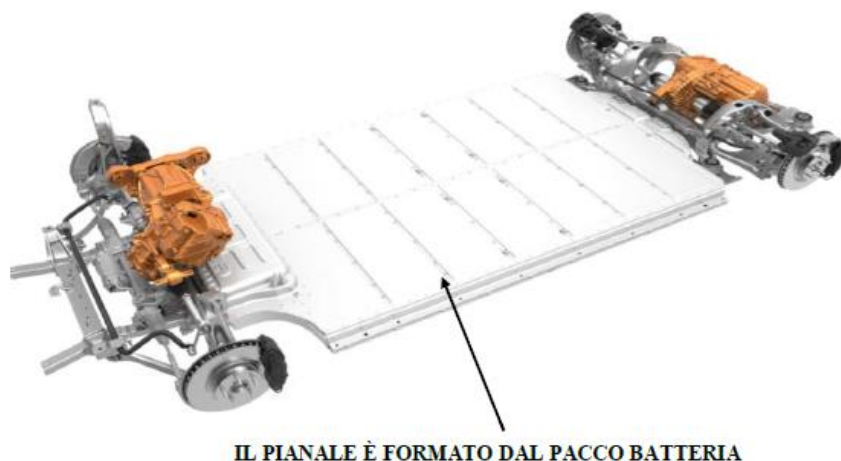


Figura 73 Veicolo elettrico Dual Motor



IL PIANALE È FORMATO DAL PACCO BATTERIA

Figura 74 Pianale formato da pacco batteria

5.2.3 Veicoli Ibridi

I veicoli ibridi sono attualmente la categoria di veicoli più utilizzata in alternativa alle tradizionali auto con motore termico a combustione. La trazione motrice avviene mediante azione sinergica tra motore termico e motore elettrico installati nella vettura. La motorizzazione a combustione interna viene supportata o alle volte sostituita dalla trazione puramente elettrica, rendendo così il veicolo un vero e proprio ibrido, adattabile a diverse situazioni di funzionamento. La scarsa rumorosità, l'efficienza e il basso impatto ambientale rendono il motore elettrico ideale per il percorso urbano, mentre per quanto riguarda il tragitto extra-urbano si può procedere con il normale motore termico. Esistono differenti tipologie di veicoli ibridi presenti sul mercato, che si differenziano per la loro struttura e per l'incidenza che il motore elettrico, installato come ausilio del motore a combustione interna, ha sul funzionamento in strada. Esistono due schemi costruttivi che caratterizzano la struttura di una trazione ibrida:

- Ibrido di serie;
- Ibrido parallelo;
- Ibrido misto, una combinazione dei precedenti (vedi APPENDICE B per approfondimenti).

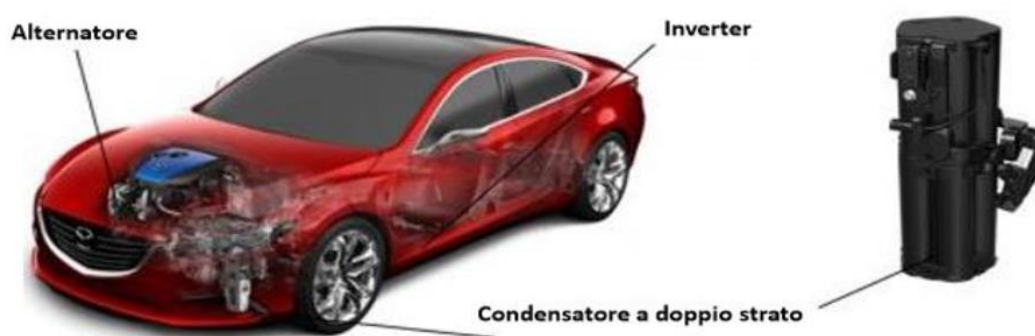


Figura 75 Componenti principali necessari per la fase di avviamento dei veicoli ibridi

Uno degli elementi più rilevanti nei veicoli ibridi è il supercapacitore. Il supercapacitore è un accumulatore in grado di accumulare e poi quando necessario rilasciare una grandissima quantità di carica elettrica in un tempo molto breve. Il suo scopo è quello di fornire durante la fase di avviamento, una sovrapotenza per garantire all'alternatore reversibile, la coppia necessaria (circa 50 Nm) per avviare il motore.

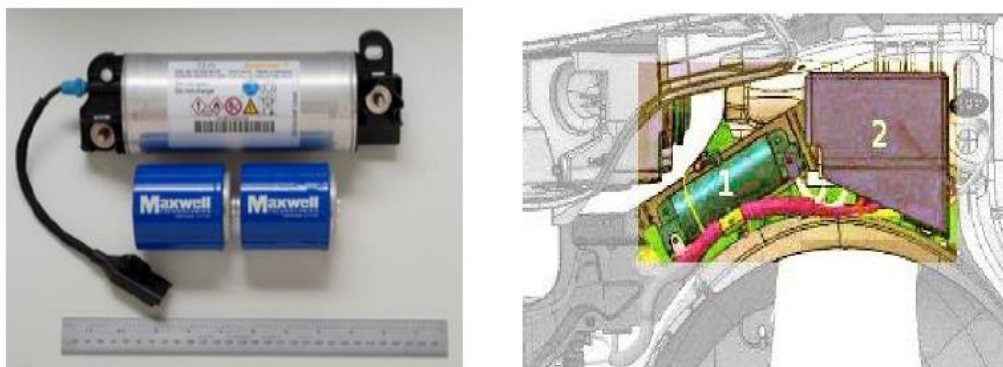


Figura 76 Supercapacitore installato in un veicolo ibrido

Il super condensatore (si trova sotto il passaruota anteriore sinistro), accumula carica e si scarica molto velocemente, generando notevoli coppie. Lo troviamo su vetture con il logo *e-HDI* munite di *start e stop*, è a bagno di **Acetonitrile**, un **dielettrico liquido di colore marroncino**. **In caso di incidente si deve fare attenzione a questo liquido in quanto è molto tossico, inoltre venendo a mancare il dielettrico viene meno l'isolamento elettrico**. Vi è quindi anche un rischio elettrico, oltre che chimico, per gli addetti che si trovano ad operare nel caso in cui vi sia l'incendio di un veicolo elettrico. Se assunto dall'organismo umano esso viene metabolizzato come acido cianidrico (sensazione di ebbrezza accompagnata da emicranie, difficoltà di respirazione e senso di soffocamento, perdite di conoscenza). Occorre dunque prestare attenzione quando si deve intervenire su questi super condensatori: si raccomanda di indossare guanti (per protezione chimica), mascherina e protezione occhi.

5.2.4 Elettronica di Potenza

In un veicolo ibrido l'elettronica di potenza è l'insieme dei dispositivi che monitorano costantemente il flusso di energia elettrica, convertono la tensione da alternata in continua e viceversa (inverter), regolano la frequenza della tensione trifase e controllano il corretto funzionamento dei componenti del sistema. L'elettronica di potenza è costituita fondamentalmente da diodi e transistor al silicio, capaci di gestire tensioni fino all'ordine di 4500 V e correnti fino a 1500 A.

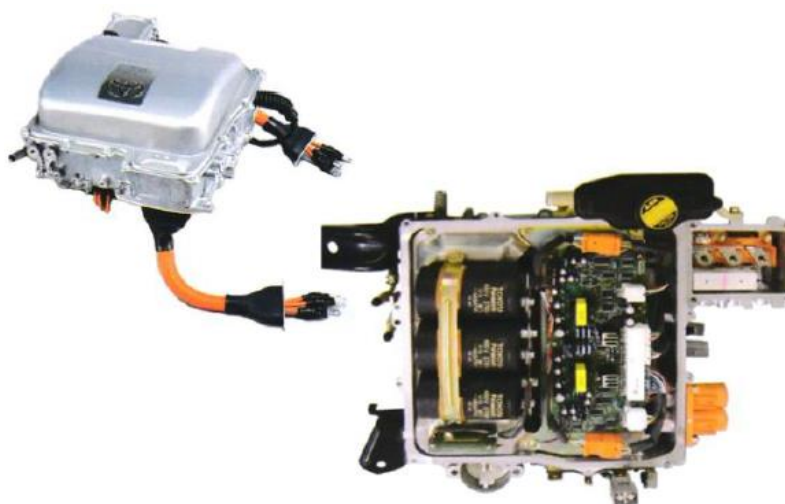


Figura 77 Inverter presente nei veicoli

5.2.5 Inverter per AUTOMOTIVE

Il gruppo inverte, è un assemblato di componenti aventi il compito di gestire e trasformare tutte le tensioni a bordo del veicolo ibrido. Le componenti sono:

- *Inverter* che trasforma la tensione continua della batteria in tensione alternata e viceversa.
- *Buck/Boost converter* che innalza o abbassa i valori di tensione per i vari utilizzatori di potenza.
- *DC/DC converter* che trasforma (abbassandola) la tensione della batteria (da Vcc a Vcc).

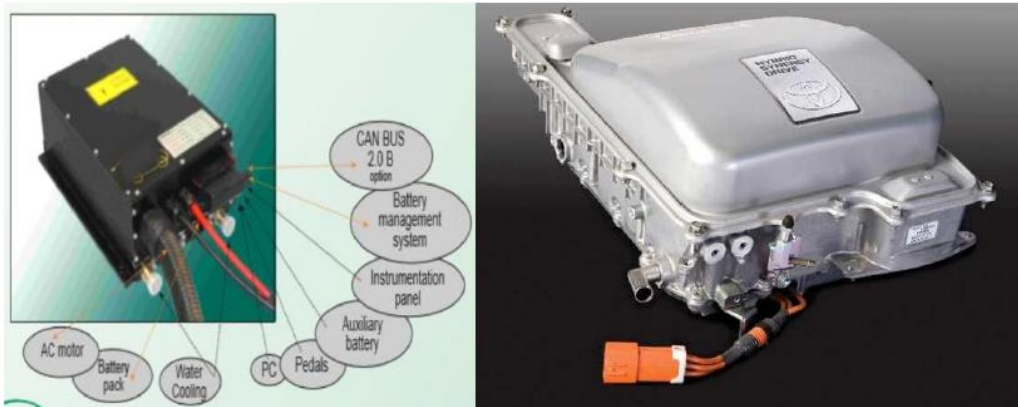


Figura 78 Gruppo inverter

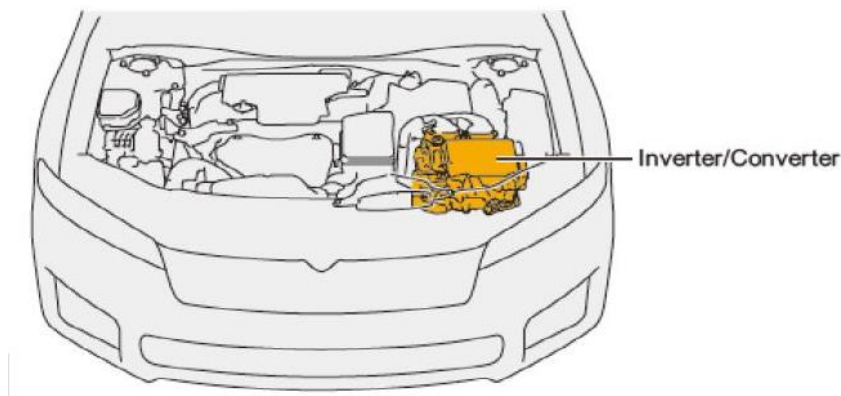


Figura 79 Inverter/Converter

All'interno del gruppo inverter sono presenti dei condensatori che **possono rimanere carichi** anche parecchi minuti dopo lo spegnimento del veicolo.

5.2.6 Incidente in presenza di incendio

Nel caso d'incendio è necessario fare alcune considerazioni: in presenza di ventilazione, operare sopravvento rispetto al fuoco. In questo modo il getto di estinguento verrà spinto contro la fiamma e i residui della combustione con relativi fumi non si indirizzeranno a sfavore degli operatori.

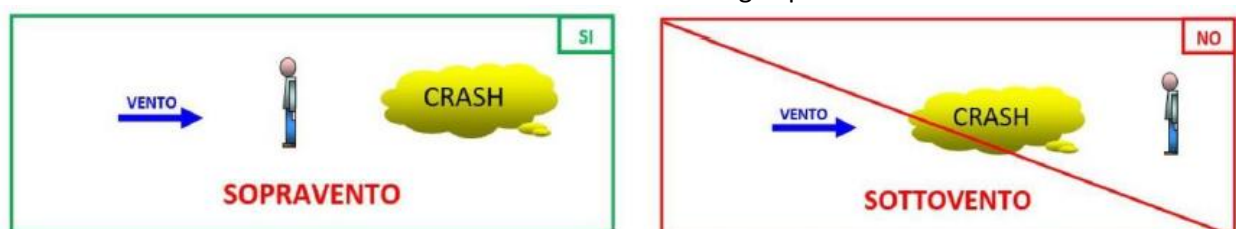


Figura 80 Posizione di operatività in caso di incidente in presenza di ventilazione

In ogni caso, a prescindere dal tipo di vettura e dal tipo di alimentazione deve essere considerato e valutato sempre il rischio di esplosione.

5.2.7 Esplosione nelle batterie

Nel caso di incidente che coinvolga veicoli elettrici o ibridi è sempre presente il rischio esplosione. Vi sono due tipi di possibili esplosioni che possono avvenire nelle batterie:

- Un'esplosione fisica avviene a causa del rapido rilascio di energia meccanica, come nel caso del rilascio di un gas compresso, e non coinvolge direttamente reazioni chimiche;
- Un'esplosione chimica è la conseguenza di una reazione chimica, ovvero di una reazione di combustione, una reazione di decomposizione oppure di altre reazioni veloci ed esotermiche, come le reazioni di *thermal runaway* cui sono soggette le tecnologie *Litio-ione*.

In caso di incendio si possono adottare due tecniche:

- una tecnica difensiva (lasciar bruciare la vettura, naturalmente se non vi sono persone all'interno e tutelando persone e cose);
- una tecnica offensiva, ovvero cercare di spegnere l'incendio.

Le tecniche offensive si basano tutte sul raffreddamento delle batterie. Il miglior sistema per il controllo dell'incendio di batteria agli ioni di litio è l'utilizzo di acqua; in grande quantità e per lungo termine. Lo scopo è sempre quello di raffreddare l'esterno del pacco batterie mediante una grande portata di acqua. In questo caso si deve tenere conto che la quantità di acqua necessaria può essere molto elevata quindi potrebbero essere necessarie più veicoli antincendio.

La procedura di emergenza da seguire nel caso di incendio di un veicolo elettrico o ibrido prevede alcuni step:

- definizione e verifica del numero di veicoli coinvolti;
- identificazione dell'eventuale alimentazione elettrica o ibrida del veicolo;
- immobilizzazione e poi la disabilitazione del veicolo.

Tuttavia, si può verificare il caso in cui l'incendio in corso impedisca la preventiva messa in sicurezza della vettura; oppure l'urto abbia reso impossibile identificare la vettura elettrica come tale. In questo caso è ugualmente possibile procedere all'estinzione utilizzando le normali tecniche per l'incendio di veicoli tradizionali, ed in particolare usare grandi quantità di acqua con angolo di attacco idoneo, grazie al fatto che il pacco batterie ed i circuiti ad alta tensione sono sigillati e non sono in contatto con la carrozzeria. A volte invece può risultare complesso individuare o raggiungere il pacco batterie con un getto d'acqua al fine di raffreddarlo. Dal punto di vista tecnologico è stata varata una soluzione da parte di un noto produttore automobilistico. La soluzione consiste nell'installazione di alcuni coperchi termofusibili sul pacco batterie per agevolare le operazioni di spegnimento consentendo l'introduzione di acqua direttamente all'interno della batteria. Si ricorda inoltre che nel caso di batterie agli ioni di litio è possibile che si verifichi la proiezione di materiale incandescente in presenza di un surriscaldamento, specialmente quando le batterie sono separate dalla scocca.

I sintomi del surriscaldamento della batteria sono:

- **aumento della temperatura;**
- **crepitio;**
- **fumo.**

È possibile una veloce evoluzione del surriscaldamento.



Archi elettrici dal pacco batteria



Pacco batterie con coperchio termofusibile (Fire-access).



Fire acces, unico punto di accesso, se presente, dove poter "riempire" la batteria di acqua

5.2.8 Conclusioni sugli interventi dei soccorritori

Gli interventi in emergenza, ad opera degli addetti, su una vettura elettrica presentano per i soccorritori maggiori complicazioni rispetto a quelli su vetture tradizionali. Non necessariamente invece si tratta di un intervento più pericoloso dal punto di vista dell'incendio e dell'esplosione, dato che su molti modelli non è presente nessun serbatoio di combustibili liquidi o gassosi. Si tratta in ogni caso di interventi che richiedono una accurata formazione preventiva. Segue quindi la necessità di una preventiva e adeguata formazione degli addetti; soprattutto nelle condizioni di maggior complicazione come può essere il sotterraneo.

La *National Fire Prevention Association* (NFPA), associazione statunitense, ha sviluppato un apposito *Alternative Fuel Vehicle Safety Training Program*, un programma di addestramento in collaborazione con i principali produttori, esperti, vigili del fuoco e varie organizzazioni che si occupano di soccorso. NFPA ha addirittura predisposto un apposito sito web, <http://www.evsaftytraining.org/>, dove si possono recuperare molte, dettagliate ed interessanti informazioni in merito alla sicurezza antincendio dei veicoli elettrici. In tale sito sono disponibili indicazioni per la sicurezza antincendio delle vetture di marca: *Acura, Audi, Azure Dynamics, BMW, Buick, Cadillac, Chevrolet, Dodge, Fiat, Fisker, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Infiniti, Kia, Lexus, Lincoln, Mazda, Mercedes, Mercury, Mitsubishi, Nissan, Porsche, Proterra, Saturn,*

Subaru, Tesla, Toyota, Volkswagen. Inoltre, NFPA ha sviluppato un manuale dove vi sono presenti le informazioni minime necessarie per i vari modelli delle marche di vetture più comuni. Tra le informazioni vi sono la posizione di alloggiamento del pacco batterie, ... Tale manuale può risultare fondamentale agli addetti nel caso di emergenza.

Un altro sito web interessante è <http://www.afdc.energy.gov/>, del *U.S. Department of Energy*, dove si possono trovare dati interessanti anche sulle vetture elettriche.

6 Confronto quantitativo tra incendi con veicoli a combustione interna e a batteria

6.1 Introduzione

Nella seguente sezione si svolgerà lo studio quantitativo antincendio della Galleria San Maurizio. La suddetta galleria, inaugurata nel 2006, si trova nel Comune di Biella, lungo la *S.P. n°338* che collega Biella a Mongrando. La galleria è gestita da una società partecipata (Ener.Bit) per conto della Provincia di Biella. Il progetto elaborato da ANAS è stato realizzato secondo le Linee Guida ANAS vigenti all'epoca, quindi precedenti alle linee guida (ANAS, 2006). La galleria è costituita da due tratti di lunghezza rispettivamente di *830 metri* e di *650 metri* (una zona libera a cielo aperto della lunghezza di *296 metri* è presente tra i due tratti della galleria). La galleria è a doppia canna (con canne completamente separate da un muro centrale in calcestruzzo armato) con flusso unidirezionale a due corsie per ciascuna canna.



Figura 81 Foto della galleria San Maurizio (vista della zona a cielo aperto tra i due tratti di galleria, dove si possono notare le rampe di accesso ed uscita ad una sola corsia (non esistono altre rampe oltre quelle visibili dalla foto)).



Figura 82 si riporta una fotografia aerea della zona della galleria, con le linee gialle indicanti le rampe di imbocco/uscita e la zona intermedia a cielo aperto.

La sezione trasversale di ciascuna canna della galleria ha come dimensioni $8,87 \times 6,68$ metri, della quale $7,5 \times 5,0$ metri sono le dimensioni di ingombro della circolazione dei veicoli. Nella prossima figura la sezione della galleria.

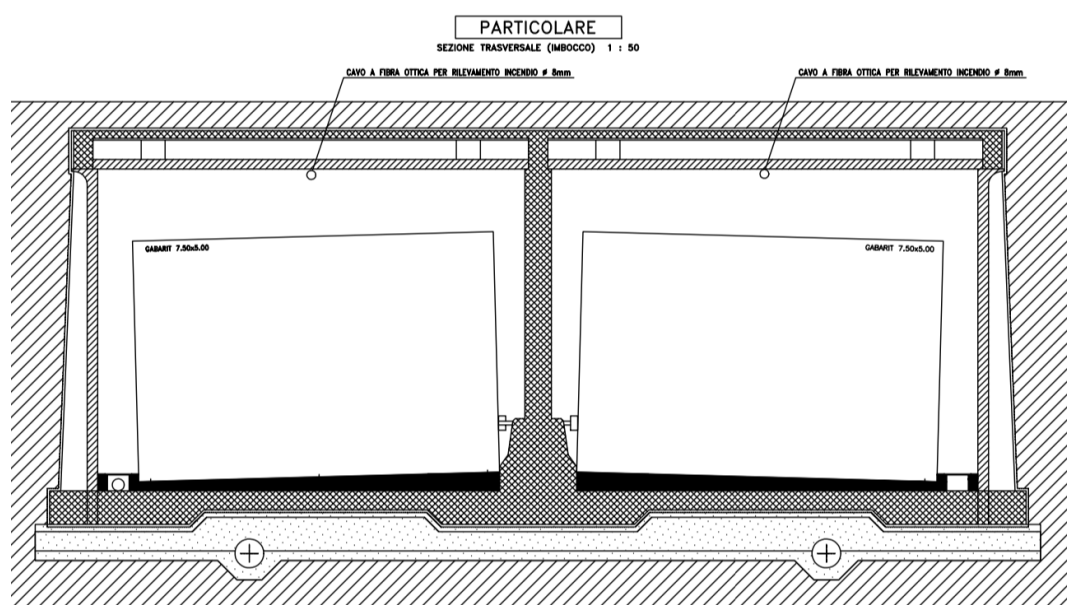


Figura 83. Sezione trasversale della galleria con le due canne e la sagoma di ingombro della circolazione stradale.

Nei seguenti paragrafi verrà svolto una analisi quantitativa degli incendi in accordo alla normativa vigente, ovvero le linee guida (ANAS, 2006), e la letteratura vigente. L'analisi verrà svolta in maniera analitica in accordo alla normativa vigente. In queste sede, al fine di svolgere l'analisi, vengono fatte due ipotesi. La prima riguarda la posizione dell'incendio. In questo caso viene ipotizzato che il focolaio si trovi al centro della

galleria. La seconda ipotesi riguarda la potenza massima del focolaio. Vengono prese in considerazione tre potenze massime d'incendio:

- 8MW, riferita all'incendio di un autoveicolo;
- 50MW, autocarro carico di merce non pericolosa;
- 100MW, autocarro carico di merce infiammabile.

6.2 Calcolo del carico d'incendio

Alla base della progettazione vi è il calcolo del carico d'incendio. In questo caso vengono presi in considerazione tre potenze massimo d'incendio. Consultando le linee guida (ANAS, 2006) si riscontra la successiva tabella recante i dati necessari.

Tipologia della sorgente	E	$\dot{Q}_M$	t_c	t_{max}	t_e	v_a
	[MJ]	[MW]	[min]	[min]	[min]	[m/s]
2-3 Autovetture	15000 18000	8	5	20-25	20	2
1 furgone	40000 65000	15	5	30	15-20	2.5
Iveicolo pesante	125000 150000	30-50	10	50-60	30	3
1 cisterna liquido infiammabile	450000 1000000	100-200	10	60	30	4

Tabella 18 Dati di riferimenti alla costruzione delle curve di carico d'incendio (ANAS, 2006)

In riferimento ai dati forniti dalle Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali. Si sono usate delle curve lineari di crescita e decadimento dell'incendio, in accordo con le norme vigenti. In seguito sono riportati i carichi di incendio ricavati.

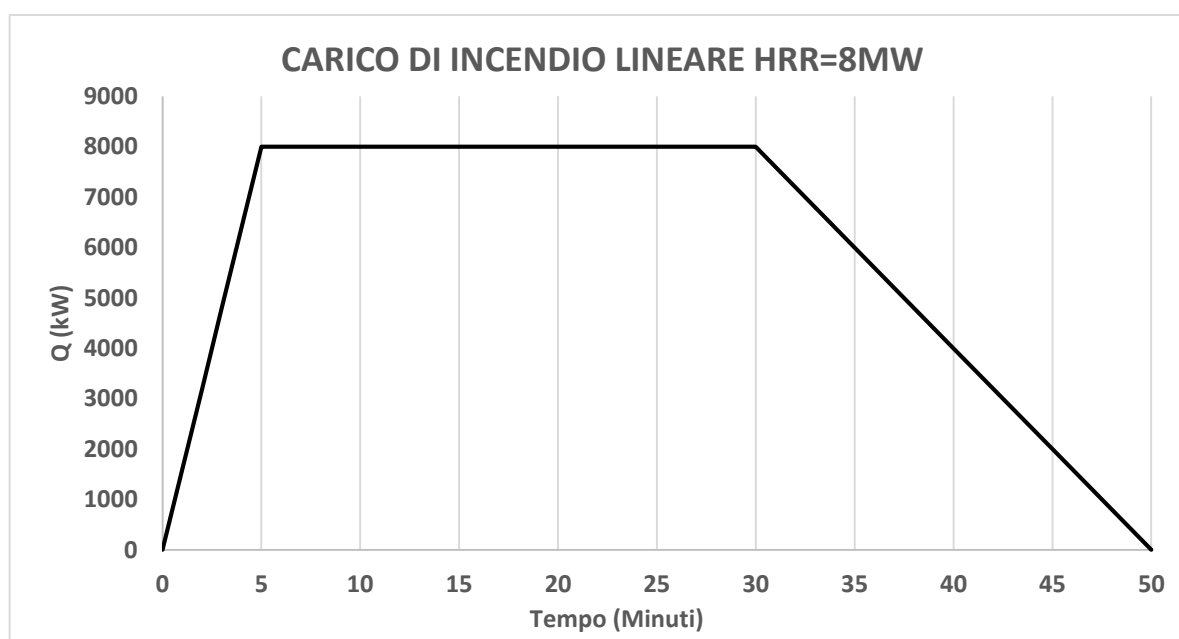


Figura 84 Carico d'incendio per potenza massima di focolaio pari a 8MW

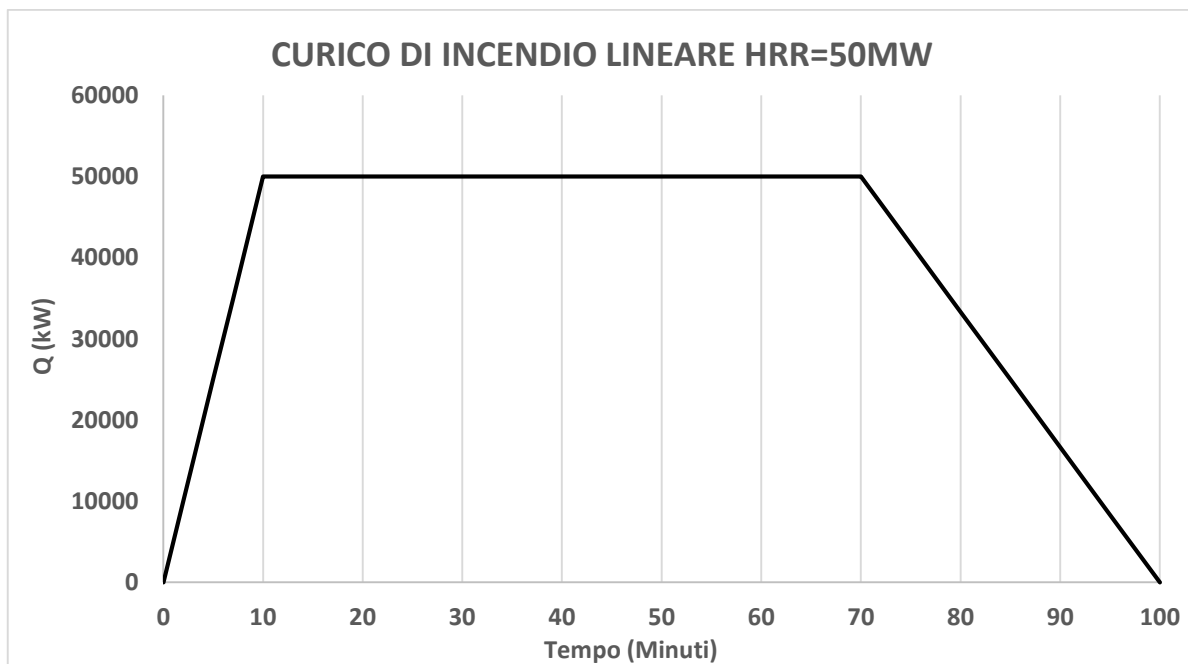


Figura 85 Carico d'incendio per potenza massima di focolaio pari a 50MW

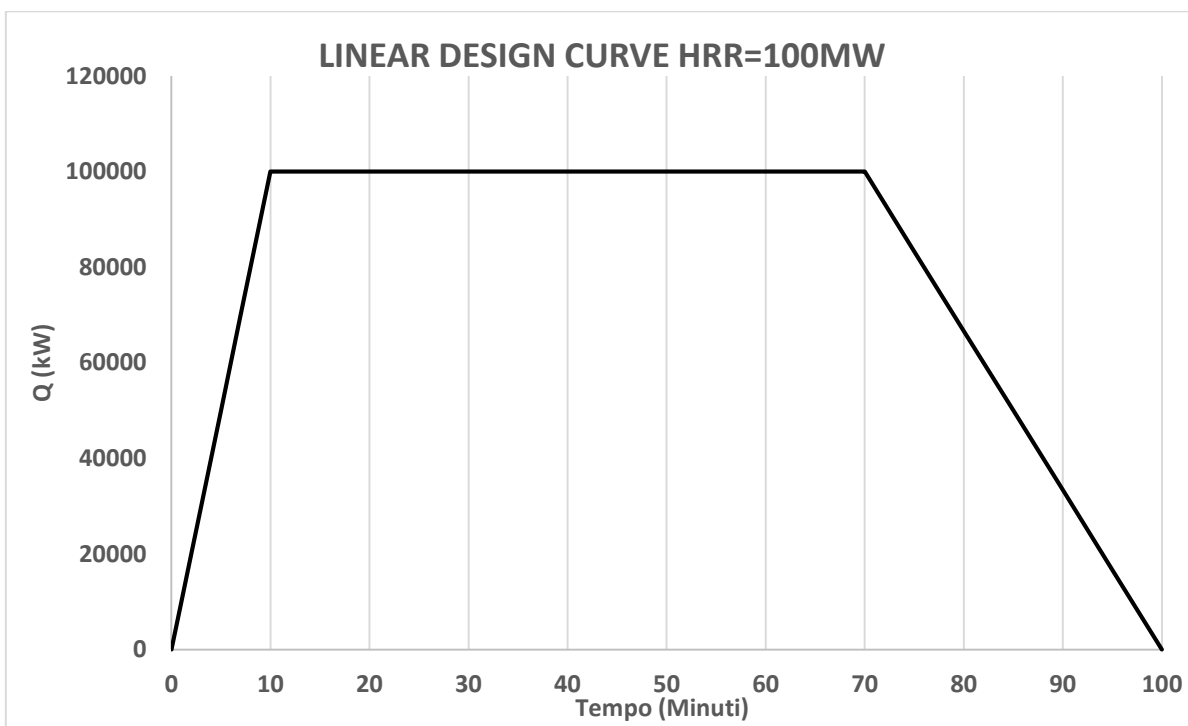


Figura 86 Carico d'incendio per potenza massima di focolaio pari a 100MW

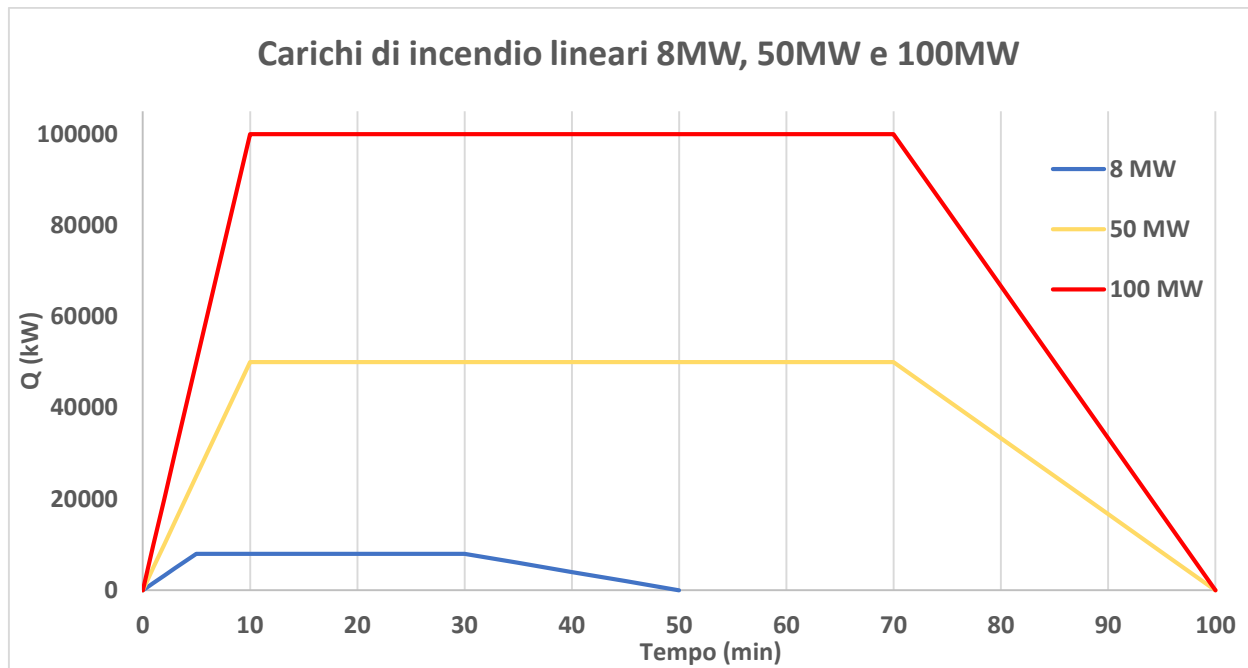


Figura 87 Confronto tra i diversi carichi di incendio 8MW, 50MW e 100MW

6.3 Calcolo del campo temperature medie per i diversi casi considerati

6.3.1 Ipotesi di analisi

Per il calcolo del campo delle temperature lungo la galleria vengono svolte alcune considerazioni, ipotesi e semplificazioni del problema. Si fa riferimento alla teoria illustrata nel capitolo trattato relativo alla *Dinamica degli incendi in galleria*. In primo luogo si fanno le seguenti ipotesi:

- Temperatura media indisturbata dell'aria pari a 20°C;
- Trasferimento di calore solo per via convettiva;
- Coefficiente di scambio convettivo pari a 0.025 kW/m²K;
- Galleria con pendenza nulla;
- Assenza di ventilazione forzata e flusso massimo d'aria dettato dalla dimensione dei portali.

Per quanto concerne l'ultima ipotesi, vista l'assenza di ventilazione forzata, è necessario stimare il flusso d'aria massimo all'interno della galleria. In questo caso si fa riferimento agli incendi compartimentati. Si stima che il flusso massico d'aria massimo sia legato alle dimensioni geometriche delle aperture dalla seguente relazione:

$$\dot{m}_a = \sum_i 0.5 A_i \sqrt{h_i}$$

In questo caso, date le dimensioni geometriche della singola canna della galleria, pari a 8,87x6,68 metri si ricavano le seguenti ipotesi di flusso massimo.

$\dot{m}_{a,max}^*$ (kg/s)	u_{max} (m/s)
83	0,92

Tabella 19 Flusso massimo possibile ipotizzato

Al fine dell'analisi, è necessario conoscere il flusso reale e non il flusso massimo. In questa sede, in assenza di ventilazione forzata, si ipotizza dapprima che il flusso sia dettato dalla quantità di aria necessaria alla

combustione. Quindi, si ipotizza che la combustione avviene stechiometricamente imponendo il parametro $\phi = 1$. Si usa poi la seguente equazione, già trattata precedentemente, per il calcolo del flusso massico.

$$\dot{m}_a = \frac{Q \text{ (kW)}}{3000}$$

Successivamente si comparano i valori trovati con i valori massimi. Chiaramente, al variare della potenza del focolaio cambia anche il flusso interno alla galleria. Per tutti i valori trovati, il valore ricavato è inferiore alle condizioni di flusso massime. Si ricorda che il flusso massico ricavato è un flusso massico medio. Di seguito viene mostrato l'andamento del flusso massico per il caso di incendio con potenza massima di 8MW.

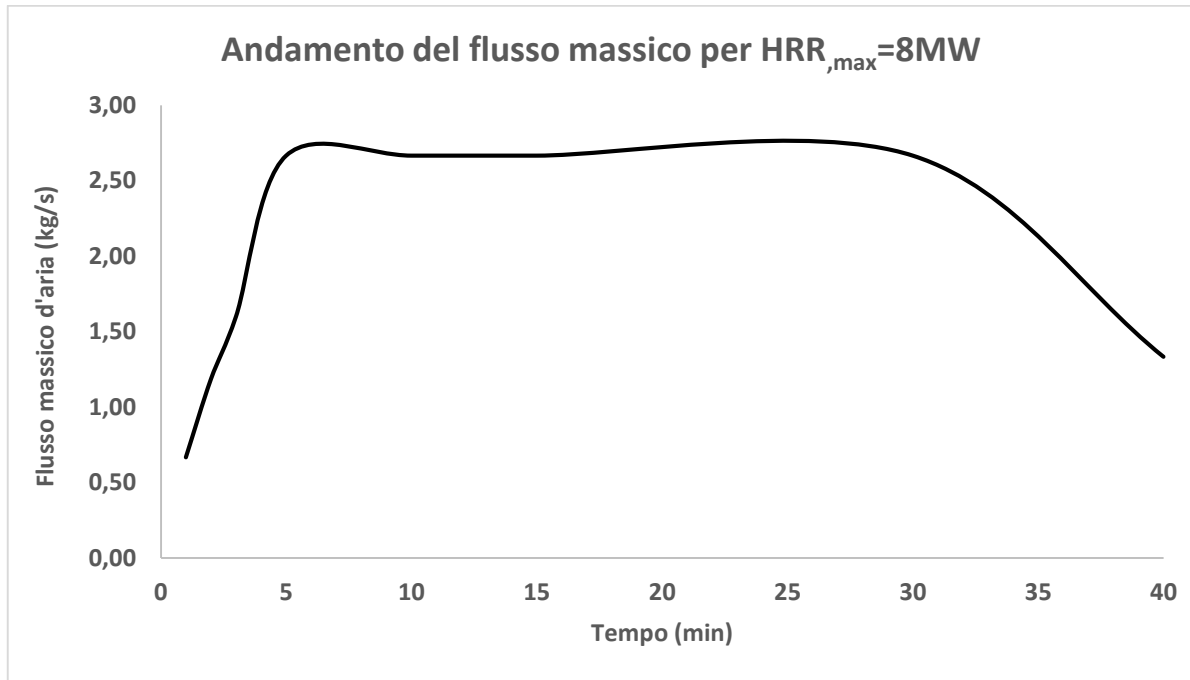


Figura 88 Andamento del flusso massico per un focolaio di potenza massima 8MW

Ricavati i valori di flusso massico si può procedere al calcolo del campo delle temperature come mostrato precedentemente. L'equazione che governa il flusso di energia monodimensionale per il flusso d'aria è:

$$\dot{m}_a c_p \frac{dT_{avg}}{dx} = h_c P (T_{avg} - T_w) + \varepsilon_{g-w} F_w P \sigma (T_{avg}^4 - T_w^4)$$

L'equazione può essere risolta solo per via numerica. Tuttavia si può ricavare una soluzione analitica introducendo l'ipotesi di coefficiente di scambio di energia puntuale h . In questo caso $h = h_c + h_r$. In accordo alle ipotesi presentate, si può procedere ad omettere il termine radiativo h_r , considerando solo la convezione termica. Trascurando il termine radiativo la precedente equazione diventa:

$$\dot{m}_a c_p \frac{dT_{avg}}{dx} = h P (T_{avg} - T_w)$$

L'equazione differenziale di primo grado può essere quindi risolta imponendo le condizioni al contorno di temperatura indisturbata pari alla temperatura ambiente T_a :

$$T_{avg}(x, t) = T_a + [T_{avg, x=0}(\tau) - T_a] e^{-\left(\frac{h P x}{\dot{m}_a c_p}\right)}$$

Dove $T_{avg}(x, t)$ è la temperatura media lungo la galleria al tempo t , $T_{avg, x=0}(\tau)$ è la temperatura media dell'aria nella posizione dell'incendio ($x = 0$) al tempo $\tau = t - (x/u)$. Questo significa che è necessario il tempo (x/u) per trasportare l'energia generata in prossimità dell'incendio fino alla generica posizione x .

Questo parametro è fondamentale durante le fasi di sviluppo dell'incendio e a lunghe distanze dall'incendio. In questa trattazione non è considerato l'aumento di velocità dell'aria dovuto all'aumento di temperatura. Diventa fondamentale conoscere il valore del coefficiente di diffusione h , in questo caso secondo (Carvel & Beard, 2005):

$$0.02 \frac{kW}{m^2 K} \leq h \leq 0.04 \frac{kW}{m^2 K}$$

La temperatura mediata lungo la sezione T_{avg} in prossimità dell'incendio $x = 0$ al tempo τ :

$$T_{avg,x=0}(\tau) = T_a + \frac{2}{3} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a c_p}$$

Questa temperatura dell'aria è decisamente inferiore rispetto a quella delle pareti in prossimità dell'incendio a causa degli effetti di scambio turbolento. Segue che le temperature trattate vanno valutate ai fini dell'esodo e la sicurezza degli utenti e dei soccorritori e non per il dimensionamento strutturale della galleria. Inoltre, si ricorda che la temperatura trovata è la temperatura media lungo la sezione trasversale alla galleria (ipotesi monodimensionale). Noti i parametri costanti mostrati nella prossima figura si può procedere all'analisi.

c_p (kJ/kg K)	h (kW/m ² K)	ρ_a (kg/m ³)
1	0,025	1,2

6.3.2 Caso del focolaio HRR,max=8MW

Si è svolta l'analisi del campo delle temperature medie assumendo come variabile la distanza dal focolaio e tempi di 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 e 40 minuti sulla base del carico di incendio calcolato precedentemente. L'origine del campo è stata posta in posizione del focolaio. In questo caso si sono ottenuto il campo temperature medie mostrato nella seguente figura. L'analisi è stata svolta ponendo l'origine in presenza del focolaio. I risultati trovati si sviluppano lungo un solo verso, tuttavia, sono replicabili simmetricamente anche lungo il verso opposto.

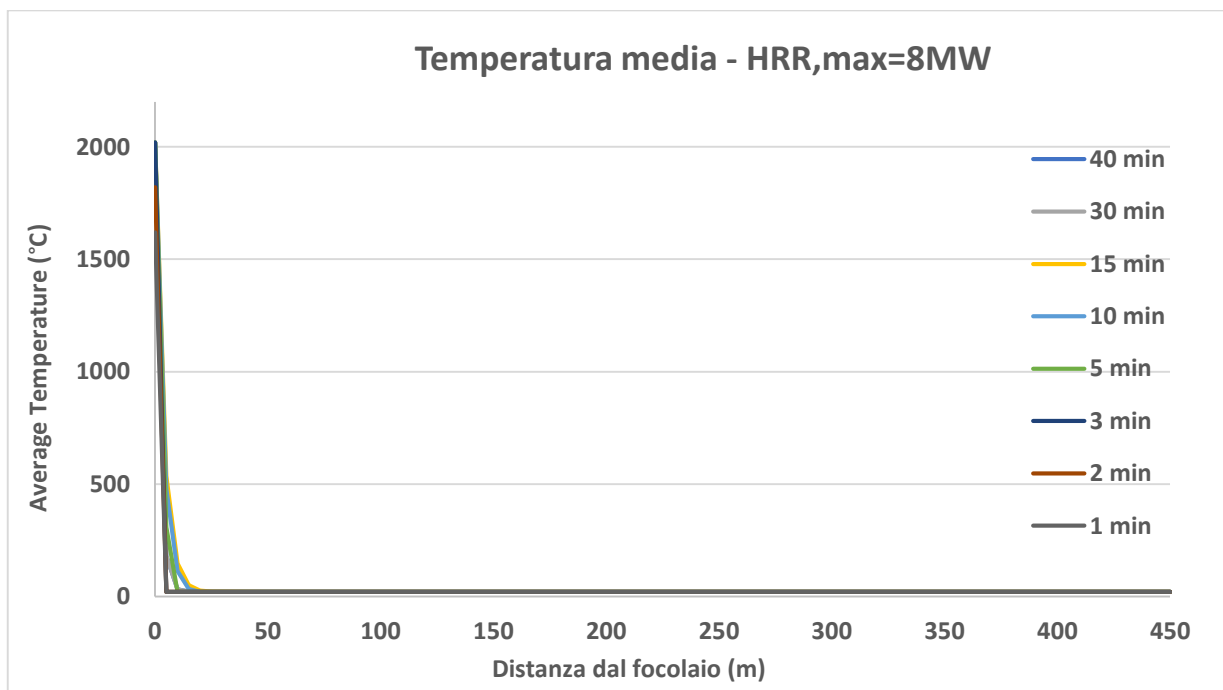


Figura 89 Campo delle temperature per HRR,max=8MW

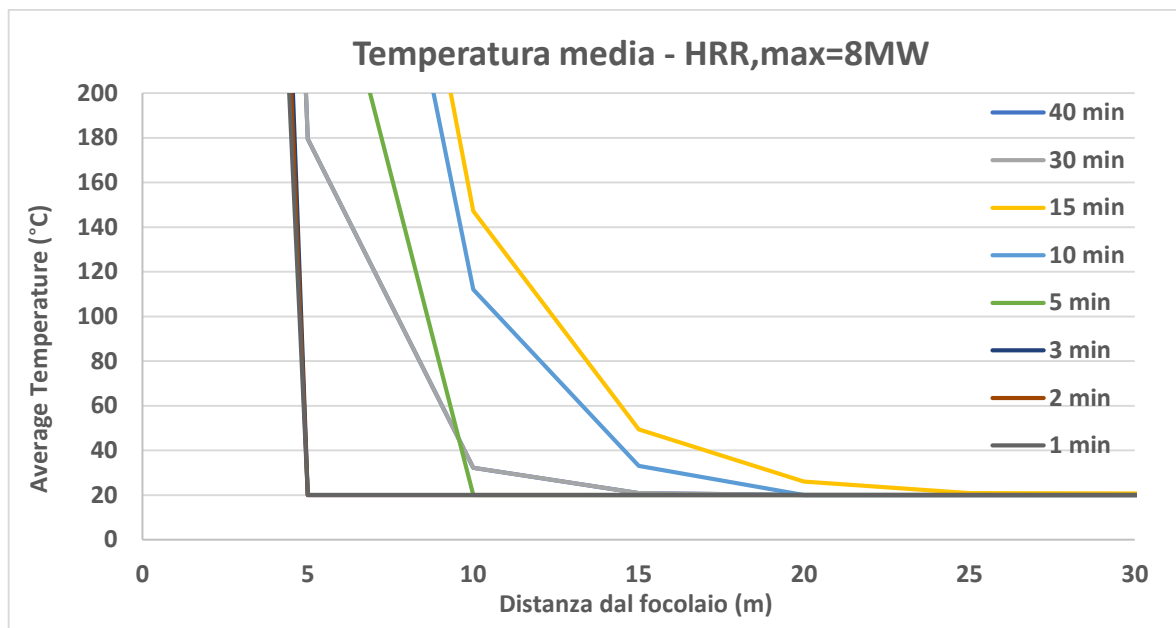


Figura 90 Andamento delle temperature per $HRR_{max}=8MW$

Viene poi svolto uno focus specifico per distanze inferiori ai 30 metri, in quanto questa è l'area di operatività degli addetti alle emergenze. Per questa tipologia di focolaio si può osservare che vi è la piena operatività dei Vigili del Fuoco. Vengono garantiti i requisiti termici di operatività dei soccorsi antincendio.

6.3.3 Caso del focolaio $HRR_{max}=50MW$

Si è svolta l'analisi del campo delle temperature medie assumendo come variabile la distanza dal focolaio e tempi di 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60 e 90 minuti sulla base del carico di incendio calcolato precedentemente. L'origine del campo è stata posta in posizione del focolaio. In questo caso si sono ottenuto il campo temperature medie mostrato nella seguente figura. L'analisi è stata svolta ponendo l'origine in presenza del focolaio. I risultati trovati si sviluppano lungo un solo verso, tuttavia, sono replicabili simmetricamente anche lungo il verso opposto.

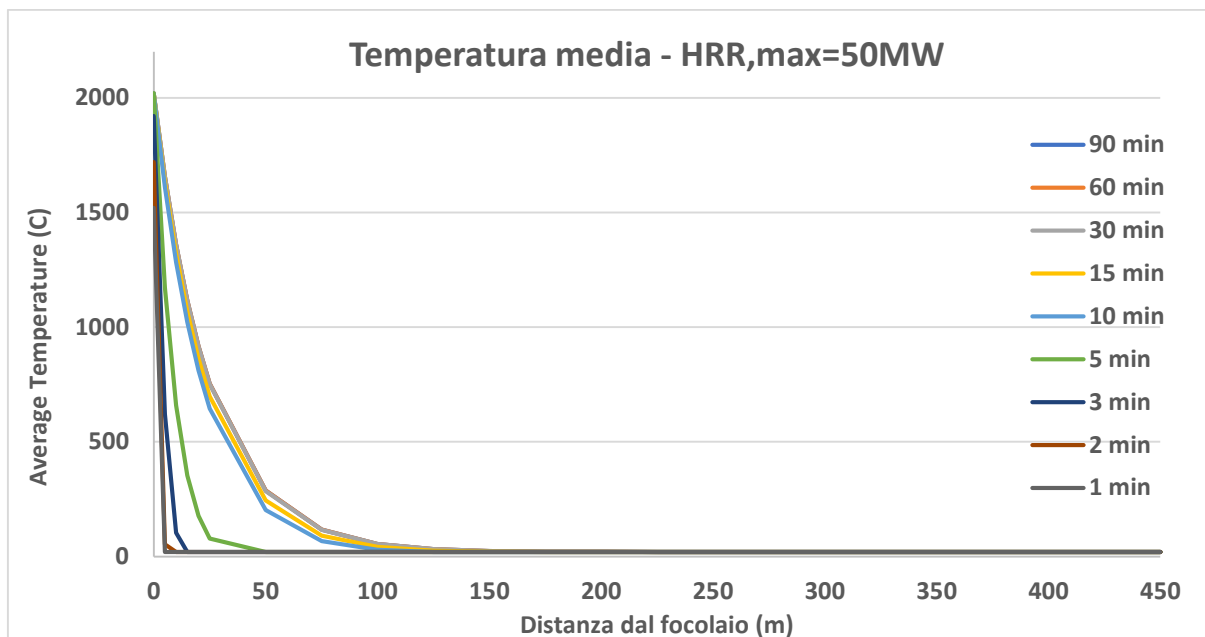


Figura 91 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 50MW

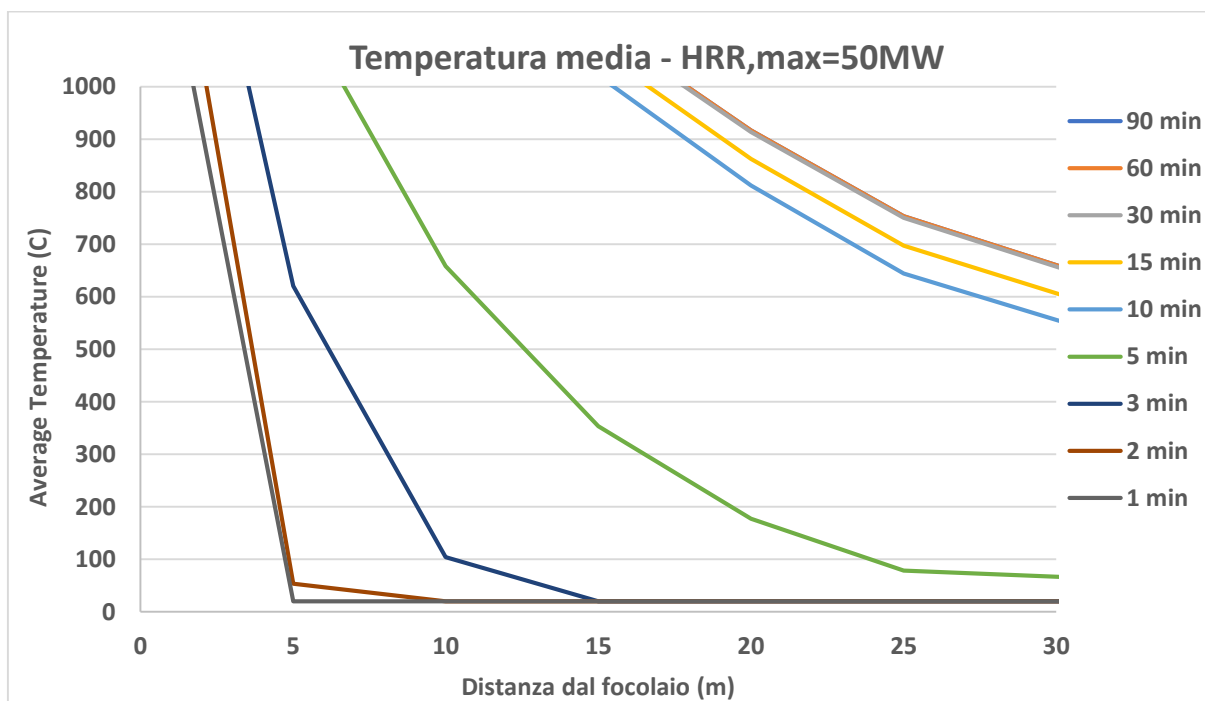


Figura 92 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 50MW

Anche in questo viene svolto uno focus specifico per distanze inferiori ai 30 metri, in quanto questa è l'area di operatività degli addetti alle emergenze. Per questa tipologia di focolaio si può osservare che vi è la piena operatività dei Vigili del Fuoco entro un tempo massimo di 5 minuti. Dopo questo tempo si riscontrano temperature eccessive per l'operatività dei Vigili dei Fuoco. Dunque non vengono garantiti i requisiti termici di operatività dei soccorsi antincendio per tempi superiori a 5 minuti.

6.3.4 Caso del focolaio HRR,max=50MW

Si è svolta l'analisi del campo delle temperature medie assumendo come variabile la distanza dal focolaio e tempi di 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60 e 90 minuti sulla base del carico di incendio calcolato precedentemente. L'origine del campo è stata posta in posizione del focolaio. In questo caso si sono ottenuto il campo temperature medie mostrato nella seguente figura. L'analisi è stata svolta ponendo l'origine in presenza del focolaio. I risultati trovati si sviluppano lungo un solo verso, tuttavia, sono replicabili simmetricamente anche lungo il verso opposto.

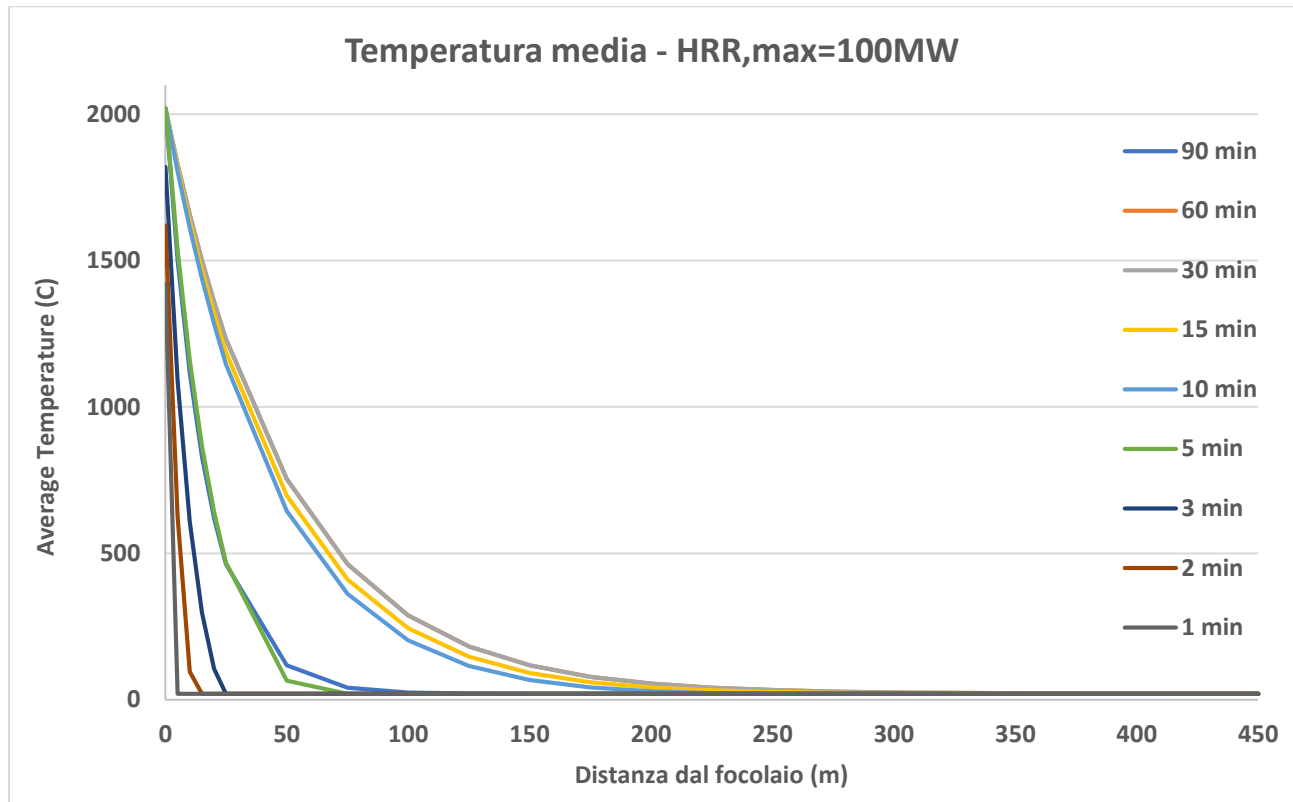


Figura 93 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 50MW

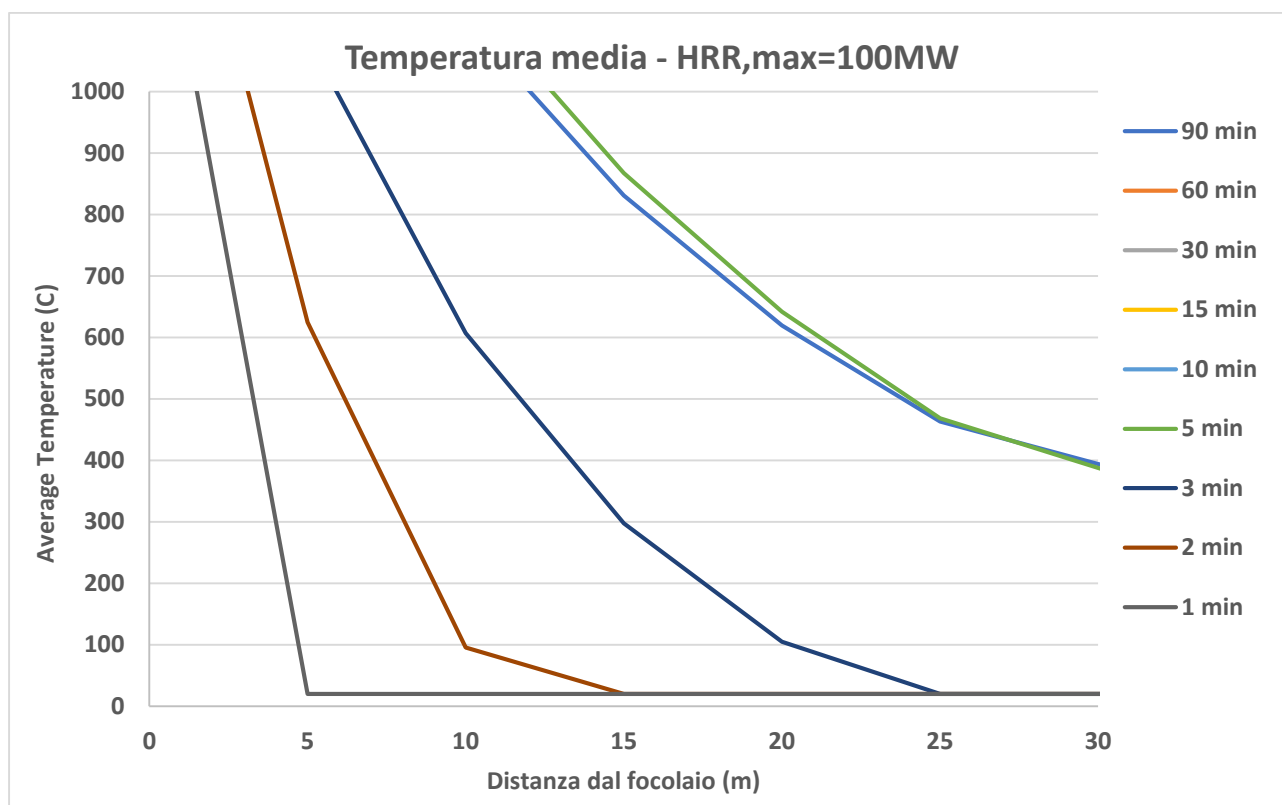
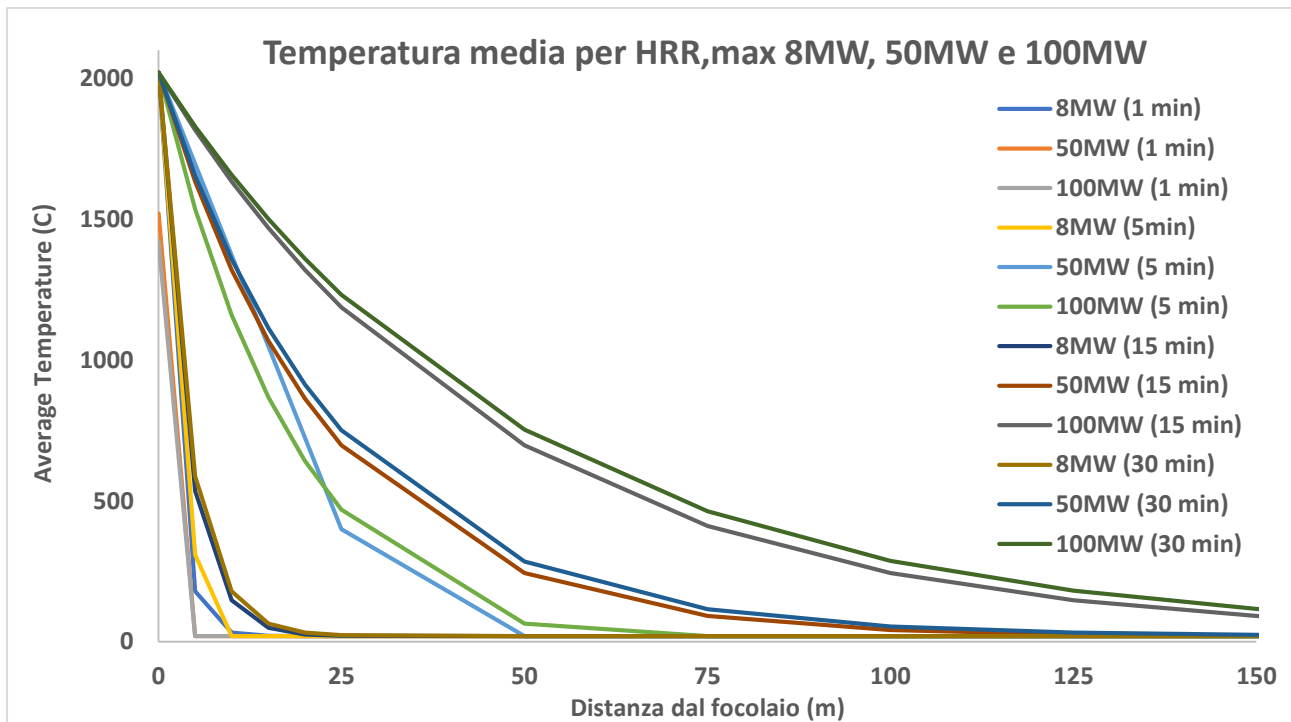


Figura 94 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 100MW

Anche in questo viene svolto uno focus specifico per distanze inferiori ai 30 metri, in quanto questa è l'area di operatività degli addetti alle emergenze. Per questa tipologia di focolaio si può osservare che vi è la piena operatività dei Vigili del Fuoco entro un tempo massimo di 3 minuti. Dopo questo tempo si riscontrano temperature eccessive per l'operatività dei Vigili del Fuoco. Dunque non vengono garantiti i requisiti termici di operatività dei soccorsi antincendio per tempi superiori a 3 minuti.

6.3.5 Confronto dei diversi carichi d'incendio

Di seguito viene riportata la sintesi dei campi di temperature medie per i diversi carichi di incendio. Come si può osservare, all'aumentare del carico di incendio e all'aumentare del tempo la temperatura media osservata incrementa. Per quanto concerne i diversi carichi di incendio si osserva come le isocrone dei focolai 50MW e 100MW siano molto prossime, mentre le isocrone 8MW (a parità di tempo) siano molto distanti. Questo mostra come le temperature medie osservate per 50MW e 100MW siano simili mentre il campo temperature 8MW è piuttosto differente.



6.4 Calcolo del campo concentrazioni medie dei gas

6.4.1 Introduzione ed ipotesi

Al fine di determinare le condizioni di esodo e sicurezza degli utenti e degli operatori addetti al soccorso è necessario valutare anche la concentrazione di diversi gas. Primo tra tutti l'ossigeno, che determina non solo la vita delle persone ma anche il funzionamento dei motori a combustione.

Anche in questo caso l'ipotesi è di campo monodimensionale che restituisca valori di concentrazione media lungo le sezioni trasversali della galleria. Si segue la trattazione svolta nel capitolo *Dinamica degli incendi in galleria* e vengono fatte alcune ipotesi. Primo fra tutti si ipotizza che l'incendio dei veicoli avvenga in maniera uniforme. Inoltre il flusso massico dei gas combustibili viene ipotizzato pari al flusso massico d'aria come si suggerisce in (Carvel & Beard, 2005).

La concentrazione viene calcolata come frazione molare riferita all'aria. La frazione media molare $X_{i,avg}$ delle specie chimiche lungo la sezione della galleria ad una certa distanza a valle dell'incendio può essere calcolata con la seguente equazione:

$$X_{i,avg} = Y_i \frac{M_a}{M_i} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a \chi H_T}$$

Ipotizzando $\dot{m}_a \approx \dot{m}_g$, dove $\dot{m}_g$ è il flusso di gas combustibile. M_a è la massa molecolare dell'aria, M_i la massa molecolare della specie chimica i , Y_i la resa massica della specie chimica i . Le rese delle specie chimiche considerate sono state valutate da letteratura. Per ogni tipo di focolaio, in funzione dei materiali ipotizzati, sono state considerate diversi tipi di specie chimiche e diverse rese di combustione. In generale si sono sempre considerate le specie chimiche più importanti sotto riportate:

- Ossigeno;
- Anidride carbonica;
- Monossido di carbonio.

La frazione molare media di ossigeno nei gas di combustione ad una certa distanza è approssimata dalla seguente equazione:

$$X_{O_2,avg} = 0.2095 - \frac{M_a}{M_{O_2}} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a 13100}$$

Dove 0.2095 è la frazione molare di ossigeno nell'aria in condizione ambiente, M_a è la massa molecolare dell'aria (28.95 g/mol), M_{O_2} è la massa molecolare dell'ossigeno (32 g/mol) e 13100 kJ/kg è l'energia rilasciata per kg di ossigeno.

6.4.2 Gas prodotti della combustione per il focolaio di HRR,max=8MW

Per il focolaio di potenza massima 8MW si è considerato il caso di un normale autoveicolo adibito al trasporto di persone. Il veicolo non trasporta alcun carico pericoloso. Le rese e le specie chimiche più significative sono state sintetizzate dal lavoro di (Lonnermark & Blomqvist, 2006). Di seguito sono riportate le specie chimiche e la resa di combustione.

Specie chimica	Quantità totale (kg)	Resa (g/kg)
CO ₂	265	2400
CO	6.9	63
HCN	0.17	1.6
HCl	1.4	13
SO ₂	0.54	5.0

Tabella 20 Resa chimica durante la combustione di un autoveicolo (Lonnermark & Blomqvist, 2006)

L'origine del campo concentrazioni medie è stata posta in posizione del focolaio. In questo caso si sono ottenuti i campi delle concentrazioni medie mostrato nelle figure successive. L'analisi è stata svolta ponendo l'origine in presenza del focolaio. I risultati trovati si sviluppano lungo un solo verso (analisi monodimensionale), tuttavia, sono replicabili simmetricamente anche lungo il verso opposto. La prima specie chimica analizzata è l'ossigeno.

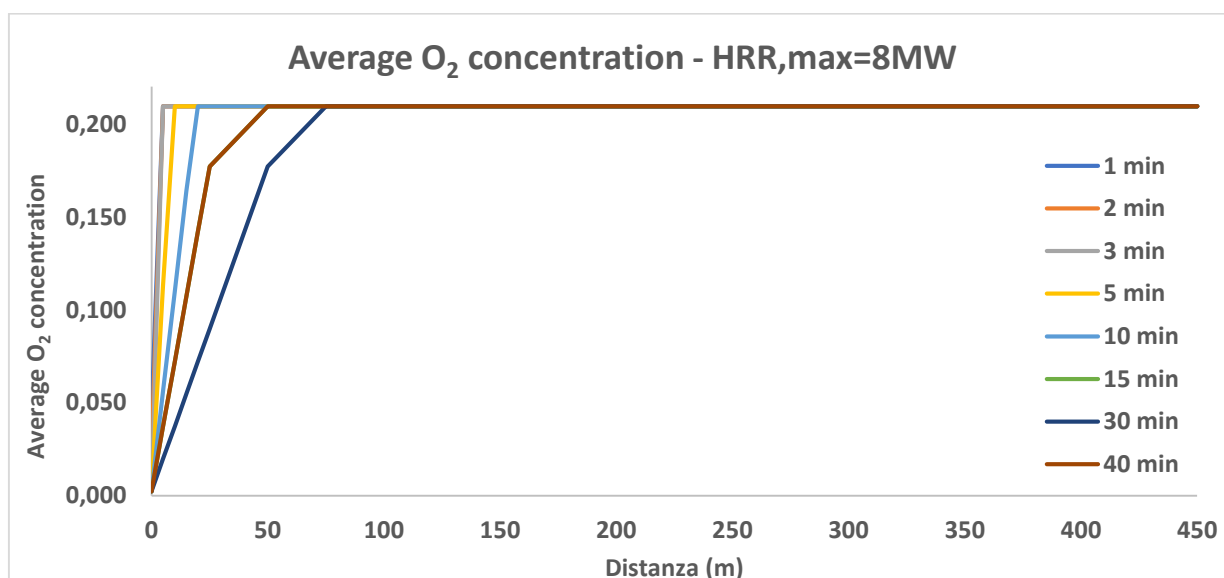


Figura 95 Andamento della frazione molare di ossigeno nell'aria calcolata per diversi tempi

Anche in questo caso siamo interessati ad un'analisi specifica entro i 30 metri in quanto questa è l'area di lavoro dei Vigili del Fuoco e degli addetti alla lotta antincendio. In questo caso al fine di valutare le condizioni di lavoro dei Vigili del Fuoco si fa riferimento alle condizioni di ambiente confinato in carenza di ossigeno. In

particolare, in riferimento alla relazione prodotta da ASSOGASTECNICI (ASSOGASTECNICI & EIGA, 2009) (recepimento delle linee guida prodotte da EIGA a livello europeo), si definiscono i seguenti domini.

O ₂ (%)	Effetti e sintomi
18-21	Non ci sono sintomi riconoscibili da parte della persona colpita. Si deve effettuare una valutazione dei rischi per individuare le cause e determinare se sia o meno sicuro continuare a lavorare.
11-18	Riduzione delle prestazioni fisiche e intellettuali senza che la persona colpita se ne renda conto .
8-11	Possibilità di svenire entro pochi minuti, senza preavviso. Rischio di morte se il tenore di ossigeno è minore dell'11%.
6-8	Lo svenimento si verifica in breve tempo. La rianimazione è possibile se effettuata immediatamente.
0-6	Svenimento quasi immediato. Danni cerebrali , anche se la vittima viene soccorsa.

Tabella 21 Domini e intervalli di risposta alle condizioni di carenza di ossigeno (ASSOGASTECNICI & EIGA, 2009)

In riferimento alla tabella sopracitata si decide di porre il limite di vivibilità in prossimità della concentrazione relativa al 15% di ossigeno nell'aria, una concentrazione dove si ipotizza ci sia una riduzione non eccessiva delle prestazioni fisiche ed intellettuali dei Vigili del Fuoco.

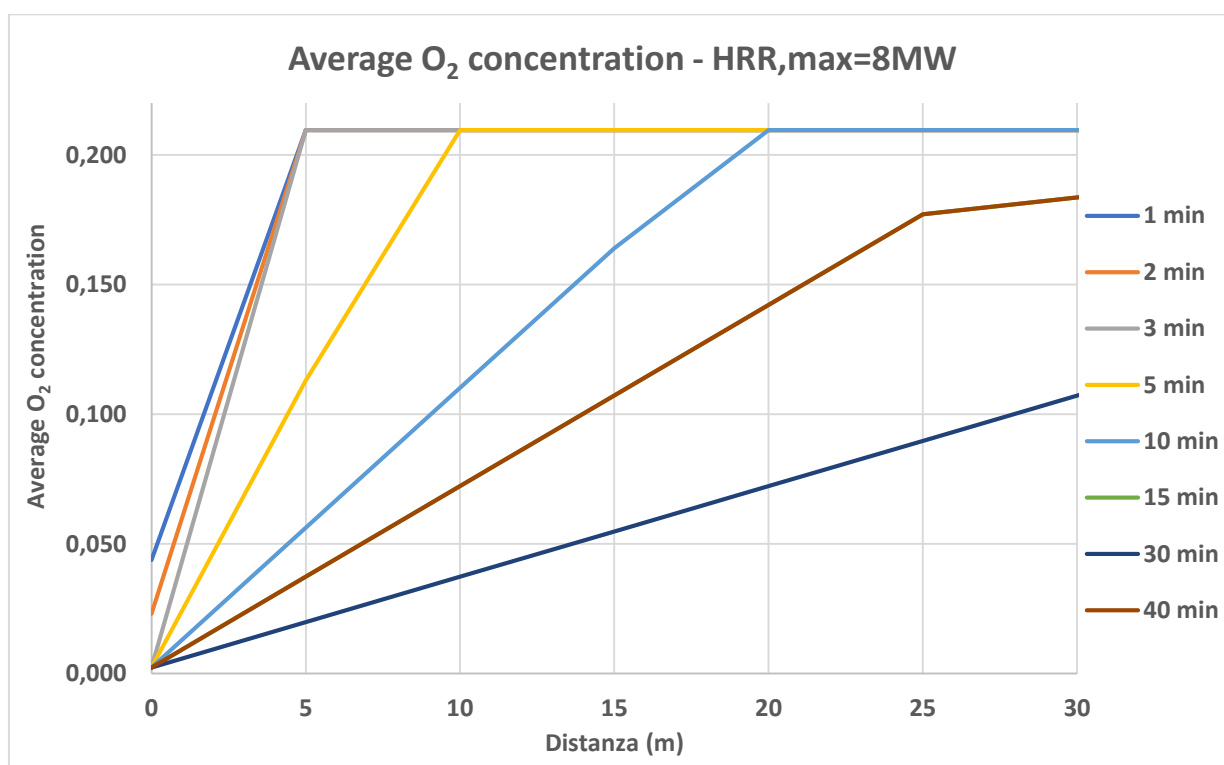


Figura 96 Andamento delle diverse concentrazioni medie di ossigeno nel tempo a diversa distanza

In riferimento al grafico sopracitato si osserva quindi la difficoltà all'intervento dei Vigili del Fuoco tra i 15 e i 40 minuti. In questa sede inoltre non si fa riferimento all'uso di sistemi di respirazione automatici.

Un altro prodotto di combustione a cui siamo interessati è l'anidride carbonica. Questa viene prodotta in quantità considerevole durante la combustione. Come visto precedentemente si calcola l'andamento della concentrazione media di anidride carbonica.

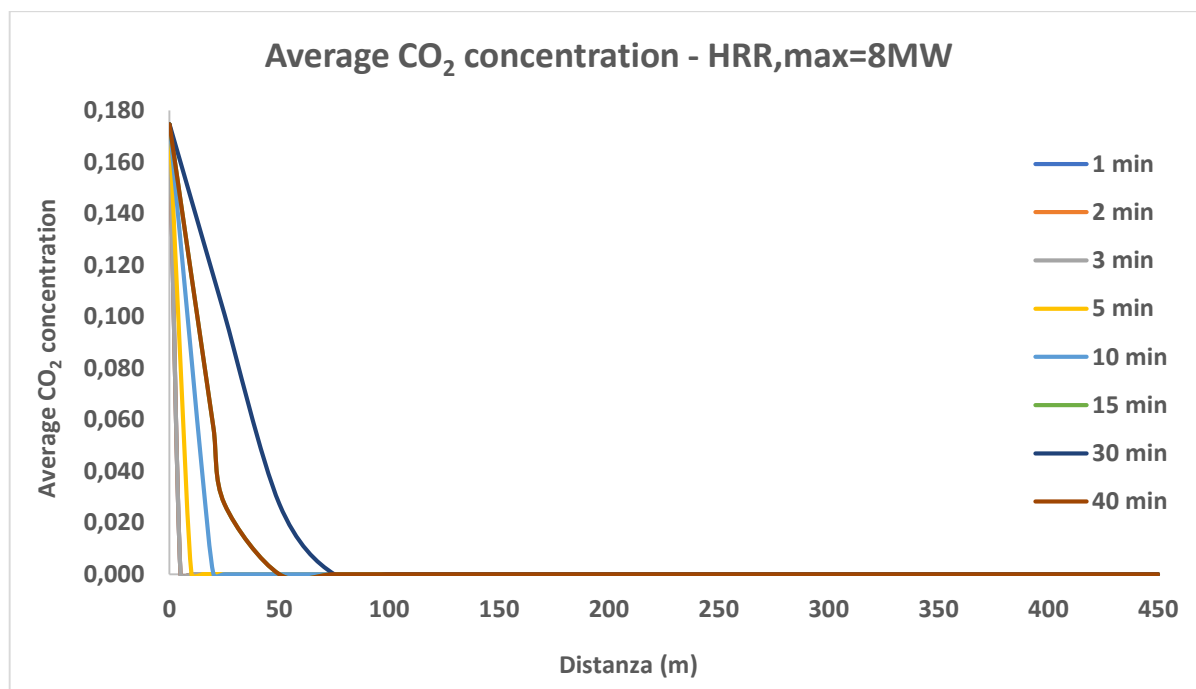


Figura 97 Andamento della concentrazione media di anidride carbonica nel tempo

Il principale rischio connesso con la presenza di CO₂ è il rischio asfissia. Quando la concentrazione di anidride carbonica nell'ambiente incrementa, la capacità polmonare viene compromessa, in quanto vi sono maggiori quantità di anidride carbonica nel sangue e vi è quindi meno concentrazione di ossigeno. Gli effetti dell'anidride carbonica nell'atmosfera sono indipendenti dagli effetti della carenza di ossigeno. L'ossigeno presente nell'atmosfera non è quindi un effettivo indicatore di pericolosità. Per esempio avere un livello accettabile di ossigeno nell'aria (19,5%) e una elevata concentrazione di anidride carbonica (sopra il 5%) è estremamente pericoloso. Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva degli effetti dell'anidride carbonica sull'organismo umano.

CO ₂ concentration in air	Symptoms and effects of inhaling CO ₂
1% - 1.5%	Effetto leggero sul metabolismo dopo l'esposizione di diverse ore
3%	Il gas è debolmente narcotico a questo livello, dando luogo a respirazione più profonda, ridotta capacità uditiva, accoppiato con mal di testa, un aumento della pressione sanguigna e della frequenza cardiaca
4 - 5%	La stimolazione del centro respiratorio si verifica con conseguente respirazione più profonda e più rapida. I segni di intossicazione diventeranno più evidenti dopo l'esposizione di 30 minuti
5 - 10%	La respirazione diventa più faticoso con mal di testa e perdita dei sensi
10 - 100 %	Quando l'anidride carbonica concentrazione aumenta superiori al 10%, perdita di coscienza si verifica in meno di un minuto e se non si interviene pronta, ulteriore esposizione a questi alti livelli finirà per provocare la morte

Figura 98 Effetti dell'anidride carbonica (ASSOGASTECNICI & EIGA, 2009)

Per quanto concerne l'anidride carbonica, anche in questo caso, si vogliono valutare le condizioni di intervento dei Vigili del Fuoco. Come visto precedentemente l'intervento dei Vigili del Fuoco è possibile entro una distanza massima dal focolaio di 30 metri. In questa sede si è deciso di porre il limite di concentrazione di anidride carbonica al 4%. Nei seguenti grafici si mostra la concentrazione di anidride carbonica entro i 30 metri e successivamente la si confronta con la concentrazione di ossigeno nell'aria.

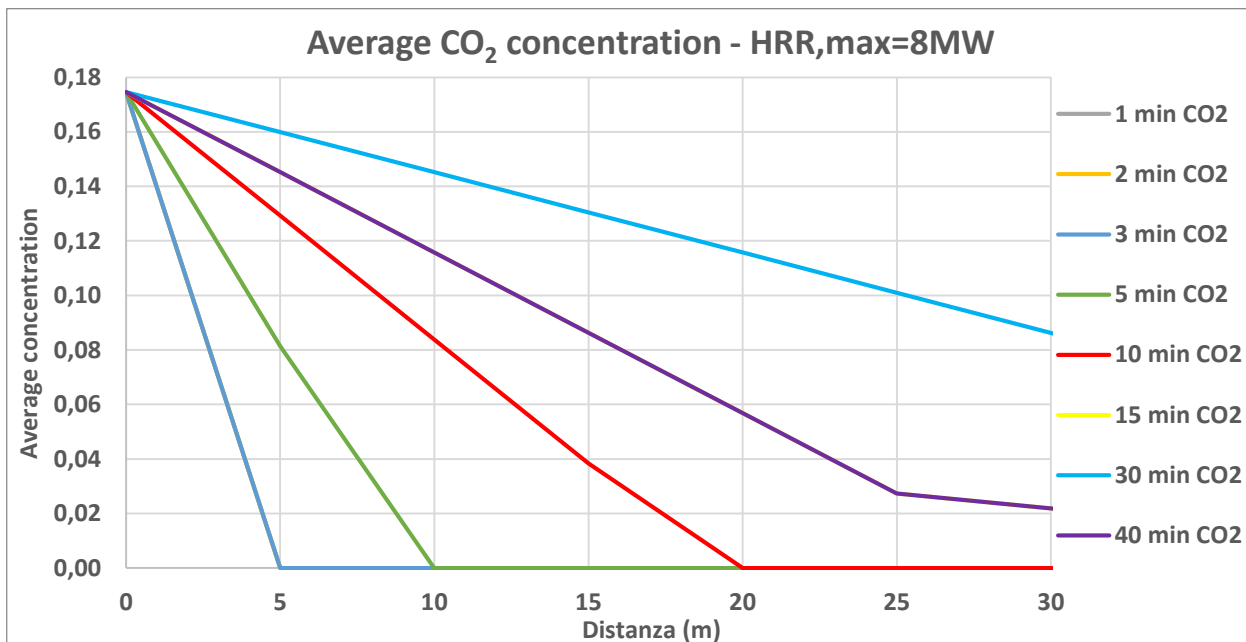


Figura 99 Andamento dell'anidride carbonica nel tempo entro i 30 metri dal focolaio

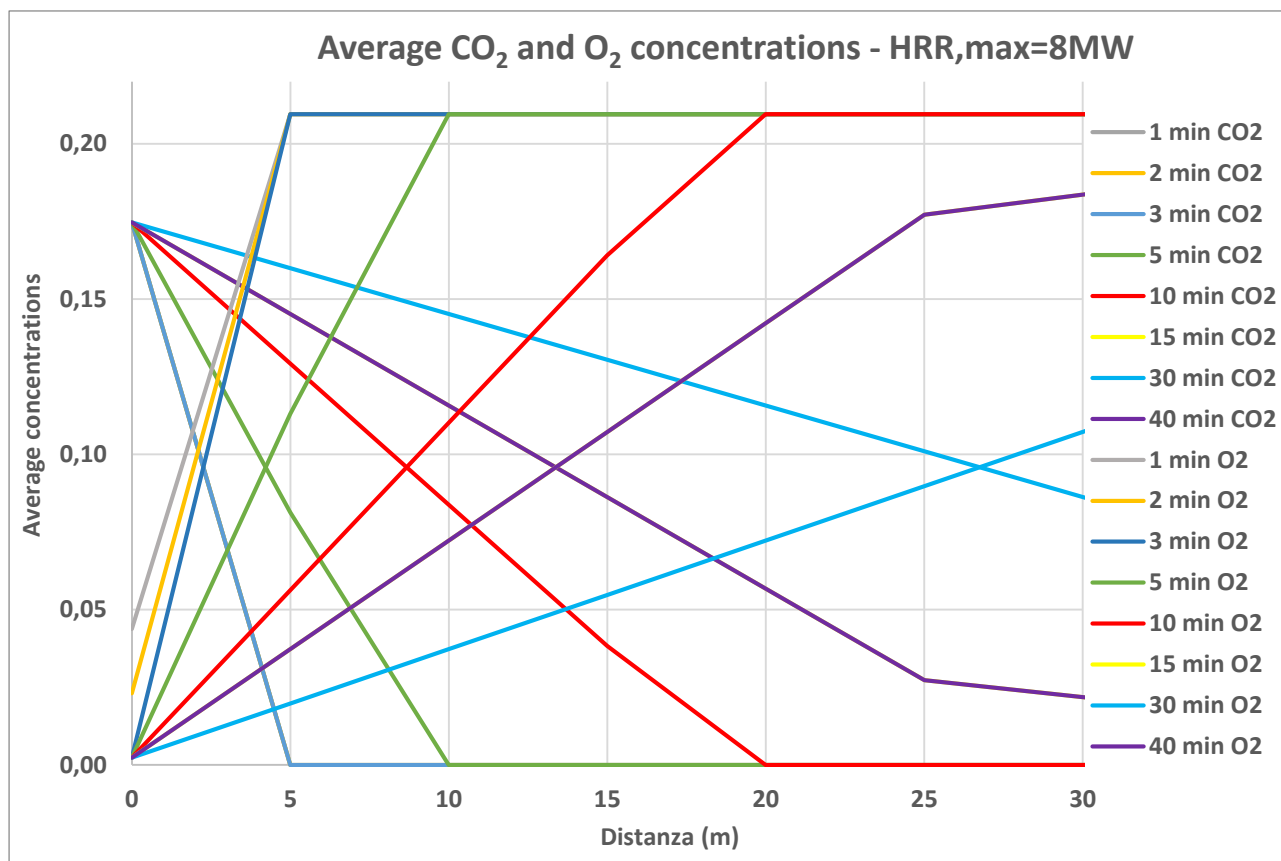


Figura 100 Confronto e valutazione delle condizioni ammissibili per anidride carbonica e ossigeno entro i 30 metri

Dal primo grafico mostrato si osserva come le condizioni di impossibilità di intervento dei Vigili del Fuoco tra i 15 e i 40 minuti valgono non solo per la concentrazione di ossigeno ma anche per la concentrazione di anidride carbonica. Si ricorda come si è valutata la condizione di vivibilità per concentrazioni di anidride carbonica inferiori al 4%.

Successivamente si valuta l'andamento della concentrazione di monossido di carbonio nel tempo. Il monossido di carbonio assume particolare rilevanza tra i prodotti di combustione. Nel seguente grafico viene mostrato l'andamento del monossido lungo la galleria per diversi tempi.

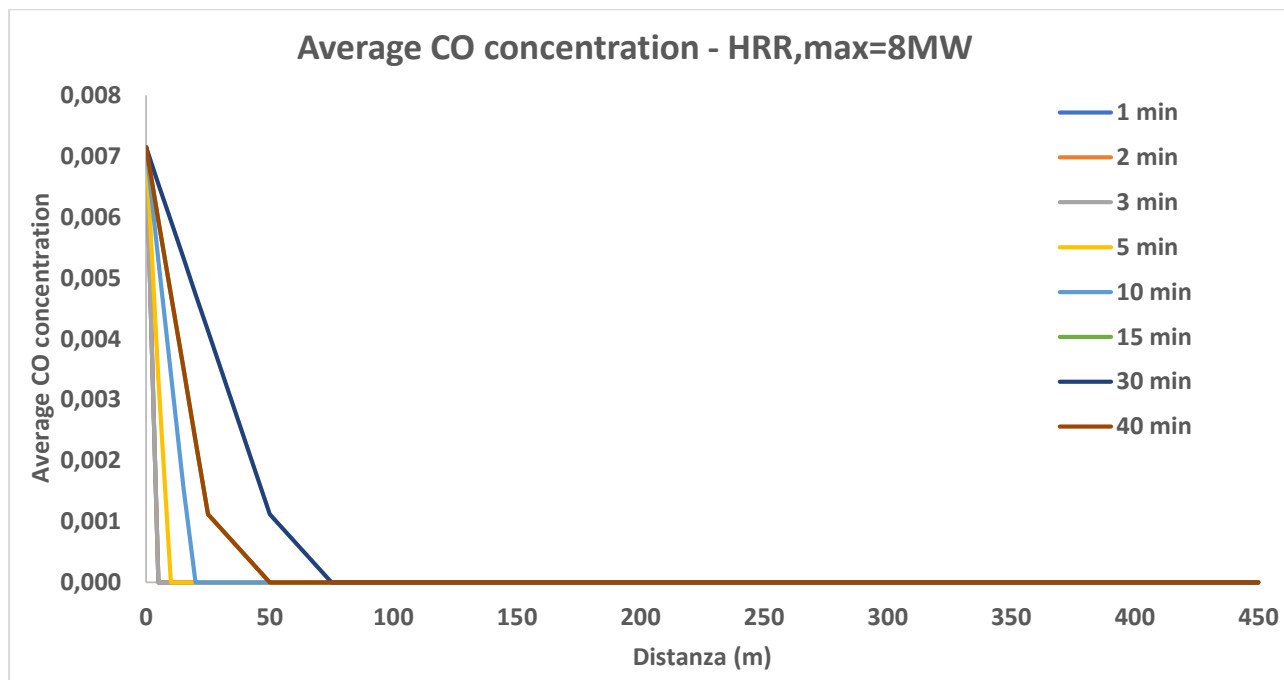


Figura 101 l'andamento del monossido lungo la galleria per diversi tempi. L'origine viene posta in presenza del focolaio

Citando (Ministero della Salute, 2015), è un gas tossico, incolore, inodore, insapore e non irritante che, senza ventilazione adeguata, può raggiungere concentrazioni elevate. Si produce per combustione incompleta di qualsiasi materiale organico, in presenza di scarso contenuto di ossigeno nell'ambiente. Per le sue caratteristiche può essere inalato in modo subdolo ed impercettibile, fino a raggiungere nell'organismo concentrazioni letali. Il CO presente nell'aria degli ambienti confinati proviene principalmente da fonti di combustione non dotate di idonea aspirazione. Il Ministero della Salute propone un limite di concentrazione massimo in cui non si osservano danni pari a 60 mg/m^3 nell'aria. Questo limite corrisponde ad una concentrazione molare in aria del 0,005%. Anche in questo caso siamo interessati a fare un'analisi specifica per i primi 30 metri a partire del focolaio. Questa regione rappresenta il dominio di intervento dei Vigili del Fuoco. Si vuole valutare la condizione di operatività degli operatori alla lotta antincendio.

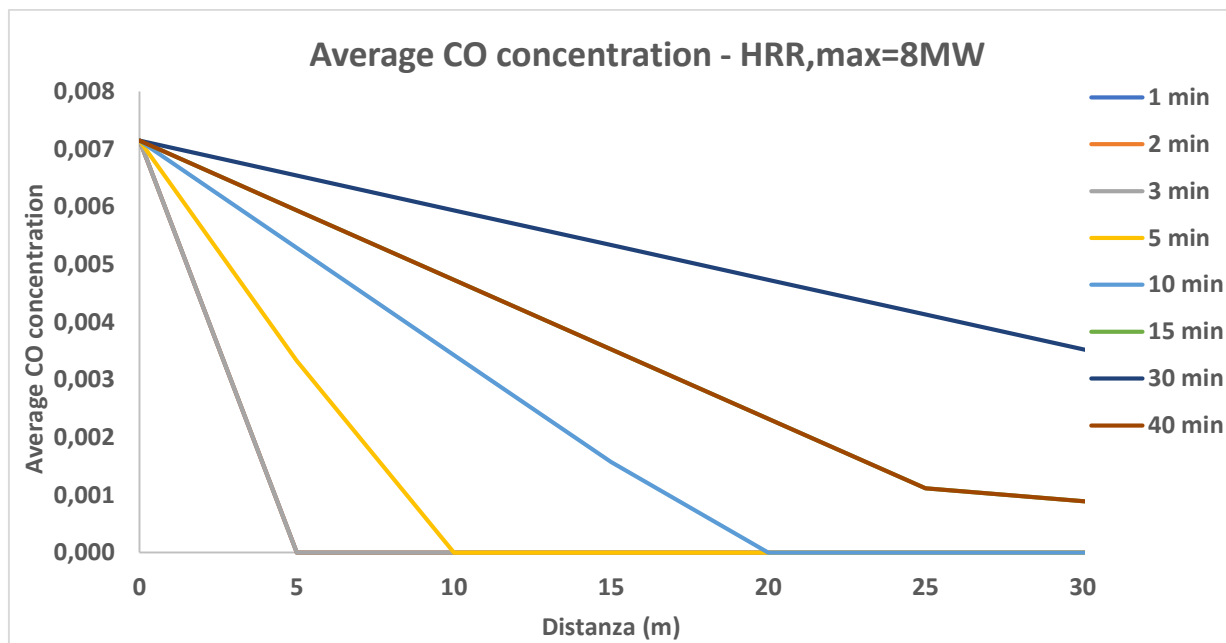


Figura 102 Analisi della concentrazione di monossido di carbonio entro i 30 metri

Come si può osservare, in questo caso le condizioni di ammissibilità sono più stringenti. Si può osservare che tra i 25 e i 30 metri già dopo 15 minuti si riscontra una concentrazione del 0.1%. Segue quindi che in questo caso l'intervento dei Vigili del Fuoco (in assenza di autorespiratori) deve avvenire entro i primi 10 minuti al fine di garantire le condizioni di vivibilità.

Di seguito vengono riportati anche le analisi svolte su altre tipologie di specie chimiche prodotte durante la combustione. Anche in questo caso vengono riportate le condizioni entro i 30 metri in riferimento alle condizioni di operatività dei Vigili del Fuoco. Tuttavia non vengono discussi gli aspetti più pratici in riferimento alla notevole incertezza che si ha su queste specie chimiche. Si ritiene che il modello utilizzato sia in qualche modo esemplificativo degli andamenti qualitativi e degli ordini di grandezza ma si nutre qualche dubbio circa la validità quantitativa dei valori ottenuti.

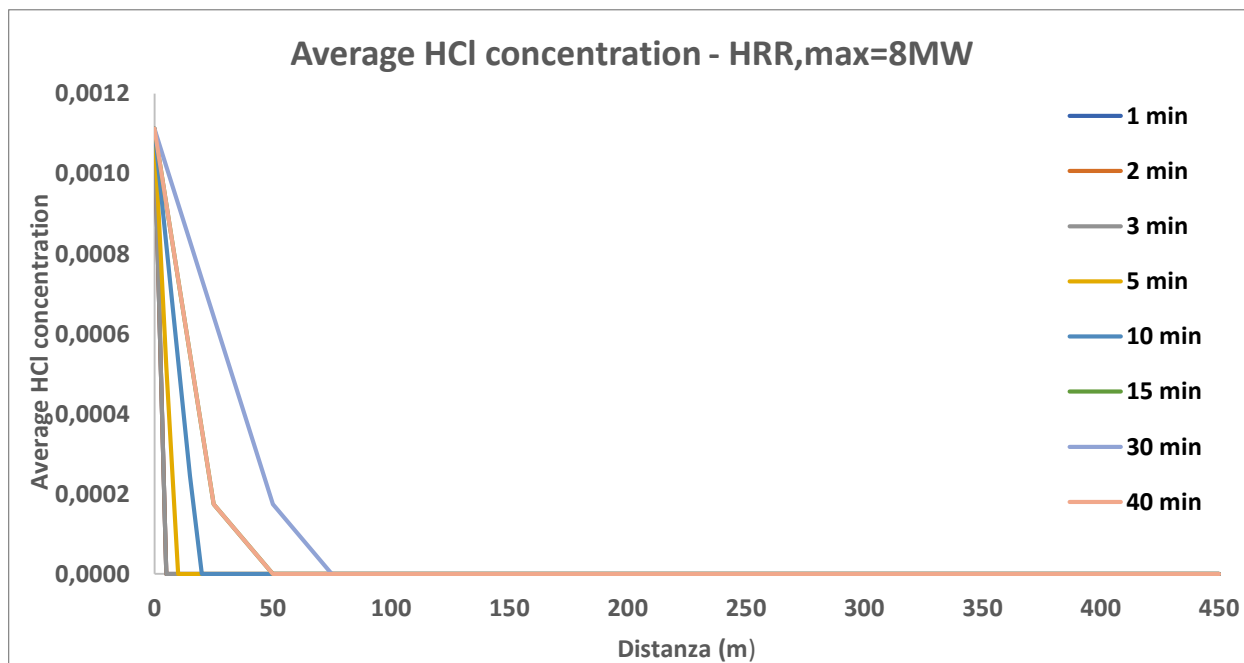


Figura 103 Andamento della concentrazione di acido cloridrico nell'aria per diversi tempi

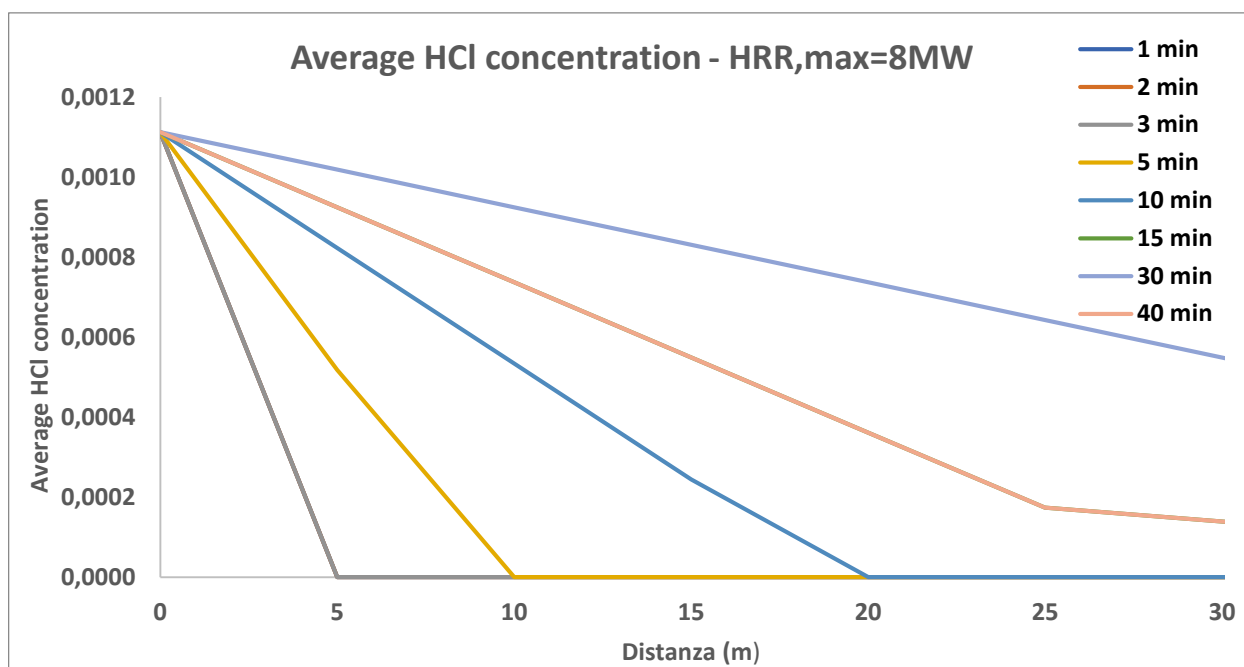


Figura 104 Andamento della concentrazione di acido cloridrico nell'aria entro i 30 metri

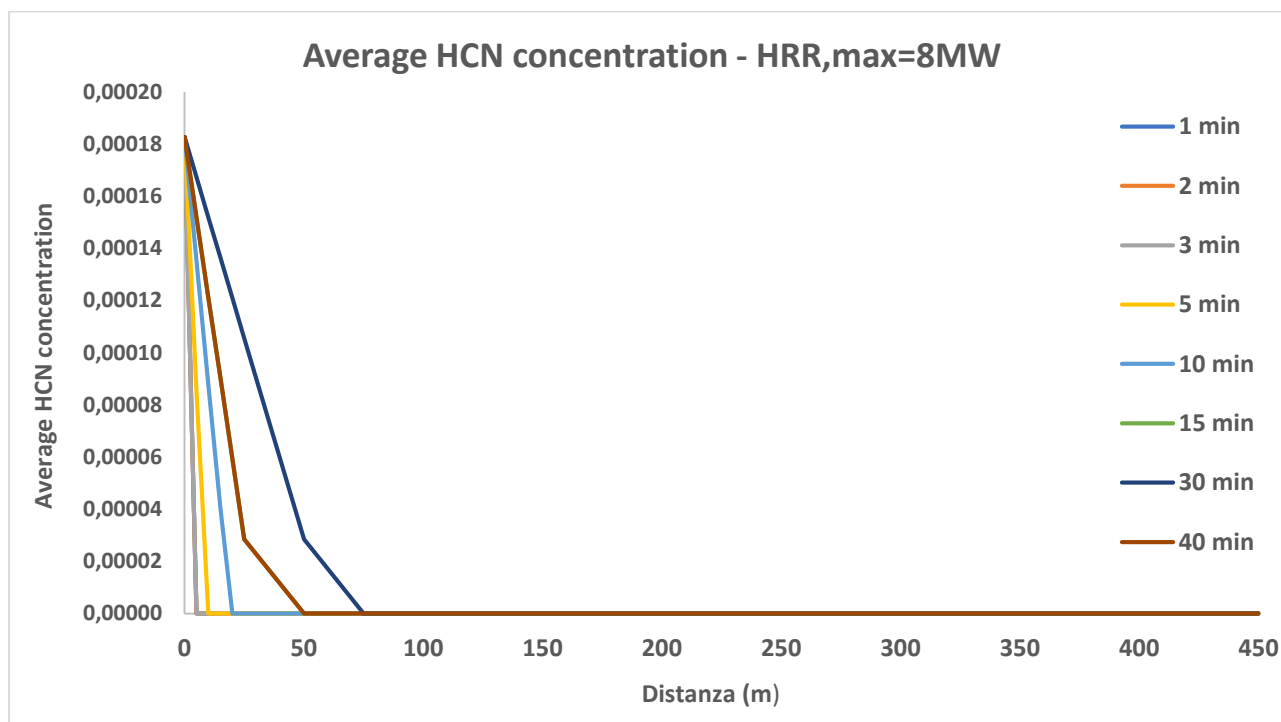


Figura 105 Andamento della concentrazione di acido cianidrico lungo la galleria

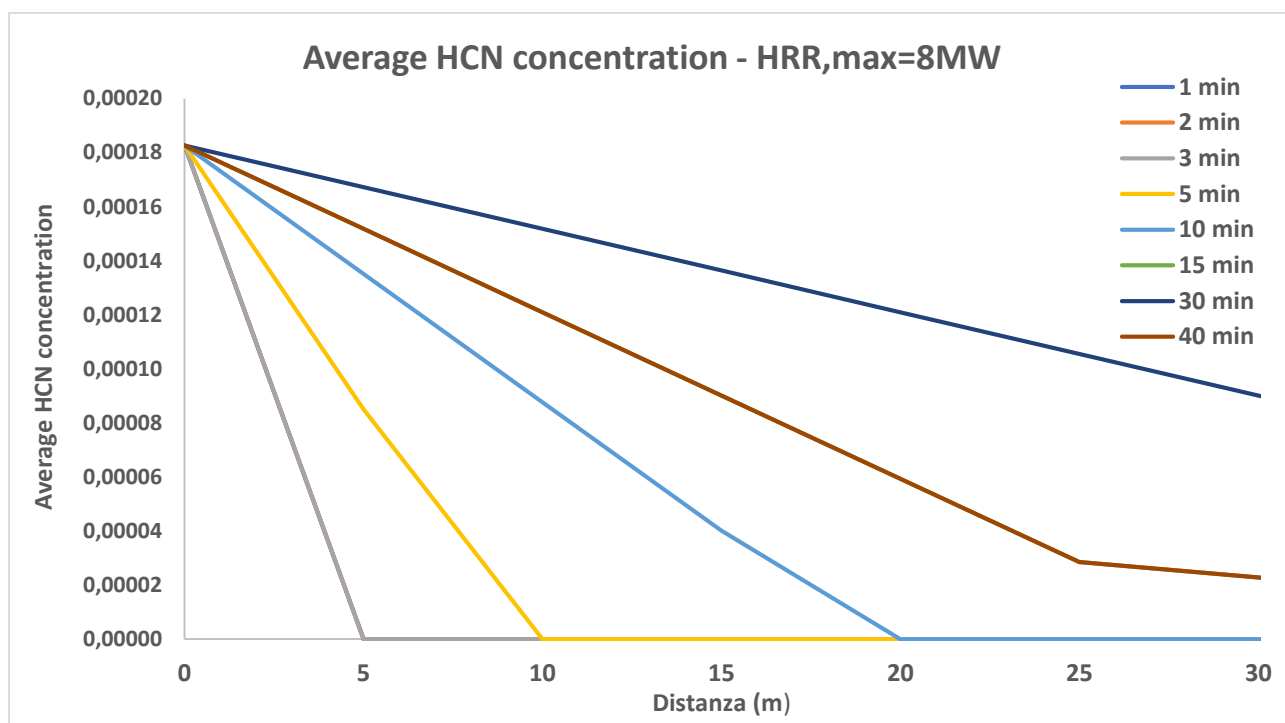


Figura 106 Andamento della concentrazione di acido cianidrico entro i 30 metri dal focolaio

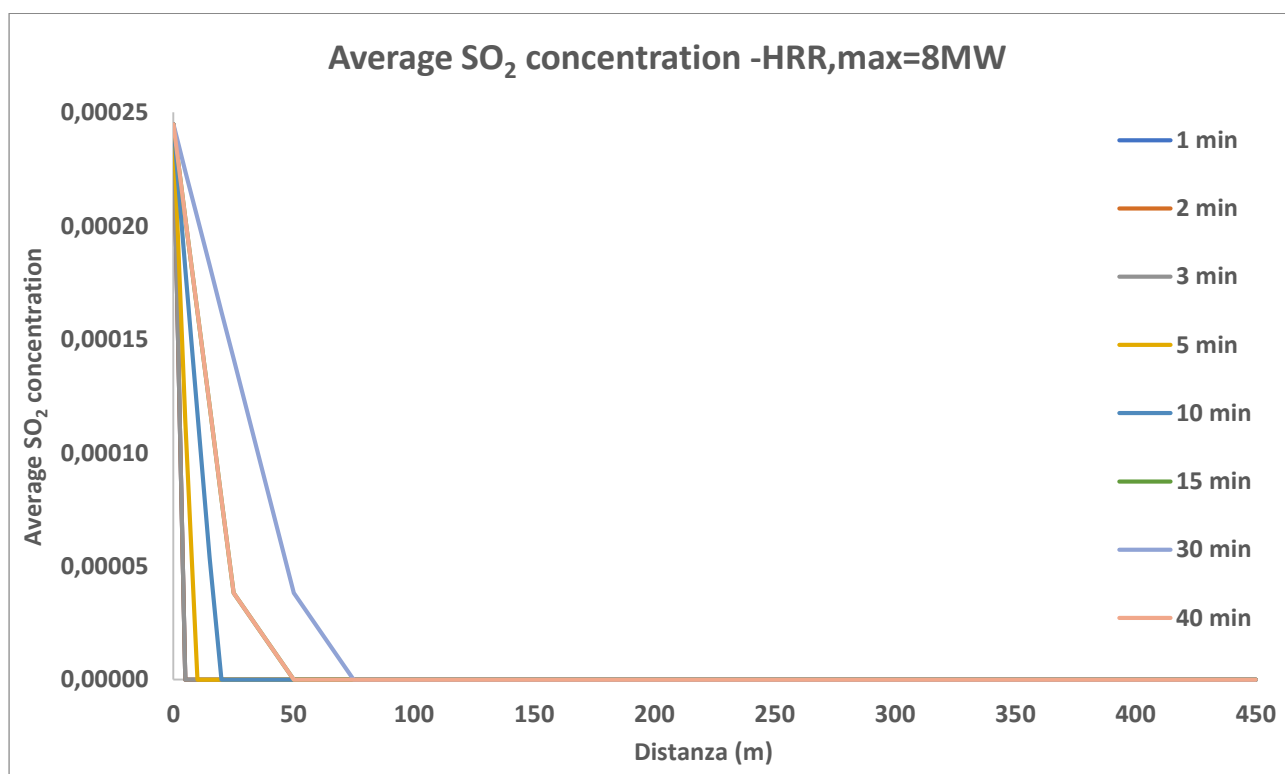


Figura 107 Andamento dell'anidride solforosa nell'aria lungo la galleria

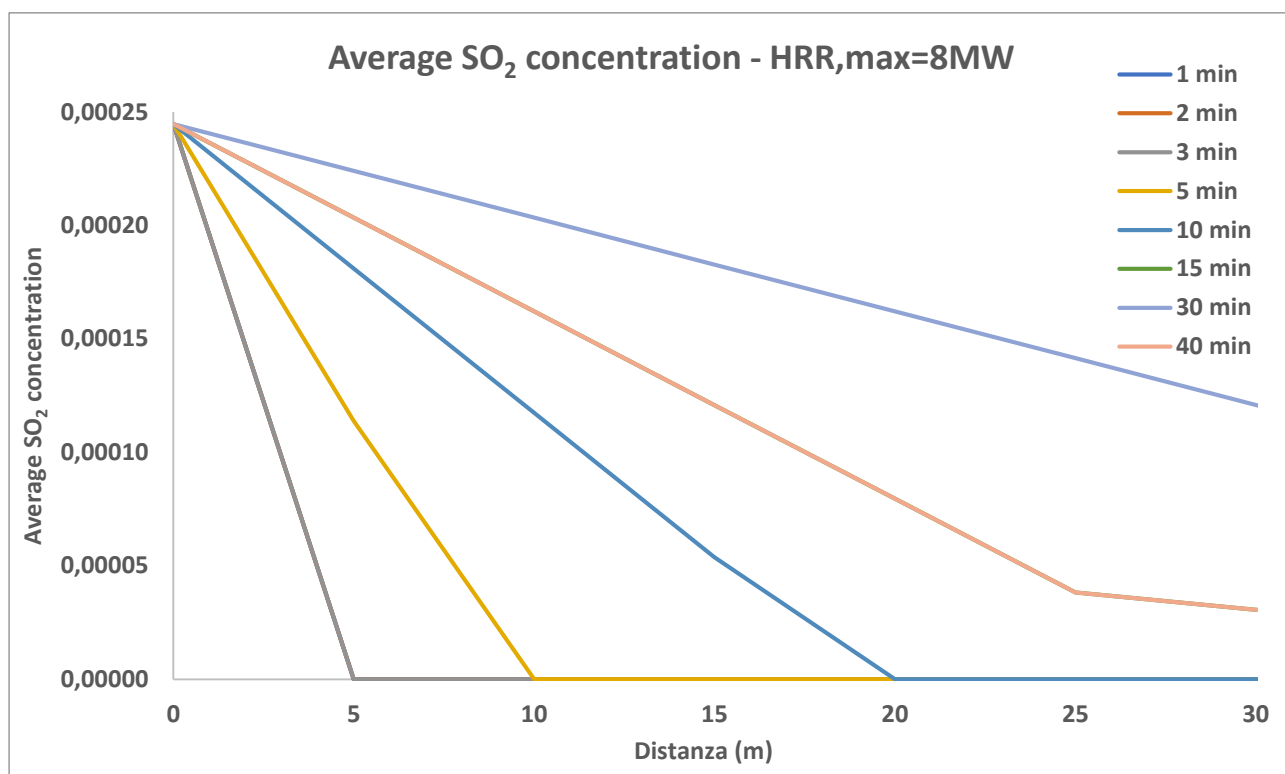


Figura 108 Andamento dell'anidride solforosa nell'aria entro i primi 30 metri dal focolaio

6.4.3 Gas prodotti dalla combustione per il focolaio di $HRR_{max}=50MW$

Per il focolaio di potenza massima 50MW si è considerato il caso di un autocarro adibito al trasporto di merci. Nello specifico si è considerato un carico di polietilene. Il veicolo non trasporta alcuna merce pericolosa (no ADR). In questo caso si è bilanciata la resa del veicolo (assimilato nelle sue componenti ad un'automobile) e le rese del carico di polietilene. Le rese valutate sono riassunte nella successiva tabella.

Specie Chimica	VEICOLO		CARICO (POLIETILENE)	
CO ₂	YCO ₂ (kg/kg)	MCO ₂ (g/mol)	YCO ₂ (kg/kg)	MCO ₂ (g/mol)
	0,265	44	2,76	44
CO	YCO (kg/kg)	MCO (g/mol)	YCO (kg/kg)	MCO (g/mol)
	0,0069	28	0,024	28
HCN	YHCN (kg/kg)	MHCN (g/mol)	YHCN (kg/kg)	MHCN (g/mol)
	0,00017	27	0	27
HCl	YHCl (kg/kg)	MHCl (g/mol)	YHCl (kg/kg)	MHCl (g/mol)
	0,0014	36,5	0	36,5
HCN	YHCN (kg/kg)	MHCN (g/mol)	YHCN (kg/kg)	MHCN (g/mol)
	0,00017	27	0	27
SO ₂	YSO ₂ (kg/kg)	MSO ₂ (g/mol)	YSO ₂ (kg/kg)	MSO ₂ (g/mol)
	0,00054	64	0	64

Tabella 22 Rese chimiche considerate

Le rese della combustione del polietilene sono state ottenute dal lavoro di (Tewardson, 2008). Anche in questo caso si considera l'ipotesi di omogeneità di combustione. L'origine del campo concentrazioni medie

è stata posta in posizione del focolaio. In questo caso si sono ottenuti i campi delle concentrazioni medie mostrato nelle figure successive. L'analisi è stata svolta ponendo l'origine in presenza del focolaio. I risultati trovati si sviluppano lungo un solo verso (analisi monodimensionale), tuttavia, sono replicabili simmetricamente anche lungo il verso opposto. La prima specie chimica analizzata è l'ossigeno.

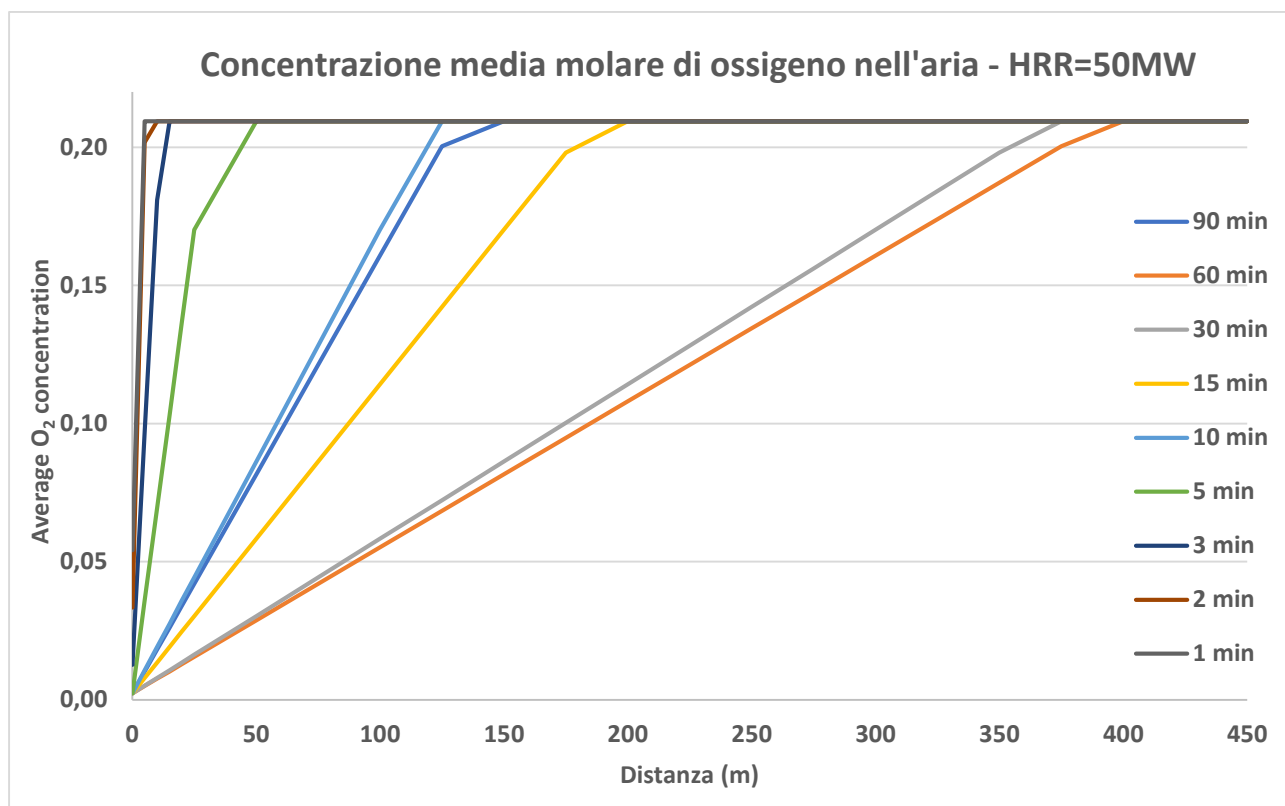


Figura 109 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria lungo la galleria

Anche in questo caso siamo interessati ad un'analisi specifica entro i 30 metri in quanto questa è l'area di lavoro dei Vigili del Fuoco e degli addetti alla lotta antincendio. In questo caso al fine di valutare le condizioni di lavoro dei Vigili del Fuoco si fa riferimento alle condizioni di ambiente confinato in carenza di ossigeno. Si fa riferimento alla relazione prodotta da ASSOGASTECNICI (ASSOGASTECNICI & EIGA, 2009) (recepimento delle linee guida prodotte da EIGA a livello europeo). Si decide quindi di porre il limite di vivibilità in prossimità della concentrazione relativa al 15% di ossigeno nell'aria, una concentrazione dove si ipotizza ci sia una riduzione non eccessiva delle prestazioni fisiche ed intellettuali dei Vigili del Fuoco.

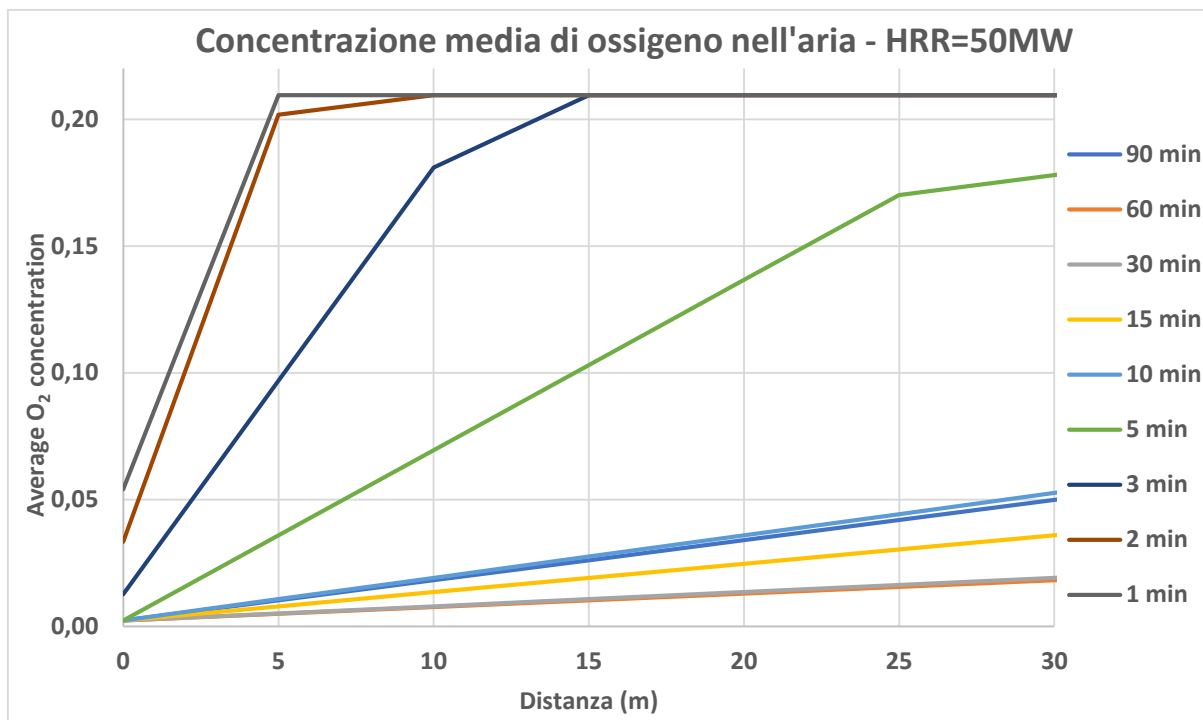


Figura 110 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria entro i 30 metri dal focolaio

In riferimento al grafico sopracitato si osserva quindi la difficoltà all'intervento dei Vigili del Fuoco dopo 5 minuti. In questa sede inoltre non si fa riferimento all'uso di sistemi di respirazione automatici.

Un altro prodotto di combustione a cui siamo interessati è l'anidride carbonica. Questa viene prodotta in quantità considerevole durante la combustione. Come visto precedentemente si calcola l'andamento della concentrazione media di anidride carbonica.

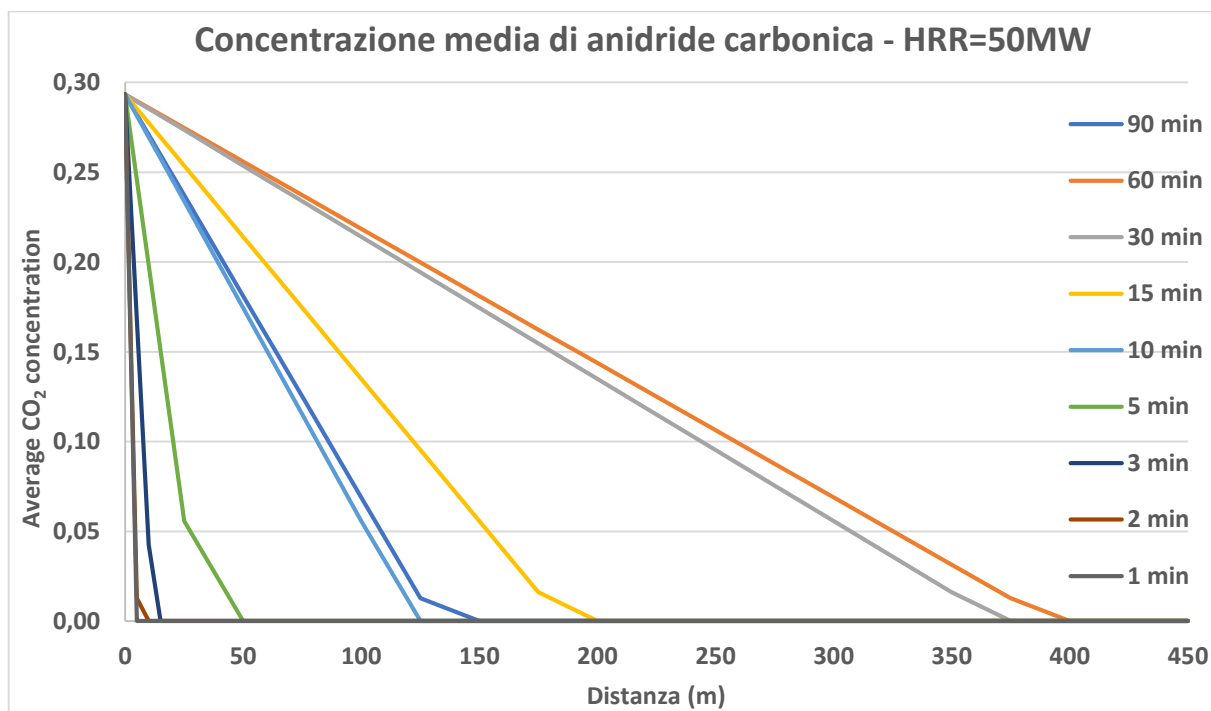


Figura 111 Andamento della concentrazione media di anidride carbonica nella galleria

Per quanto concerne l'anidride carbonica, anche in questo caso, si vogliono valutare le condizioni di intervento dei Vigili del Fuoco. Come visto precedentemente l'intervento dei Vigili del Fuoco è possibile entro una distanza massima dal focolaio di *30 metri*. In questa sede si è deciso di porre il limite di concentrazione di anidride carbonica al 4%. Nei seguenti grafici si mostra la concentrazione di anidride carbonica entro i *30 metri* e successivamente la si confronta con la concentrazione di ossigeno nell'aria.

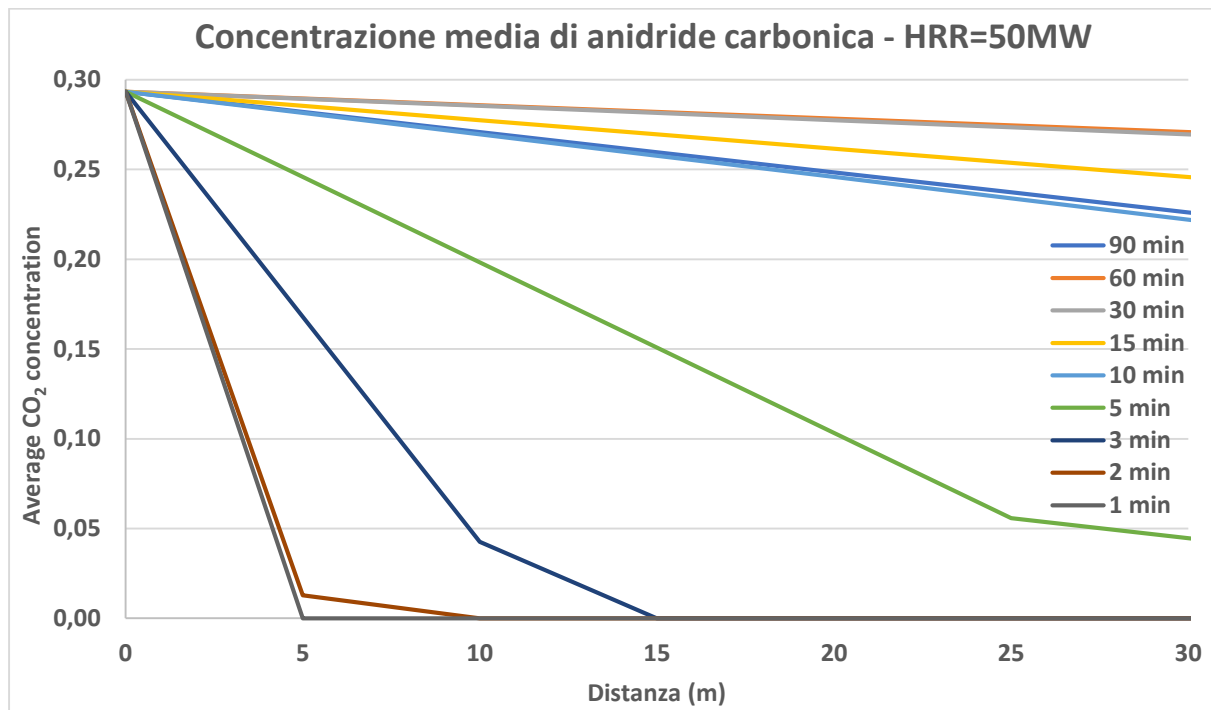


Figura 112 Andamento della concentrazione di anidride carbonica entro 30 metri dal focolaio

Dal grafico mostrato si osserva come le condizioni di impossibilità di intervento dei Vigili del Fuoco successivamente ai *4 minuti*. Si ricorda come si è valutata la condizione di vivibilità per concentrazioni di anidride carbonica inferiori al 4%. Segue quindi che anche in questo caso le condizioni imposte dall'anidride carbonica sono più stringenti rispetto all'ossigeno.

Successivamente si valuta l'andamento della concentrazione di monossido di carbonio nel tempo. Il monossido di carbonio assume particolare rilevanza tra i prodotti di combustione. Nel seguente grafico viene mostrato l'andamento del monossido lungo la galleria per diversi tempi.

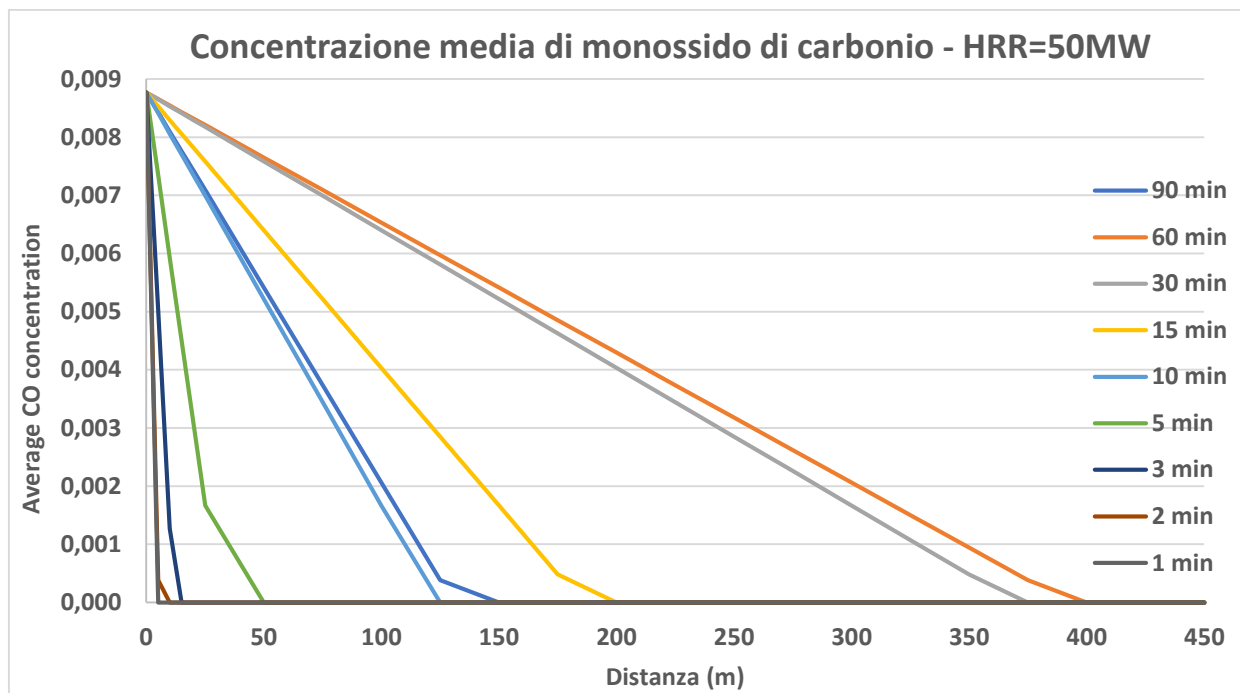


Figura 113 Andamento del monossido di carbonio lungo la galleria

Anche in questo caso si impone il limite di concentrazione molare in aria del 0.005%. È di interesse fare un'analisi specifica per i primi 30 metri a partire del focolaio. Questa regione rappresenta il dominio di intervento dei Vigili del Fuoco. Si vuole valutare la condizione di operatività degli operatori alla lotta antincendio.

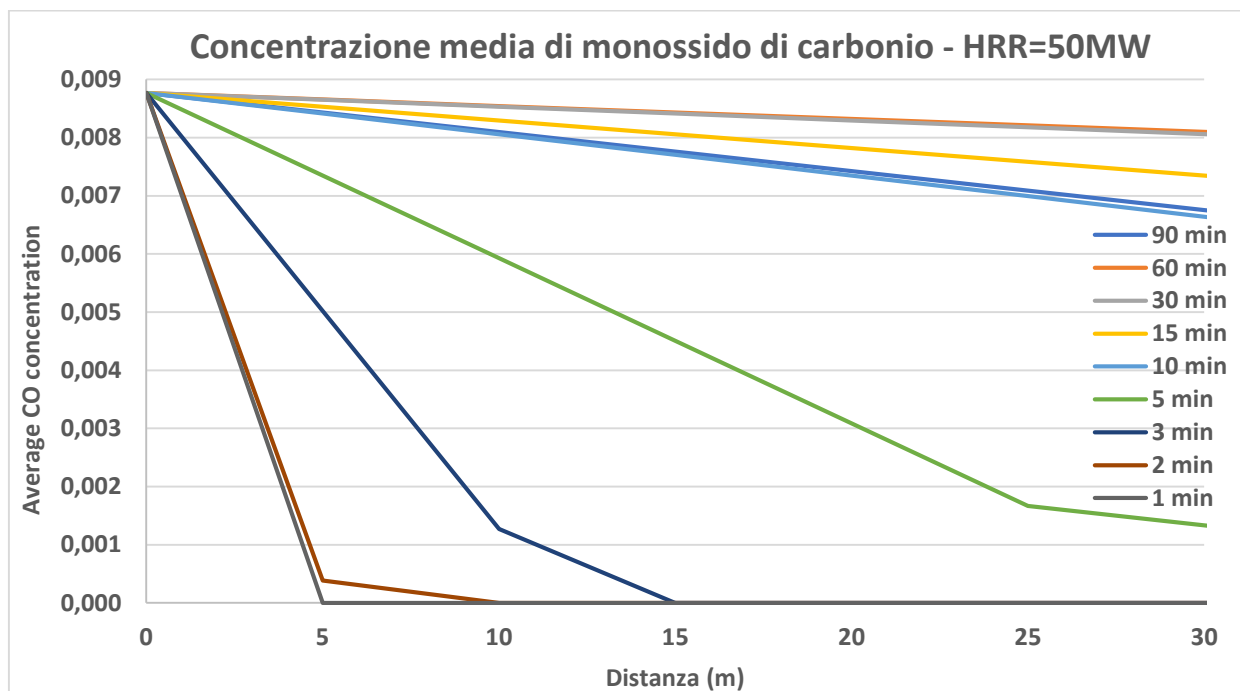


Figura 114 Andamento del monossido di carbonio entro 30 metri dal focolaio

Come si può osservare, in questo caso le condizioni di ammissibilità sono più stringenti. Si può osservare che tra i 25 e i 30 metri già dopo 5 minuti si riscontra una concentrazione del 0.15%. Segue quindi che in questo caso l'intervento dei Vigili del Fuoco (in assenza di autorespiratori) deve avvenire entro i primi 3 minuti al fine di garantire le condizioni di vivibilità.

Di seguito vengono riportati anche le analisi svolte su altre tipologie di specie chimiche prodotte durante la combustione. Anche in questo caso vengono riportate le condizioni entro i *30 metri* in riferimento alle condizioni di operatività dei Vigili del Fuoco. Tuttavia non vengono discussi gli aspetti più pratici in riferimento alla notevole incertezza che si ha su queste specie chimiche. Si ritiene che il modello utilizzato sia in qualche modo esemplificativo degli andamenti qualitativi e degli ordini di grandezza ma si nutre qualche dubbio circa la validità quantitativa dei valori ottenuti.

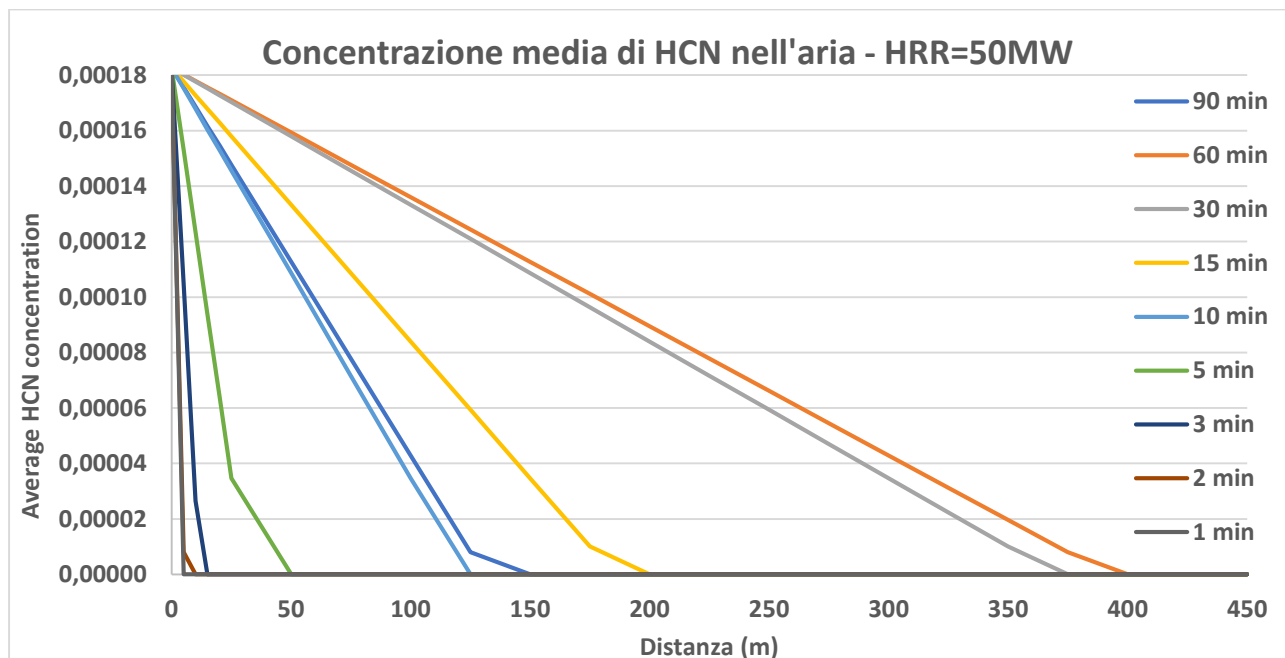


Figura 115 Andamento della concentrazione media di acido cianidrico nell'aria lungo la galleria

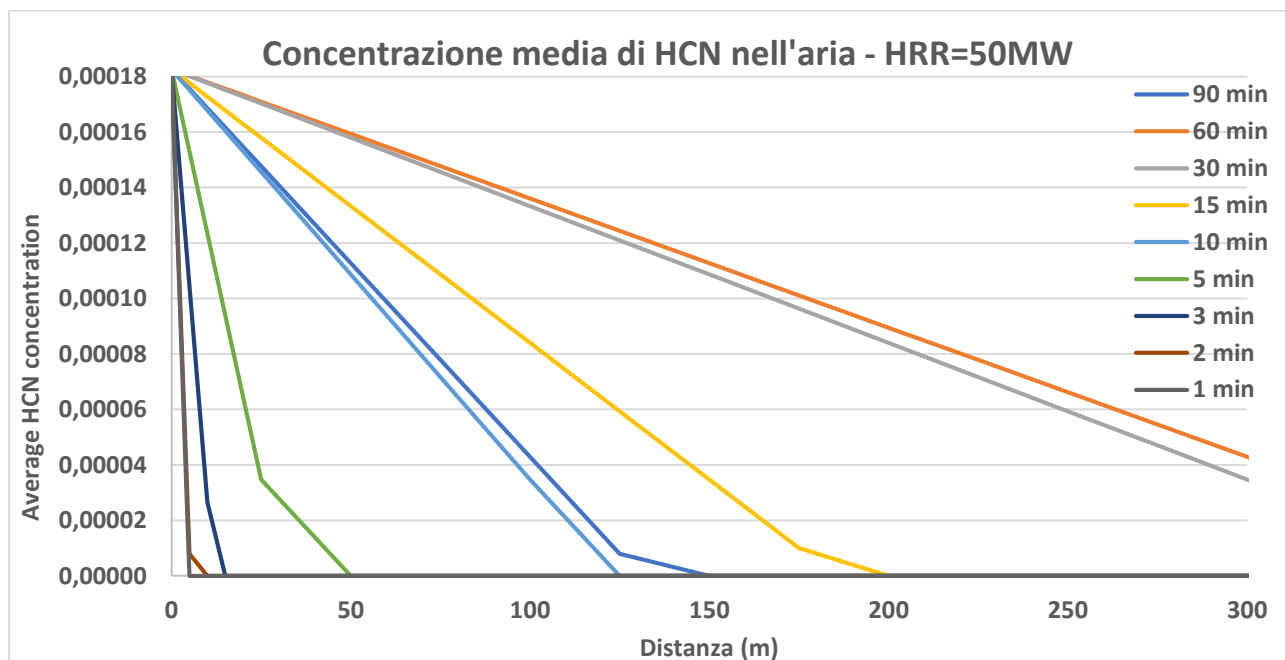


Figura 116 Andamento della concentrazione media dell'acido cianidrico entro 30 metri dal focolaio

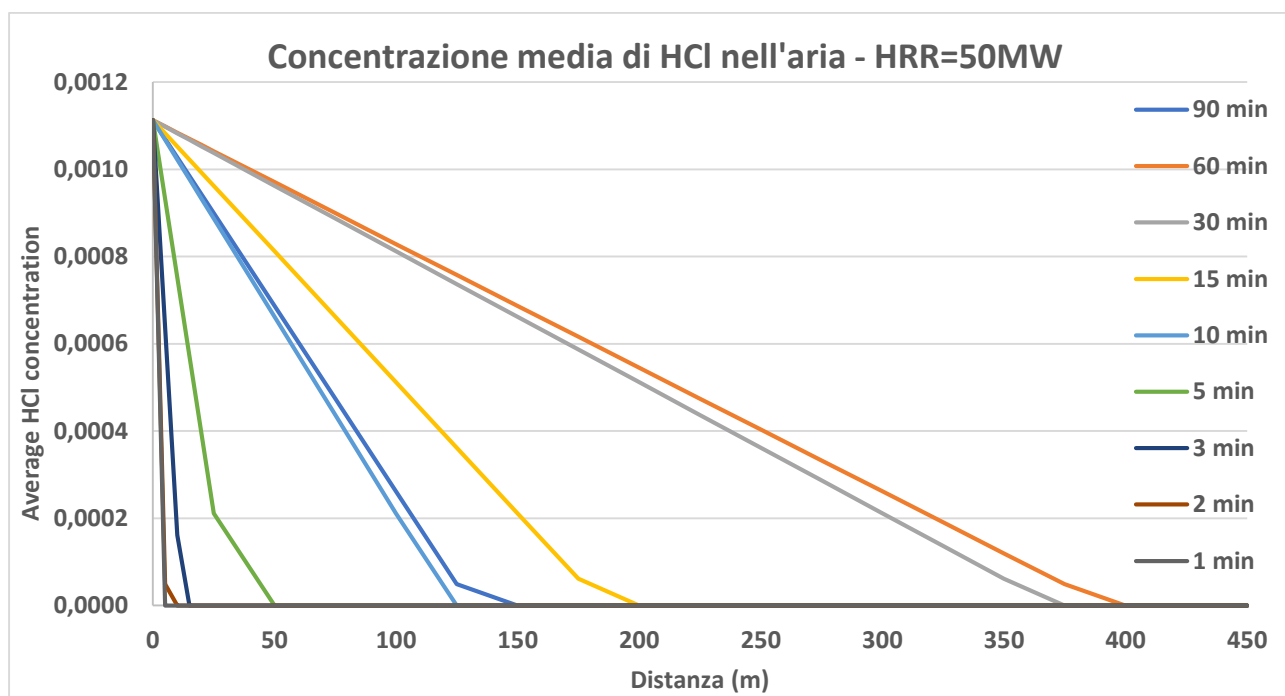


Figura 117 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico nell'aria

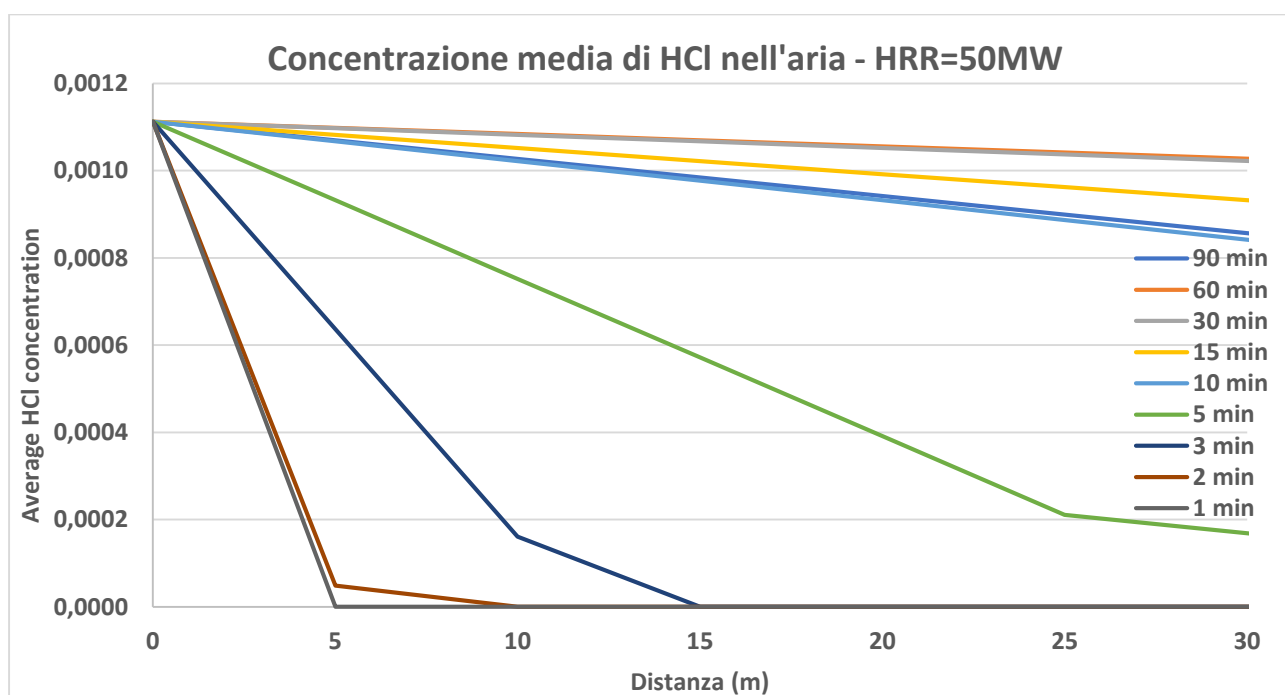


Figura 118 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico entro 30 metri dal focolaio

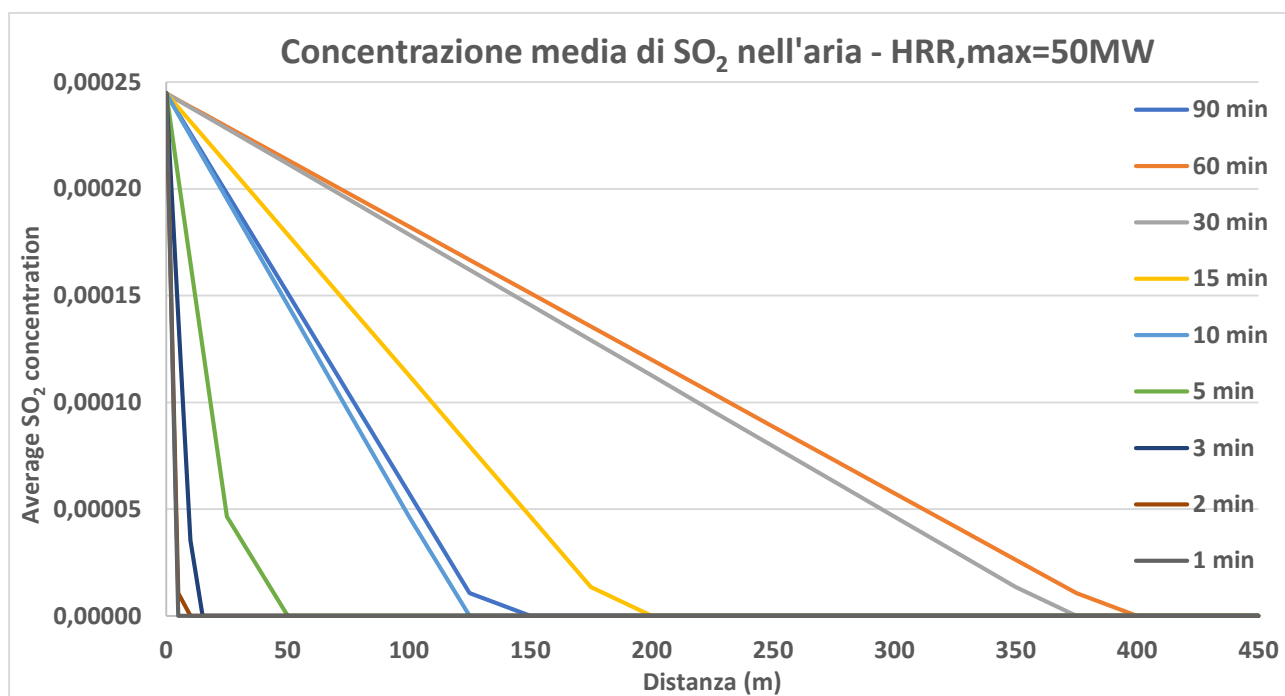


Figura 119 Andamento della concentrazione di anidride solforosa lungo la galleria

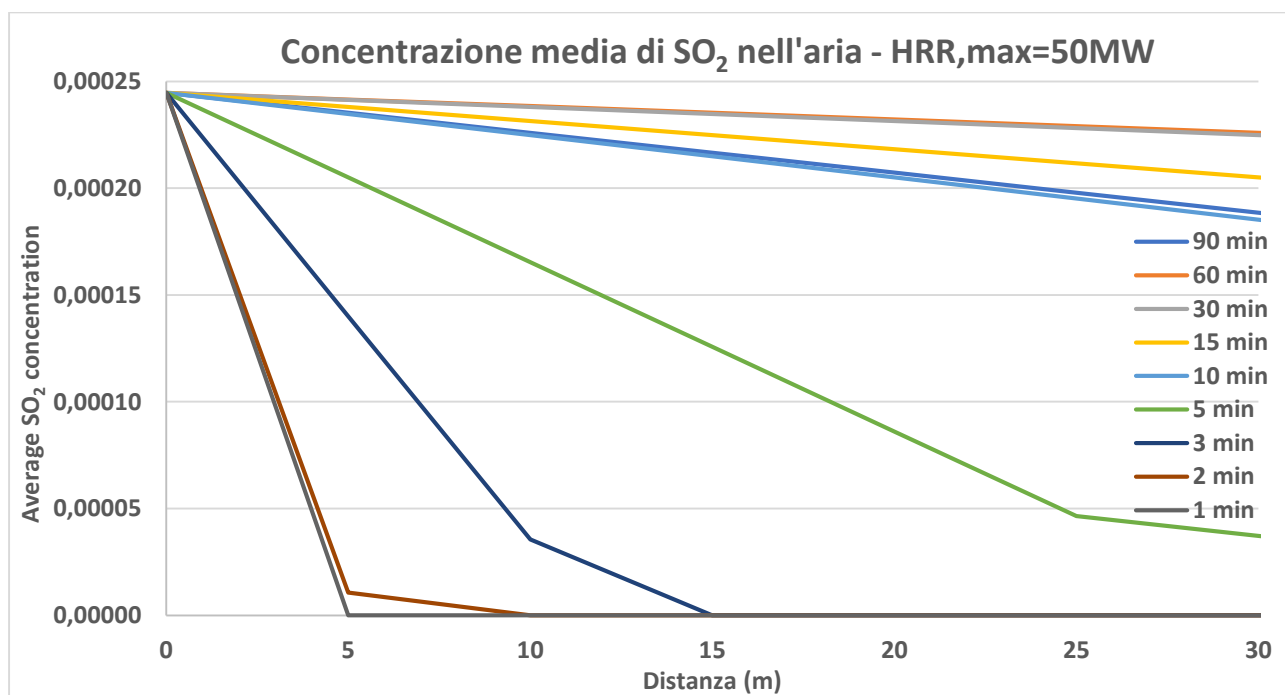


Figura 120 Andamento della concentrazione di anidride solforosa entro 30 metri dal focolaio

6.4.4 Gas prodotti dalla combustione per il focolaio di HRR,max=100MW

Per il focolaio di potenza massima 100MW si è considerato il caso di un autocarro adibito al trasporto di merce pericolosa. Nello specifico si è considerato un carico di gasolio, segue quindi che si tratta di un veicolo ADR. In questo caso si è bilanciata la resa del veicolo (assimilato nelle sue componenti ad un'automobile) e le rese del carico di gasolio. Le rese valutate sono riassunte nella successiva tabella.

Specie Chimiche	VEICOLO		CARICO (GASOLIO)	
CO₂	YCO ₂ (kg/kg)	MCO ₂ (g/mol)	YCO ₂ (kg/kg)	MCO ₂ (g/mol)
	0,265	44	2,37	44
CO	YCO (kg/kg)	MCO (g/mol)	YCO (kg/kg)	MCO (g/mol)
	0,0069	28	0,067	28
HCN	YHCN (kg/kg)	MHCN (g/mol)	YHCN (kg/kg)	MHCN (g/mol)
	0,00017	27	0	27
HCl	YHCl (kg/kg)	MHCl (g/mol)	YHCl (kg/kg)	MHCl (g/mol)
	0,0014	36,5	0	36,5
SO₂	YSO ₂ (kg/kg)	MSO ₂ (g/mol)	YSO ₂ (kg/kg)	MSO ₂ (g/mol)
	0,00054	64	0	64

Figura 121 Rese chimiche considerate

Le rese della combustione del gasolio sono state ottenute dal lavoro di (Tewardson, 2008). Anche in questo caso si considera l'ipotesi di omogeneità di combustione. L'origine del campo concentrazioni medie è stata posta in posizione del focolaio. In questo caso si sono ottenuti i campi delle concentrazioni medie mostrato nelle figure successive. L'analisi è stata svolta ponendo l'origine in presenza del focolaio. I risultati trovati si sviluppano lungo un solo verso (analisi monodimensionale), tuttavia, sono replicabili simmetricamente anche lungo il verso opposto. La prima specie chimica analizzata è l'ossigeno.

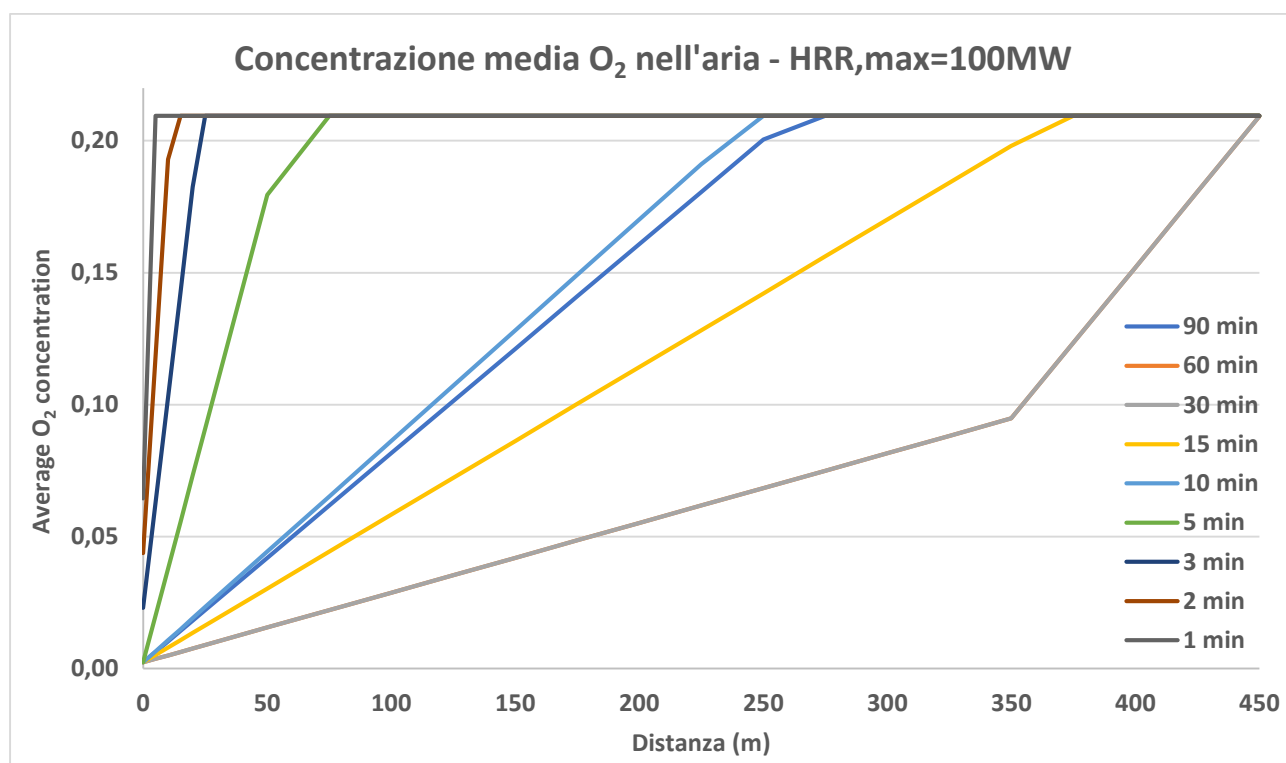


Figura 122 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria lungo la galleria

Anche in questo caso siamo interessati ad un'analisi specifica entro i 30 metri in quanto questa è l'area di lavoro dei Vigili del Fuoco e degli addetti alla lotta antincendio. In questo caso al fine di valutare le condizioni di lavoro dei Vigili del Fuoco si fa riferimento alle condizioni di ambiente confinato in carenza di ossigeno. Si fa riferimento alla relazione prodotta da ASSOGASTECNICI (ASSOGASTECNICI & EIGA, 2009) (recepimento

delle linee guida prodotte da EIGA a livello europeo). Si decide quindi di porre il limite di vivibilità in prossimità della concentrazione relativa al 15% di ossigeno nell'aria, una concentrazione dove si ipotizza ci sia una riduzione non eccessiva delle prestazioni fisiche ed intellettuali dei Vigili del Fuoco.

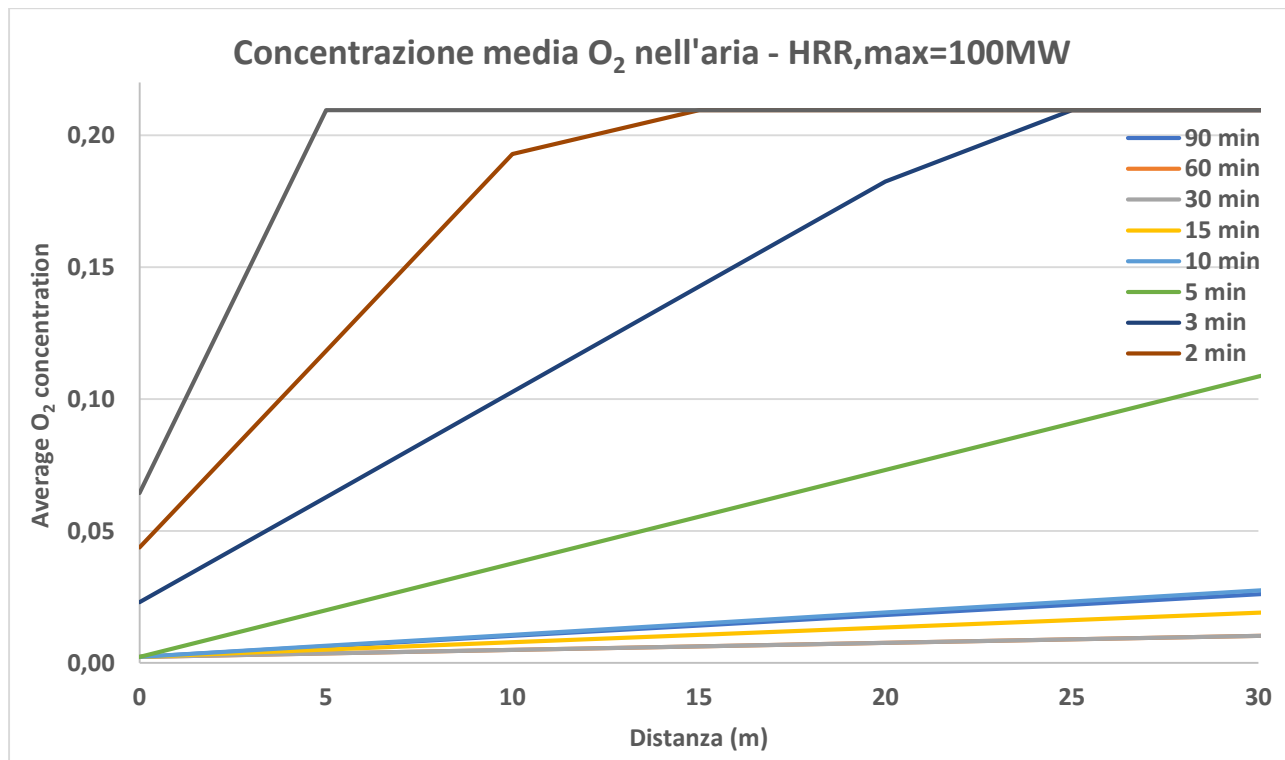


Figura 123 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria entro i 30 metri dal focolaio

In riferimento al grafico sopracitato si osserva quindi la difficoltà all'intervento dei Vigili del Fuoco dopo 3 *minuti*. In questa sede inoltre non si fa riferimento all'uso di sistemi di respirazione automatici.

Un altro prodotto di combustione a cui siamo interessati è l'anidride carbonica. Questa viene prodotta in quantità considerevole durante la combustione. Come visto precedentemente si calcola l'andamento della concentrazione media di anidride carbonica.

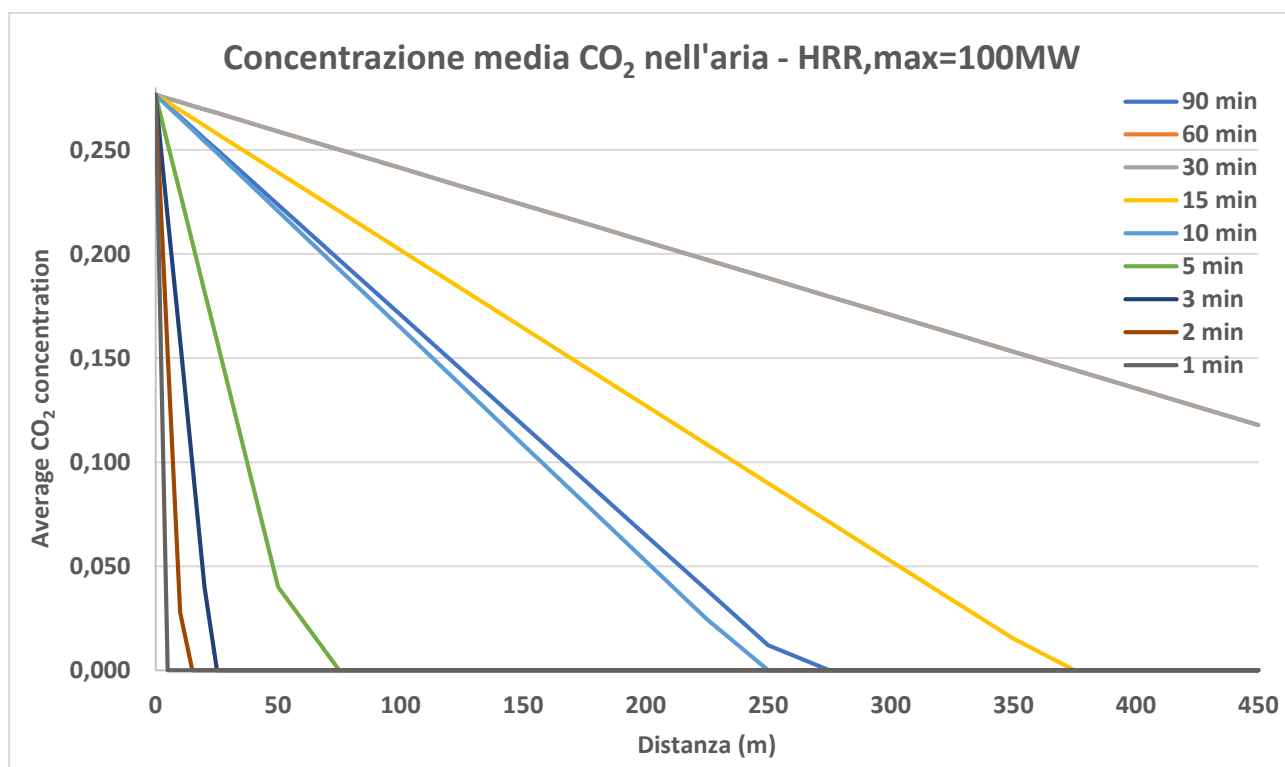


Figura 124 Andamento della concentrazione dell'anidride carbonica lungo la galleria

Per quanto concerne l'anidride carbonica, anche in questo caso, si vogliono valutare le condizioni di intervento dei Vigili del Fuoco. Come visto precedentemente l'intervento dei Vigili del Fuoco è possibile entro una distanza massima dal focolaio di 30 metri. In questa sede si è deciso di porre il limite di concentrazione di anidride carbonica al 4%. Nei seguenti grafici si mostra la concentrazione di anidride carbonica entro i 30 metri e successivamente la si confronta con la concentrazione di ossigeno nell'aria.

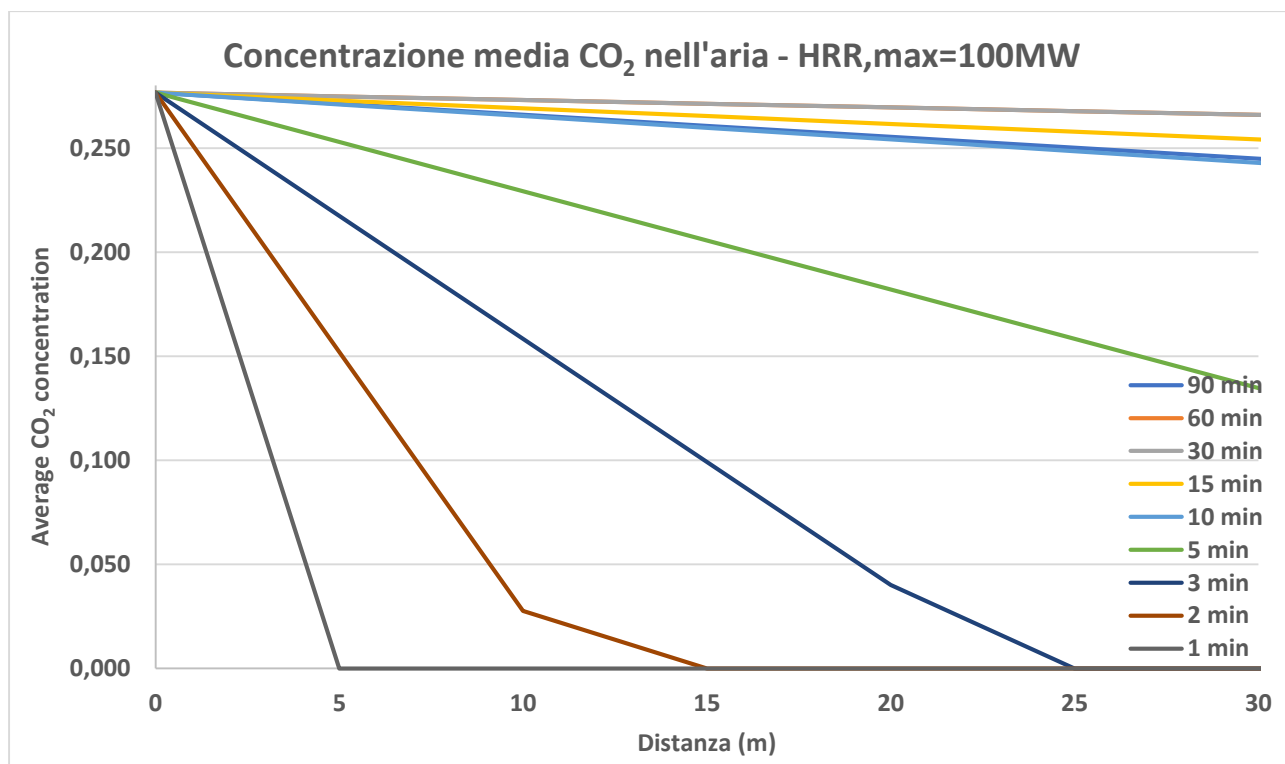


Figura 125 Andamento della concentrazione dell'anidride carbonica entro 30 metri dal focolaio

Dal grafico mostrato si osserva come le condizioni di impossibilità di intervento dei Vigili del Fuoco successivamente ai 3 minuti. Si ricorda come si è valutata la condizione di vivibilità per concentrazioni di anidride carbonica inferiori al 4%. Segue quindi che anche in questo caso le condizioni imposte dall'anidride carbonica sono più stringenti rispetto all'ossigeno.

Successivamente si valuta l'andamento della concentrazione di monossido di carbonio nel tempo. Il monossido di carbonio assume particolare rilevanza tra i prodotti di combustione. Nel seguente grafico viene mostrato l'andamento del monossido lungo la galleria per diversi tempi.

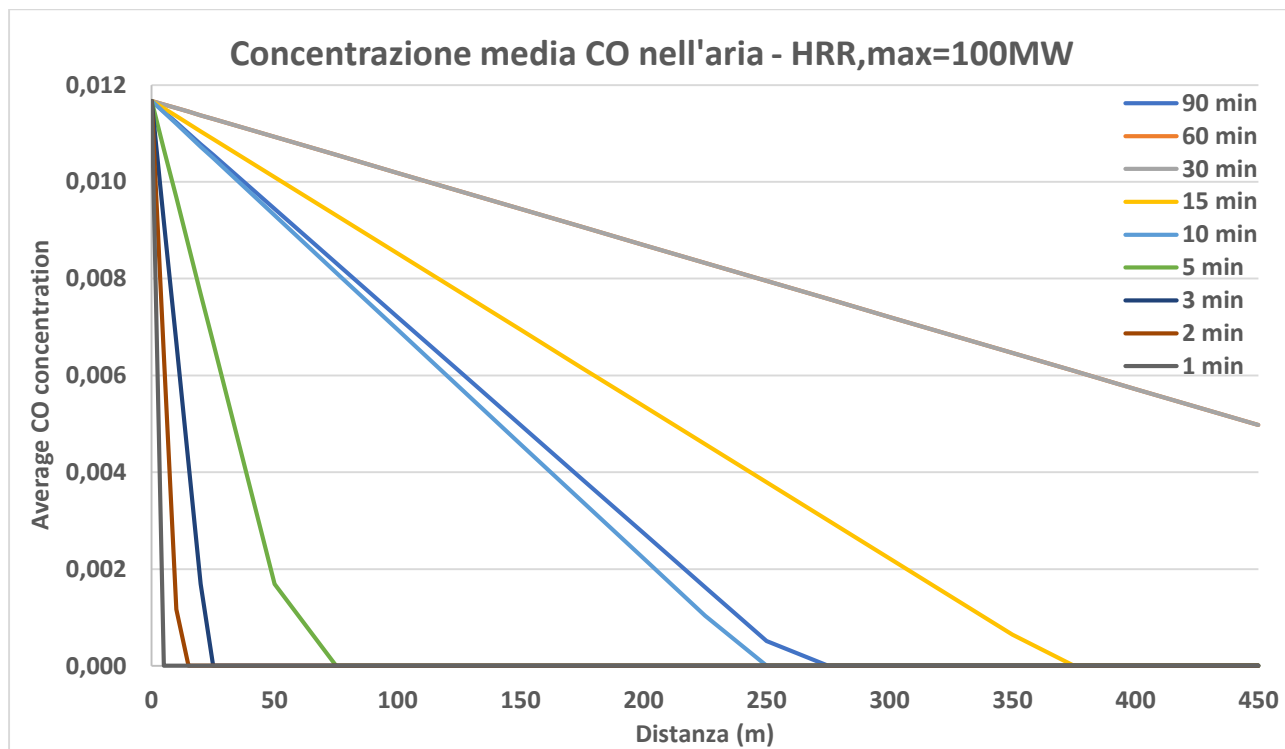
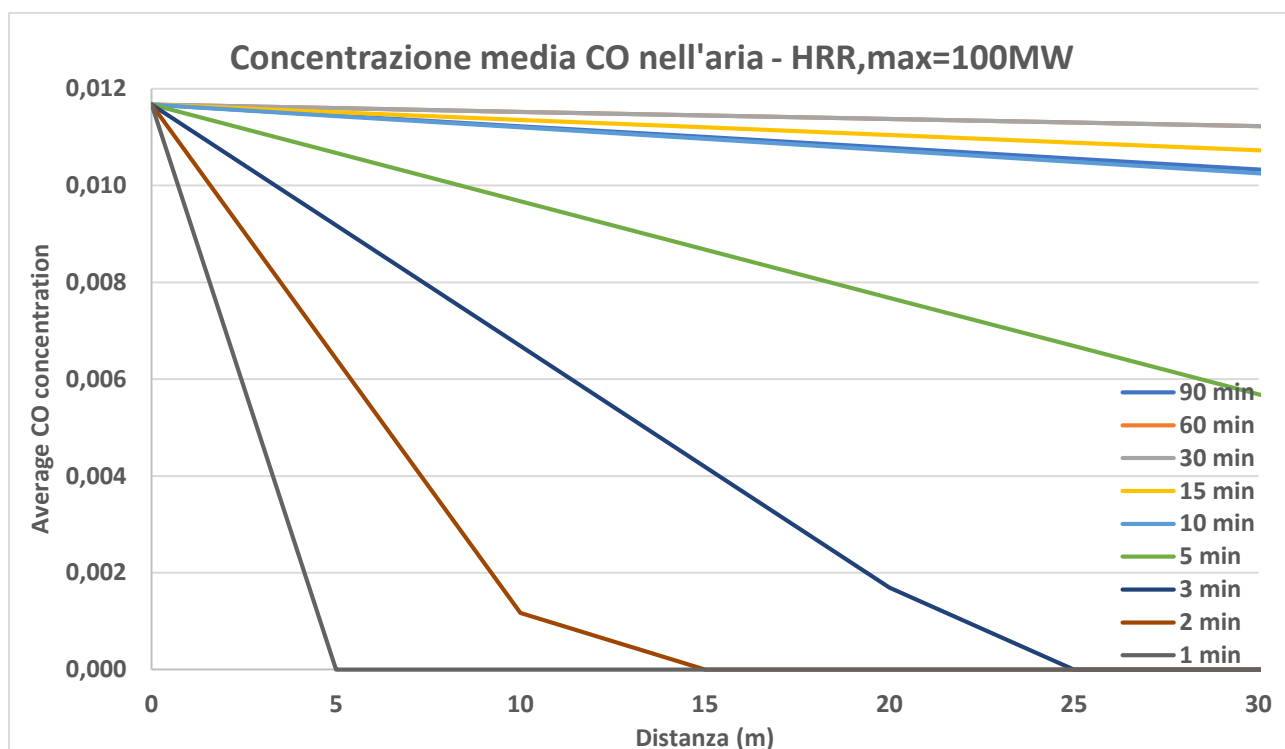


Figura 126 Andamento della concentrazione di monossido di carbonio lungo la galleria

Anche in questo caso si impone il limite di concentrazione molare in aria del 0.005%. È di interesse fare un'analisi specifica per i primi 30 metri a partire del focolaio. Questa regione rappresenta il dominio di intervento dei Vigili del Fuoco. Si vuole valutare la condizione di operatività degli operatori alla lotta antincendio.



Come si può osservare, in questo caso le condizioni di ammissibilità sono più stringenti. Si può osservare che tra i 25 e i 30 metri già dopo 4 minuti si riscontra una concentrazione del 0.15%. Segue quindi che in questo caso l'intervento dei Vigili del Fuoco (in assenza di autorespiratori) deve avvenire entro i primi 4 minuti al fine di garantire le condizioni di vivibilità.

Di seguito vengono riportati anche le analisi svolte su altre tipologie di specie chimiche prodotte durante la combustione. Anche in questo caso vengono riportate le condizioni entro i 30 metri in riferimento alle condizioni di operatività dei Vigili del Fuoco. Tuttavia non vengono discussi gli aspetti più pratici in riferimento alla notevole incertezza che si ha su queste specie chimiche. Si ritiene che il modello utilizzato sia in qualche modo esemplificativo degli andamenti qualitativi e degli ordini di grandezza ma si nutre qualche dubbio circa la validità quantitativa dei valori ottenuti.

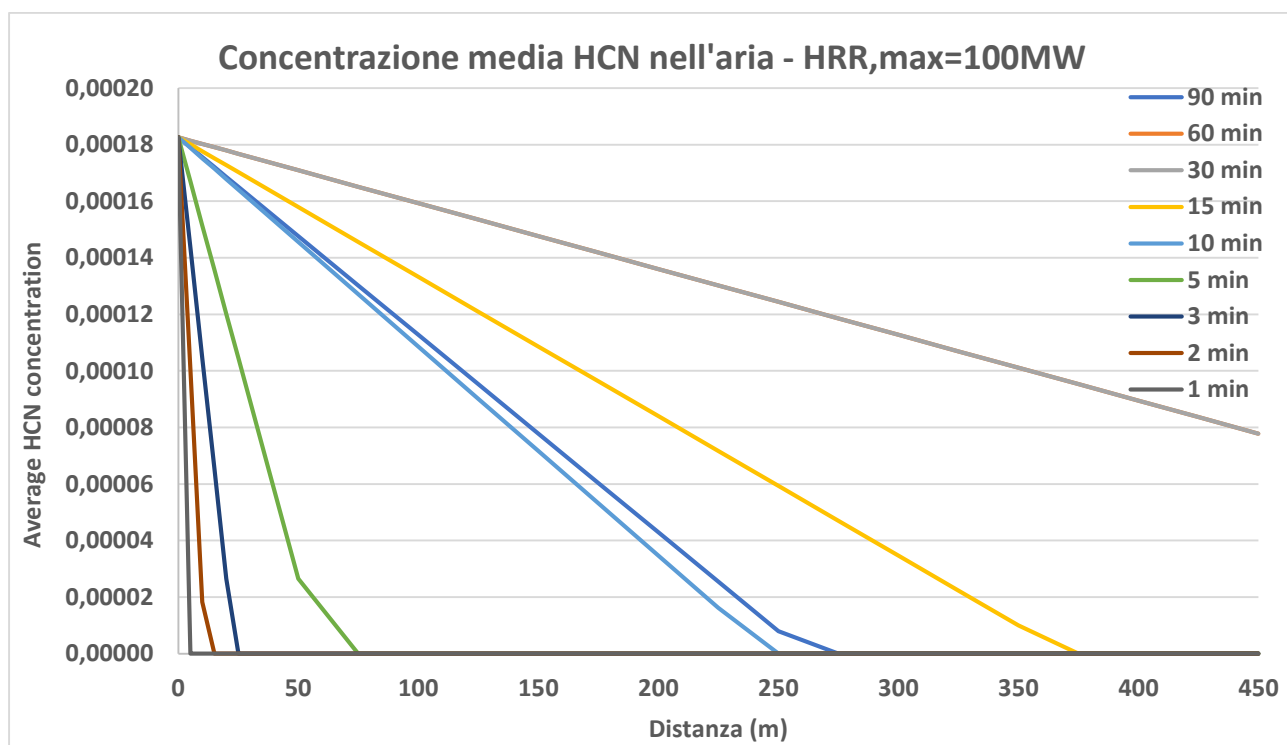


Figura 127 Andamento della concentrazione media di acido cianidrico nell'aria lungo la galleria

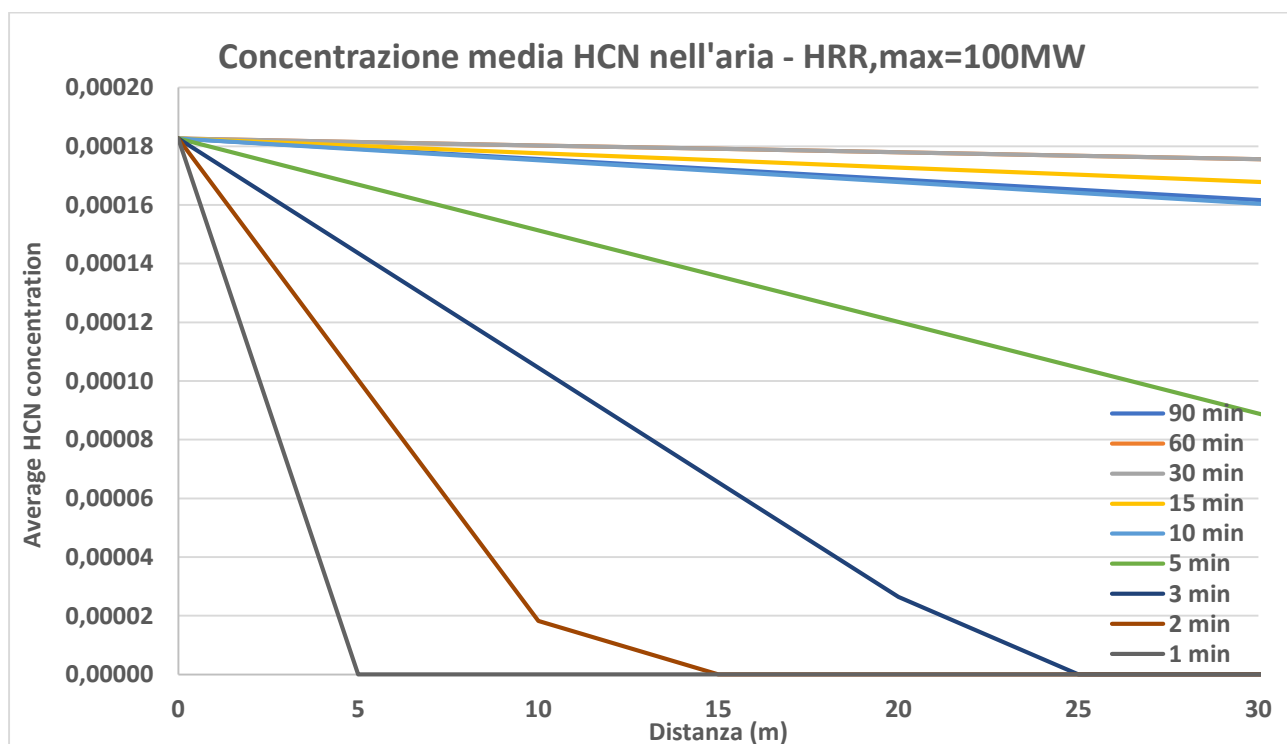


Figura 128 Andamento della concentrazione media di acido cianidrico entro 30 metri dal focolaio

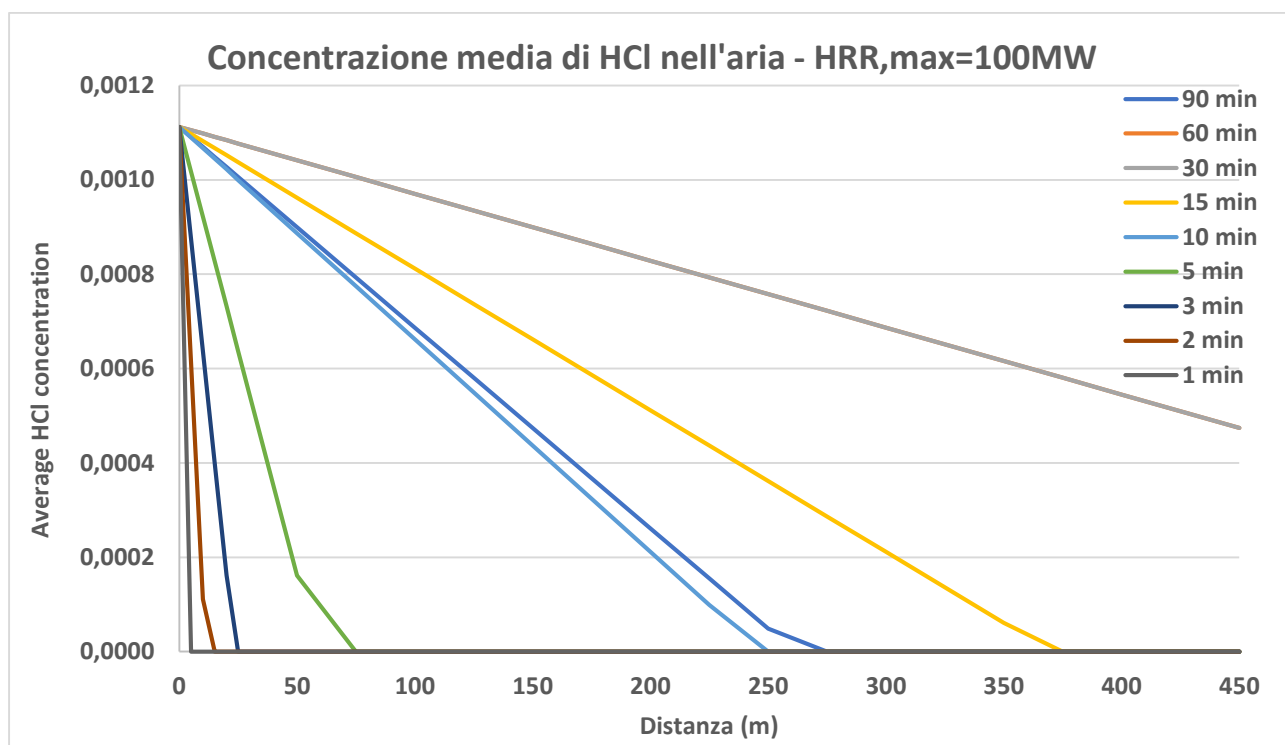


Figura 129 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico nell'aria lungo la galleria

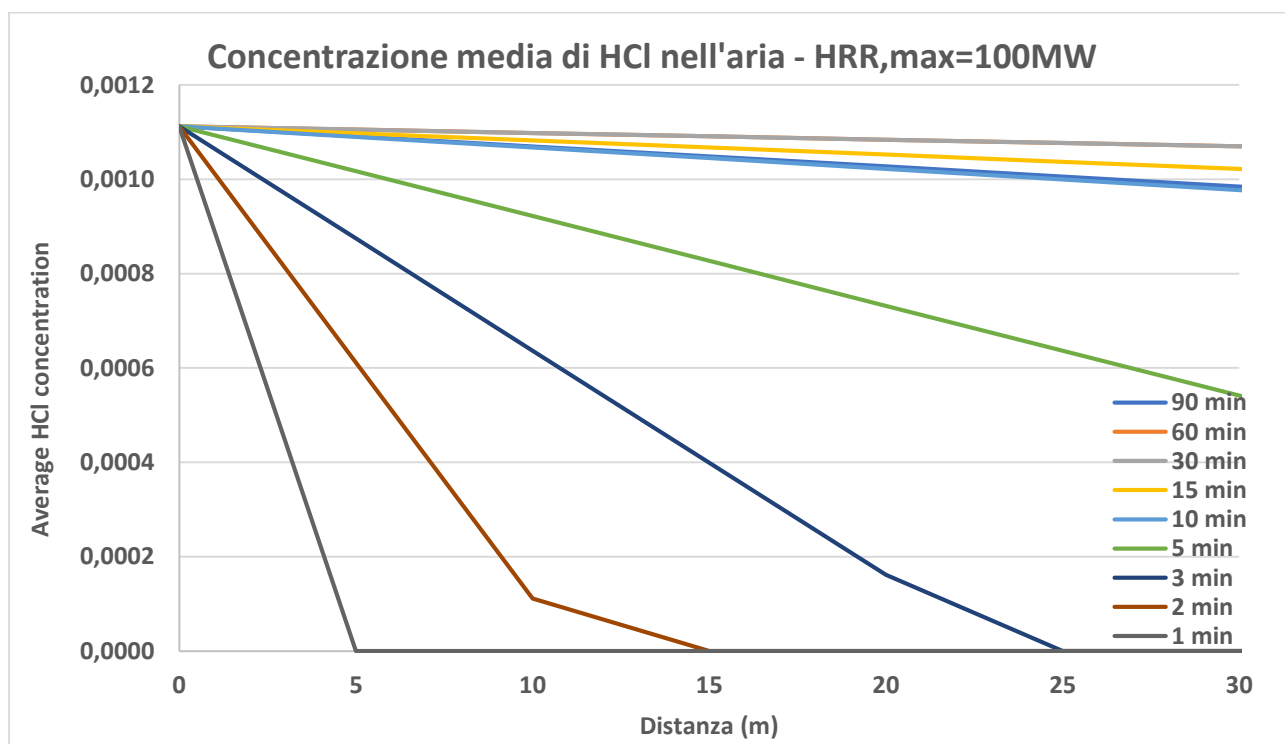


Figura 130 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico nell'aria entro 30 metri dal focolaio

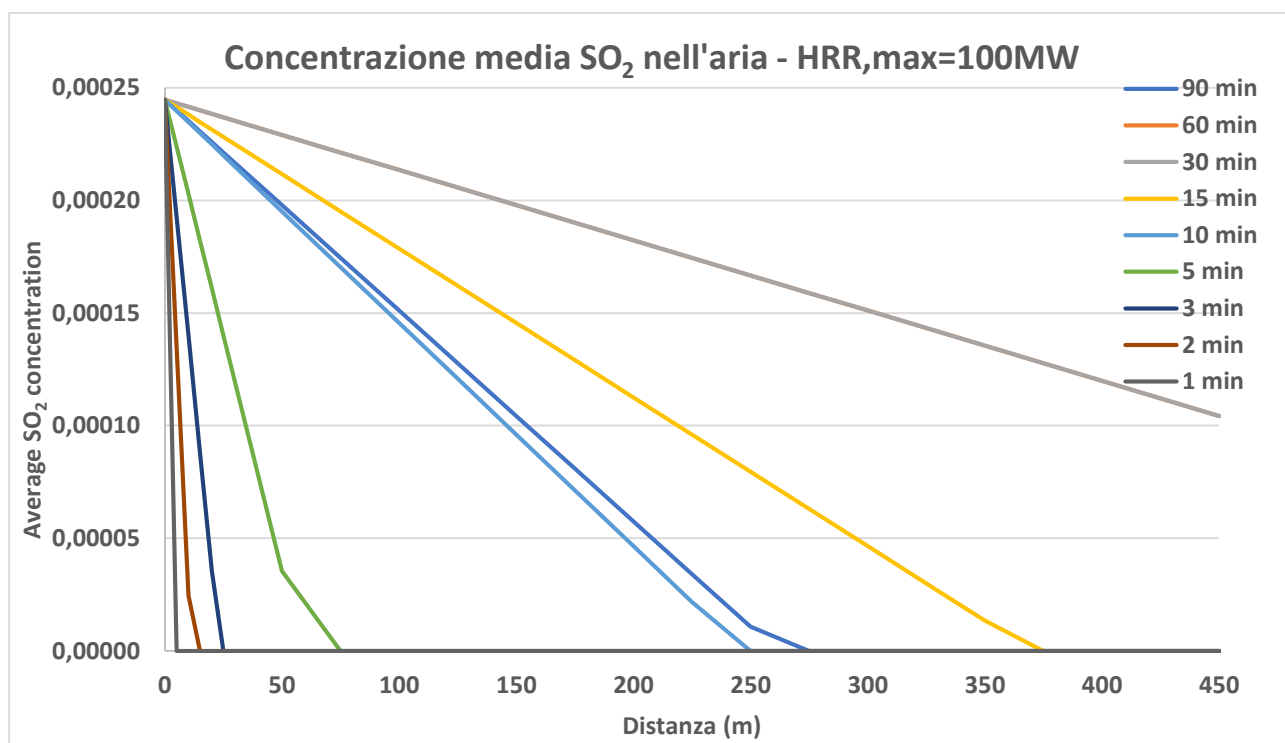


Figura 131 Andamento della concentrazione media di anidride solforosa lungo la galleria

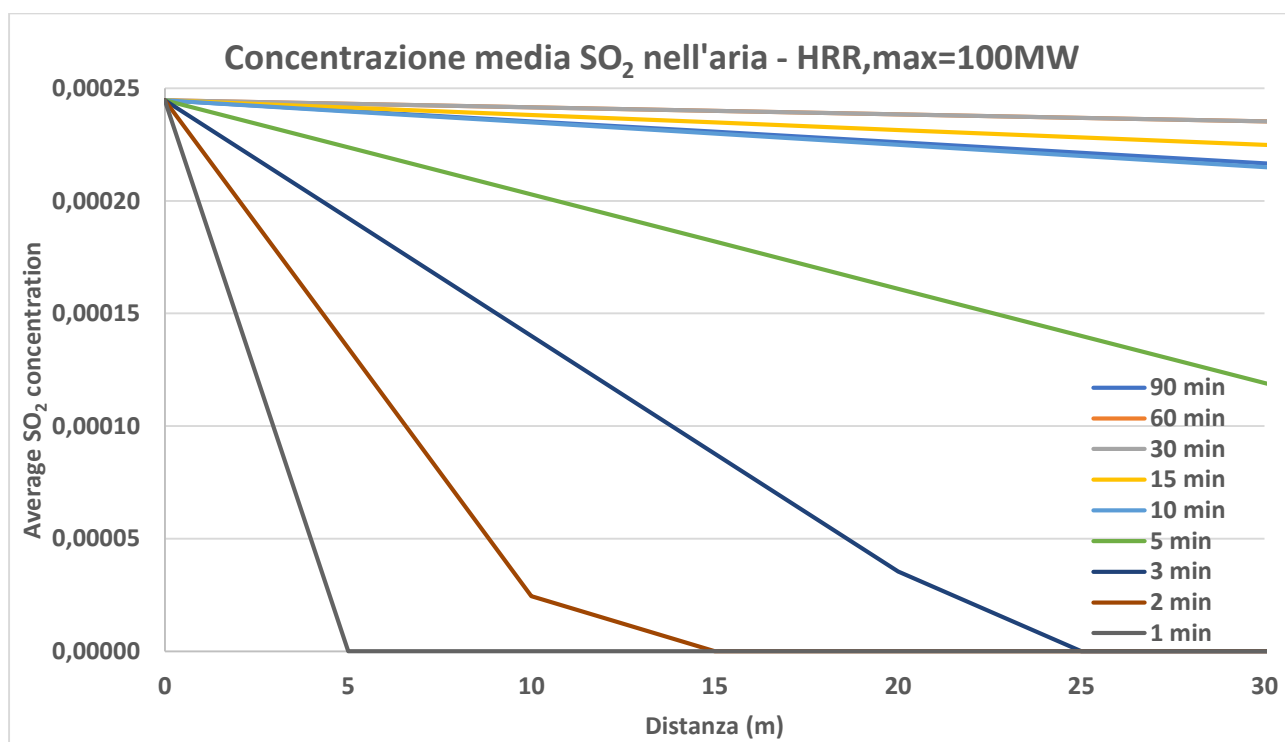


Figura 132 Andamento della concentrazione media di anidride solforosa entro 30 metri dal focolaio

6.4.5 Conclusioni

Come si è potuto osservare il principale problema in riferimento alla vivibilità dell'ambiente riguarda la concentrazione media di monossido di carbonio all'interno della galleria. Questa impone limiti piuttosto

stringenti in quanto già a concentrazioni piuttosto limitate risulta letale. In alcuni casi, come per quanto concerne i focolai 50MW e 100MW, i tempi di azione dei Vigili del Fuoco devono essere piuttosto ridotti al fine di operare in condizioni vivibili. Per tempi superiori a quelli indicati sarebbe necessario abbandonare le operazioni di soccorso per gli intervalli previsti oppure operare con l'utilizzo di sistemi di respirazione automatici.

Per quanto concerne le diverse specie chimiche si può osservare come gli ordini di grandezza delle diverse specie chimiche sono piuttosto diversi. Mentre ossigeno e anidride carbonica si trovano in concentrazioni considerevoli, le altre specie chimiche sono presenti in quantità decisamente inferiori. A titolo di confronto si riporta la figura seguente che mostra le concentrazioni per il focolaio 100MW dopo 90 minuti.

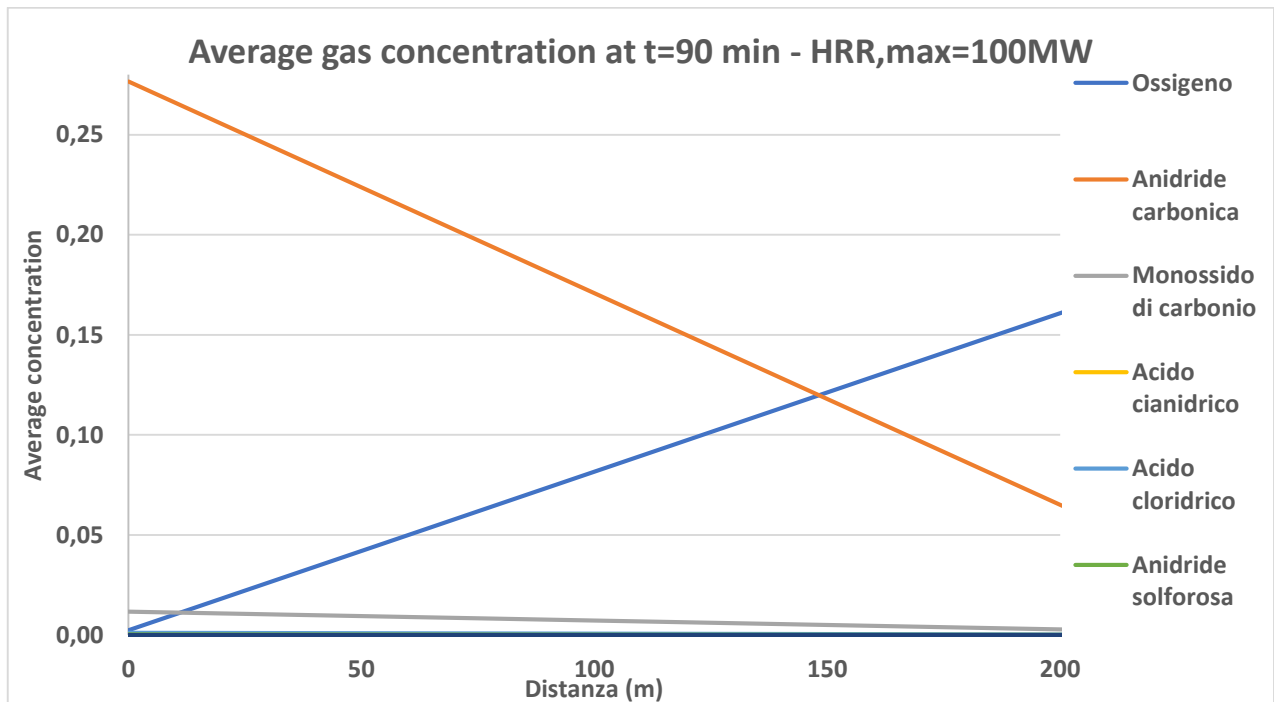


Figura 133 Andamento della concentrazione dei gas per HRR,max=100MW e Tempo=90 minuti

7 Evoluzione degli interventi di prevenzione/protezione e di emergenza in presenza di veicoli elettrici

7.1 Introduzione

8 Conclusioni

9 Riferimenti

Alpert, R. (1971). *Fire induced Turbulent Ceiling-jet*. Notwood (USA): Factory Mutual Research Corp.

ANAS. (2006). *linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali*. Roma (Italia).

Angerer, P., & Nowak, D. (2003). Working in permanent hypoxia for fire protection—impact on health. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 87-102.

ASSOGASTECNICI, & EIGA. (2009). *PERICOLI RELATIVI AI GAS INERTI E ALLA CARENZA DI OSSIGENO*. Milano (Italia): FEDERCHIMICA.

Babrauskas, V. (1980). Flame Lenghts under Ceilings. *Fire and Materials*, 119-126.

Babrauskas, V. (1980). Flame Lenghts under Ceilings. *Fire and Material*, 119-126.

Barry, I. (1998). Fire resistance of tunnel linings. *Proceedings of the Intyernational Conference on reducing Risk in Tunnel Design and Construction*, (p. 99-111). Basel (Svizzera).

Beeston, A. (2002). Refractory solutions for fire protection of tunnel structures. *Proceedings of the 4th International Conference on Tunnel fires*. Basel (Svizzera).

Beyler, C. (1986). Fire plumes and ceiling jets. *Fire Safety Journal*, 53-75.

Beyler, C. (1995). Flammability limits of premixed and diffusion flames. In C. Beyler, *SFPE Hadnbook of Fire Protection Engineering* (p. 2-147). Bethesda (USA): Society of Protection Engineers.

Bjegovic, Planinc, R., Carevic, M., Planinc, M., Bentonidd, T., & Zuljevic, M. (2001). Composite fire resistant tunnel segments. *Proceedings of the 3rd International Conference on Tunnel Fires and Escape From Tunnels*, (p. 177-185). Washington DC (USA).

Both, C., van de Haar, P., Tan, G., & Wolksink, G. (1999). Evaluation of passive fire protection measures for concrete tunel linings. *Procedings of the international Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, (p. 95-104). Lione (Francia).

Bullen, M. L., & Thomas, H. (1979). Compartment fires with non-cellulosic fuels. *Proceedings of the 17th International Symposium on Combustion*, (p. 1139-1148). Pittsburgh (USA).

Carvel, R., & Beard, A. N. (2005). *The handbook of Tunnel Fire Safety*. Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD.

Carvel, R., Beard, A., & Jowitt, P. (2001). How much do tunnels enhance the HRR of fires? *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, (p. 457-466). Madrid (Spagna).

- Comitis, S., Glasser, D., & D., Y. B. (1996). An experimental and modeling study of fires in ventilated ducts. *Combustion and Flame*, 138-156.
- de Ris, J. (1970). Duct fires. *Combustion and Science Technology*, 239-258.
- Delichatsios, M. A. (1975). *Fire Protection of Fibreglass-reinforced Plastic Stacks in Ducts*. Johnston (USA): Factory Mutual Systems.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: Wiley.
- Eisenbahn-Bundesamt. (s.d.). *Test sugli standard antincendio* - www.eisenbahn-bundesamt.de. Eisenbahn-Bundesamt.
- French, S. (1994). Eureka 499 - HGV fire test. *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*, (p. 63-85). Boras (Svezia).
- Grant, G. B., & Drysdale, D. D. (1997). Estimating heat release rates from large-scale tunnel fires. *Proceedings of the 5th International Symposium, Fire Safety Scienze, Melbourne*, (p. 1213-1224). Melbourne (Australia).
- Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi, G., Sciarra, G., & Lamendola, S. (2009). Analisi di Rischio Quantitativa probabilizzata per le gallerie secondo le Linee Guida ANAS. *Sicurezza nei Sistemi Complessi*, (p. 14-15). Bari (Italia).
- Guelzim, A., Souil, J., Son, D. K., Vantelon, J. P., Gabay, D., & Dallest, D. (1994). Modelling of a reverse layer of fire-induced smoke in a tunnel. *Proceedings of the 4th IAFSS International Symposium*, (p. 277-288). Ottawa (Canada).
- Hartman, P., & H., H. (2006). Tunnel Ventilation and Safety in Escape Routes. *Tunneling and Underground Space Technology*, 293-294.
- Huggett, C. (1980). Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, 1-179.
- Hwang, C. C., & Wargo, J. D. (1986). Experimental study of thermally generated reverse stratified layers in a fire tunnel. *Combustion and Flame*, 171-180.
- Ingason, H., & Bobert. (2004). *Fire Development in a Train Coach using Model Scale Test*. Boras (Svezia): SP Report.
- Ingason, H., & Persson, B. (1999). Prediction of optical density using CFD. *Proceedings of the 6th IAFSS International Symposium*, (p. 817-828). Poitiers (Francia).
- International Standard Organisation ISO834. (s.d.). *Fire-resistance tests - Elements of Building Construction*. www.iso.ch.
- Janssens, M., & Parker, B. (1992). Oxygen consumption calorimetry. *Heat Release in Fires*, 31-59.
- Jin, T. (1997). Studies on human behaviour and tenability in the fire smoke. *Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science*, (p. 3-7). Melbourne (Australia).
- Jin, T., & Yamada, T. (1985). Irritating effects of fire smoke on visibility. *Fire Science and technology*, 79-90.
- Jonkman, S., Lentz, A., Vrijling, & J.K. (2010). A general approach for the estimation of loss of life due to natural and technological disasters. *Reliability Engineering and System Safety*, 1123-1133.

- Kanury, A. (1995). Flaming ignition of solid fuels. In S. o. engineers, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (p. 2-201). Bethesda (USA).
- Kotliar, I. (2002). Catastrophic tunnel fires ca be prevented and suppressed. *Proocedings of the 4th International Conference on Tunnel Fires*, (p. 295-304). Basel (Svizzera).
- Lonnermark, A., & Blomqvist, P. (2006). Emissions from an Automobile Fire. *Chemosphere*, 1043-156.
- Massachusetts Highway Deptmt. (1995). *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*. New York (USA): Parsons Brickerhoff.
- McCaffrey, B. (1979). *purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. Washington DC (USA): National Bureau of Standards.
- McCaffrey, B. (1995). Flame height. In S. o. Engineers, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (p. pp. 2.1-2.8). Bethesda (USA): Society of Fire Protection Engineers.
- Ministero dei lavori pubblici italiano, & Ministero degli interni francese. (1999). *Rapporto comune delle commissioni amministrative di inchiesta tecnica italiana e francese relativa alla catastrofe avvenuta il 24 marzo 1999 nel traforo del Monte Bianco*.
- Ministero della Salute. (2015). *Monossido di carbonio (CO)*. Roma (Italia): Ministero della Salute.
- Ministero Federale Tedesco del Traffico. (2002). *Linee guida per l'impiantistica e le operazioni nelle gallerie stradali*. Ministero Federale Tedesco del Traffico.
- Newman, J. (1984). Experimental evaluation of fire-induced stratification. *Combustion and Flame*, 33-39.
- Newman, J., & Tewarson, A. (1983). Flame propagation in ducts. *Combustion and Flame*, 347-355.
- Oka, Y., & Atkinson, G. T. (1995). Smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 305-322.
- Ostman, B. (1992). Smoke and Soot. *Heat Release in Fires*, 233-250.
- Parker, W. J. (1984). Calculation of heat release rate by oxygen consumptiuon for various applications. *Journal of Fire Sciences*, 380-395.
- Perlite Italiana. (s.d.). *Rivestimenti ignifughi costituiti di intonaci a base di vermiculite*. <http://www.perlite.it/it/edilizia/protezioni-passive-dal-fuoco/tunnelling/fendolite-mii>.
- Pighin, S., Bonini, N., Savadori, L., Hadjichristidis, C., Antonetti, T., & Schena, F. (2012). Decision making under hypoxia: Oxygen depletion increases riskseeking for losses but not for gains. *Judgement and Decision Making*.
- Planinc, R., Pavetic, J., Planinc, M., Tisovec, I., Bejgovic, D., Stipanovic, I., . . . Carevic, M. (2002). Tunnel for safe traffic. *Proceedings of the International Conferenze on Tunnel Safety and Ventilation - New Developments on Fire Safety*, (p. 303-310). Graz (Austria).
- Quintiere, J. G., & Rangwala, A. S. (2003). A theory for flame extinction based on flame temeperature. *Proceedings of the 8th International Conference on Fire and Materials*, (p. 113). San Francisco (USA).
- Rasbash, D. J., & Pratt, B. T. (1980). Estimation of the smoke produced in fires. *Fire Safety Journal*, 23-27.
- Rew, C., & Deaves, D. (1999). Fire spread and flame lenght in ventilated tunnels, a model used in Channel tunnel assesments. *Proceedings of Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, (p. 385-406). Lione (Francia).

- Saito, N., Yamada, T., Sekizawa, A., Yanai, E., Watanabe, Y., & Miyazaki, A. (1995). Experimental study on fire behaviour in a wind tunnel with reduced scale model. *Proceedings of the 2nd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, (p. 303-310). Granada (Spagna).
- sitmb. (s.d.). Tratto da sitmb.com: <http://www.sitmb.com/it/gestion.php>
- Steinert, C. (1994). Smoke and heat production in tunnel fires. *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*, (p. 10-11). Boras (Svezia).
- Tewardson, A. (2008). Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fires. In P. Di Nenno, D. Drysdale, & C. e. Beyler, *The SFPE Handbook of Fire Protection* (p. 3-109 -- 103-194). Quincy, MA (USA): National Fire Protection Association.
- Tewarson, A. (1982). Experimental evaluation of flammability parameters of polymeric materials. *Flame-Retardant Polymeric Materials*, 130-142.
- Tewarson, A. (1984). Fully developed enclosure fires of wood cribs. *Proceedings of the 20th International Symposium on Combustion*, (p. 1555-1566). University of Michigan (USA).
- Tewarson, A. (1988). Generation of heat and chemical compounds in fires. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, (p. 1-179). Bethesda (USA).
- Tewarson, A. (1995). Generation of heat and chemical compounds in fires. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, (p. 3-78/3-81). Bethesda (USA).
- Thomas, P. H. (1958). *Movement of Buoyant Fluid against a Stream and the Venting of Underground Fires*. Watford (Regno Unito): Fire Research Station.
- Thomas, P. H. (1968). *The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against an Air Flow*. Watford (Regno Unito): Fire Research Station.
- Thomas, P. H., Bullen, M. L., Quintiere, J. G., & McCaffrey. (1980). Flashover and instabilities in fire behavior. *Combustion and Flame*, 159-171.
- TMB, G. (s.d.). *tunnelmb.net*. Tratto da <https://www.tunnelmb.net/it-IT/dispositivi-di-sicurezza>
- Van der Graaf, J., C., B., & Wolsink, G. M. (1999). Fibrous concrete, safe and cost-effective tunnels. *Proceedings of the international Conference on Tunnel Fire and Safety Conference*, (p. Paper n.17). Rotterdam (Paesi Bassi).
- Van der Leur, p. H. (1991). *Tunnel Fire Simulationss for the Ministry of public Works*. TNO Report.
- Van Olst, D. (1998). Fire protection in tunnels, a necessity or an exaggeration? *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and rail Tunnels (SIRRT)*, (p. 337-345). Nizza (Francia).
- Vantelon, J. P., Quach, D., Son, D. K., Gabay, D., & Dallest, D. (1991). Investigation of fire-induced smoke movement in tunnels and stations: an application to the Paris Metro. *Investigation Proceedings of the 3rd IAFSS International Symposium*, (p. 907-918). Edimburgh (Regno Unito).
- Vuilleumier, F., Weatherill, A., & Crausaz, B. (2002). safety aspects of railway and road tunnel: example of the lotschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology*, 153-158.
- Wang, S., Liu, C., Ma, G., Cao, S., Zhang, J., Lu, D., & He, C. (2019). Experimental Investigation on the Influence of Regional Concrete Spalling on Shield Tunnel Segments. *ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING*.

Wetzig, V. (2001). Destruction mechanism in concrete material in case of fire, and protection systems. *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels (SIRRT)*, (p. 281-290). Madrid (Spagna).

XIII Legislatura. (s.d.). *Disegni di Legge e Relazioni: Documento 144, n 2.*

Zhang, Y., Zeiml, M., Pichler, C., & Lackner, R. (2014). Model-based risk assessment of concrete spalling in tunnel linings under fire loading. *ENGINEERING STRUCTURES*, 207-215.

10 Indice delle figure

Figura 1 Grandi gallerie transfrontaliere presenti sul confine italiano (Vuilleumier, Weatherill, & Crausaz, 2002).....	4
Figura 2 Gerarchia degli obbiettivi da perseguire nella sicurezza.....	11
Figura 3 Principali strategie in funzione degli obbiettivi da perseguire (ANAS, 2006).....	12
Figura 4 Risposta delle componenti ai sistemi di sicurezza (ANAS, 2006)	13
Figura 5 Principi di progettazione proposti dalle linee guida (ANAS, 2006)	13
Figura 6 Diagramma a farfalla delle topologie di interventi di sicurezza	14
Figura 7 Lo schema identifica come efficacia una proprietà di sistema dettata da efficienza ed affidabilità	14
Figura 8 Sistemi di sicurezza citati nelle Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali	15
Figura 9 Sistema galleria (in esercizio) assimilato a sistema termodinamico	17
Figura 10 Fattori causali all'evento incidentale.....	18
Figura 11 Traiettorie rappresentanti gli scenari di deviazione rispetto all'esercizio (ramo principale).....	19
Figura 12 Sistema termodinamico galleria in condizione di emergenza.....	19
Figura 13 Parametri caratterizzanti la gestione dell'esodo	21
Figura 14 Schematizzazione del rischio	22
Figura 15 Componenti e fasi dell'analisi del rischio	22
Figura 16 Fasi dell'analisi e gestione del rischio	23
Figura 17 Analisi del rischio nel sistema galleria stradale. Come si può osservare alla base del diagramma vi è il modello di rischio che è alla base della stima del danno; parametro fondamentale per il dimensionamento degli interventi di sicurezza	23
Figura 18 Diagramma a farfalla, costituito di metodi analitici basati sull'analisi delle cause ed analisi delle conseguenze	24
Figura 19 Piano di rischio sociale.....	26
Figura 20 Sintesi dei criteri di progettazione.....	27
Figura 21 Procedura di progettazione	28
Figura 22 Schematizzazione della schedatura	30
Figura 23 Analisi storica dell'incidentalità in funzione del volume di traffico per gallerie unidirezionali.....	35
Figura 24 Interpolazione di dati da documenti PIARC (1999) aggiornati al 2005	35
Figura 25 Schematizzazione dell'analisi di vulnerabilità.....	37
Figura 26 Andamento indice di ordinalità nei vari gruppi.....	38
Figura 27 Casi in cui è necessaria l'analisi di rischio	41
Figura 28 Tipologie di zone filtro a prova di fumi in accordo con D.M. 3/8/2015 (Codice prevenzione degli incendi)	42
Figura 29 Esempio di uscita di emergenza	43
Figura 30 Esempio di collegamento pedonale. Si notino i dettagli dell'impiantistica di sicurezza come gli estintori sulla destra, l'illuminazione e i sistemi di allarme.....	43
Figura 31 Schema di collegamento pedonale di sicurezza nel caso di galleria a doppia canna	44

Figura 32 segnale di postazione idrante UNI 7546/8	52
Figura 33 Comparazione tra fatalità e numero di persone esposte (Jonkman, Lentz, Vrijling, & J.K., 2010) .	58
Figura 34 Dettagli della galleria (TMB, s.d.).....	59
Figura 35 Evoluzione storico del traffico nel traforo del Monte Bianco per grandi categorie. Dati forniti da Società Italiana per Azioni per il Traforo del Monte Bianco (sitmb) (sitmb, s.d.)	60
Figura 36 Volumi di traffico nel tempo all'interno del traforo del Monte Bianco (XIII Legislatura).....	61
Figura 37 Andamento dell'incidentalità nel traforo del Monte Bianco (XIII Legislatura).....	61
Figura 38 Tassi di incidentalità per volume di traffico nel tempo	62
Figura 39 Nuova configurazione del sistema di sicurezza nella galleria del Monte Bianco (TMB, s.d.).....	66
Figura 40 La prima fotografia dell'incidente (Carvel & Beard, 2005)	67
Figura 41 Carta topografica della galleria del San Gottardo. Sono indicati l'estensione dell'incendio, calore e fumi.....	68
Figura 42 Vista della sezione della galleria del San Gottardo. Nella parte superiore si possono osservare i condotti di ventilazione. A destra il condotto dell'aria fresca mentre a sinistra il condotto dell'aria viziata.	69
Figura 43 Fotografie dell'autocarro 1 e 2 scattate durante e successivamente all'incendio	70
Figura 44 Danni strutturali sopra l'autocarro 1 e l'autocarro 2.....	70
Figura 45 Autocarri dal 3 al 7 coinvolti nell'incendio. I suddetti veicoli erano in coda dietro l'autocarro italiano coinvolto nell'incidente iniziale	71
Figura 46 Immagine del rimorchio dell'autocarro numero 1	73
Figura 47 I resti dell'autocarro numero 2.....	74
Figura 48 Liquido infiammabile nella grondaia	75
Figura 49 Immagine rappresentativa dell'entità dei danni dovuti al cortocircuito della batteria nell'autocarro numero 1	78
Figura 50 Fasi di sviluppo di un incendio (Carvel & Beard, 2005)	83
Figura 51 (a) Schema di incendio controllato dal combustibile (b) incendio controllato dalla ventilazione in una situazione compartimentata (c) e (d) galleria naturalmente ventilata (e) e (f) effetti della ventilazione forzata (Carvel & Beard, 2005)	83
Figura 52 Propagazione di un incendio attraverso fiammate esterne nel grattacielo Neo-Soho a Jakarta (2016) (Reprinted with permission from MDM Publishing Ltd: Asia Pacific Fire Magazine April 2017 Issue 61)	86
Figura 53 Andamento qualitativo dei flussi massici in funzione del parametro e dominio del regime di combustione.....	90
Figura 54 Schemi da (Carvel & Beard, 2005) (a) stratificazione di fumi in una galleria velocità d'aria molto bassa 0-0.3m/s, (b) stratificazione di fumi in una galleria con una velocità d'aria pari a 1m/s (c) stratificazione di fumi tipica del gruppo (2) (d) stratificazione di fumi tipica del gruppo (3) con una velocità di flusso maggiore della velocità critica u_c	92
Figura 55 I principali percorsi di flusso in prossimità del plume dell'incendio (Carvel & Beard, 2005)	92
Figura 56 Schematizzazione delle tre regioni in funzione della stratificazione della temperatura (Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, 1984)	93
Figura 57 Parametri geometrici fiamma in presenza della calotta	100
Figura 58 Influenza della velocità di ventilazione sulla lunghezza della fiamma	101
Figura 59 Comparazione tra i dati HGV-EUREKA 499 e Memorial test	101
Figura 60 Andamento della lunghezza di fiamma non dimensionale in funzione di HRR.....	102
Figura 61 Le zone caratteristiche di un incendio in gallerie ad alta densità veicolare.....	102
Figura 62 Tipologie di protezione antincendio passiva: (a) secondo strato di materiale isolante applicato direttamente al supporto; (b) pannello di rivestimento ; (c) aggiunta di fibre alla miscela di calcestruzzo. (Carvel & Beard, 2005)	108
Figura 63 Curva tempo-temperatura elaborata da Rijkswaterstaat sviluppata in riferimento allo standard dei Paesi Bassi.....	108

Figura 64 Curva RABT (conosciuta come curva ZTV)	109
Figura 65 Montaggio del sistema FireBarrier a protezione dei supporti dei rifugi di emergenza della galleria del Monte Bianco durante la ristrutturazione (Carvel & Beard, 2005)	110
Figura 66 Curva tempo-temperatura ISO 834	110
Figura 67 Pannello Promat	111
Figura 68 Sistema FirePASS	113
Figura 69 Esempio di schema di sistema FirePASS per la prevenzione di incendi in un Data Center (FirePASS)	114
Figura 70 Stima di auto elettriche ed ibride negli anni	116
Figura 71 Componenti ad alta tensione dei veicoli elettrici	119
Figura 72 Cavi per corrente in alta tensione	119
Figura 73 Veicolo elettrico Dual Motor	119
Figura 74 Pianale formato da pacco batteria	120
Figura 75 Componenti principali necessari per la fase di avviamento dei veicoli ibridi	120
Figura 76 Supercapacitore installato in un veicolo ibrido	121
Figura 77 Inverter presente nei veicoli	121
Figura 78 Gruppo inverter	122
Figura 79 Inverter/Converter	122
Figura 80 Posizione di operatività in caso di incidente in presenza di ventilazione	122
Figura 81 Foto della galleria San Maurizio (vista della zona a cielo aperto tra i due tratti di galleria, dove si possono notare le rampe di accesso ed uscita ad una sola corsia (non esistono altre rampe oltre quelle visibili dalla foto).	125
Figura 82 si riporta una fotografia aerea della zona della galleria, con le linee gialle indicanti le rampe di imbocco/uscita e la zona intermedia a cielo aperto.	126
Figura 83. Sezione trasversale della galleria con le due canne e la sagoma di ingombro della circolazione stradale.	126
Figura 84 Carico d'incendio per potenza massima di focolaio pari a 8MW	127
Figura 85 Carico d'incendio per potenza massima di focolaio pari a 50MW	128
Figura 86 Carico d'incendio per potenza massima di focolaio pari a 100MW	128
Figura 87 Confronto tra i diversi carichi di incendio 8MW, 50MW e 100MW	129
Figura 88 Andamento del flusso massico per un focolaio di potenza massima 8MW	130
Figura 89 Campo delle temperature per HRR,max=8MW	131
Figura 90 Andamento delle temperature per HRR,max=8MW	132
Figura 91 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 50MW	133
Figura 92 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 50MW	133
Figura 93 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 50MW	134
Figura 94 Campo delle temperature medie per un focolaio di potenza massima 100MW	135
Figura 95 Andamento della frazione molare di ossigeno nell'aria calcolata per diversi tempi	137
Figura 96 Andamento delle diverse concentrazioni medie di ossigeno nel tempo a diversa distanza	138
Figura 97 Andamento della concentrazione media di anidride carbonica nel tempo	139
Figura 98 Effetti dell'anidride carbonica (ASSOGASTECNICI & EIGA, 2009)	139
Figura 99 Andamento dell'anidride carbonica nel tempo entro i 30 metri dal focolaio	140
Figura 100 Confronto e valutazione delle condizioni ammissibili per anidride carbonica e ossigeno entro i 30 metri	140
Figura 101 l'andamento del monossido lungo la galleria per diversi tempi. L'origine viene posta in presenza del focolaio	141
Figura 102 Analisi della concentrazione di monossido di carbonio entro i 30 metri	142
Figura 103 Andamento della concentrazione di acido cloridrico nell'aria per diversi tempi	142

Figura 104 Andamento della concentrazione di acido cloridrico nell'aria entro i 30 metri.....	143
Figura 105 Andamento della concentrazione di acido cianidrico lungo la galleria	143
Figura 106 Andamento della concentrazione di acido cianidrico entro i 30 metri dal focolaio	144
Figura 107 Andamento dell'anidride solforosa nell'aria lungo la galleria	144
Figura 108 Andamento dell'anidride solforosa nell'aria entro i primi 30 metri dal focolaio	145
Figura 109 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria lungo la galleria	146
Figura 110 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria entro i 30 metri dal focolaio.....	147
Figura 111 Andamento della concentrazione media di anidride carbonica nella galleria	147
Figura 112 Andamento della concentrazione di anidride carbonica entro 30 metri dal focolaio	148
Figura 113 Andamento del monossido di carbonio lungo la galleria	149
Figura 114 Andamento del monossido di carbonio entro 30 metri dal focolaio	149
Figura 115 Andamento della concentrazione media di acido cianidrico nell'aria lungo la galleria	150
Figura 116 Andamento della concentrazione media dell'acido cianidrico entro 30 metri dal focolaio	150
Figura 117 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico nell'aria	151
Figura 118 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico entro 30 metri dal focolaio.....	151
Figura 119 Andamento della concentrazione di anidride solforosa lungo la galleria	152
Figura 120 Andamento della concentrazione di anidride solforosa entro 30 metri dal focolaio	152
Figura 121 Rese chimiche considerate	153
Figura 122 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria lungo la galleria	153
Figura 123 Andamento della concentrazione di ossigeno nell'aria entro i 30 metri dal focolaio.....	154
Figura 124 Andamento della concentrazione dell'anidride carbonica lungo la galleria	155
Figura 125 Andamento della concentrazione dell'anidride carbonica entro 30 metri dal focolaio.....	155
Figura 126 Andamento della concentrazione di monossido di carbonio lungo la galleria	156
Figura 127 Andamento della concentrazione media di acido cianidrico nell'aria lungo la galleria	158
Figura 128 Andamento della concentrazione media di acido cianidrico entro 30 metri dal focolaio	158
Figura 129 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico nell'aria lungo la galleria.....	159
Figura 130 Andamento della concentrazione media di acido cloridrico nell'aria entro 30 metri dal focolaio	159
Figura 131 Andamento della concentrazione media di anidride solforosa lungo la galleria	160
Figura 132 Andamento della concentrazione media di anidride solforosa entro 30 metri dal focolaio	160
Figura 133 Andamento della concentrazione dei gas per HRR,max=100MW e Tempo=90 minuti.....	161