

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea

SICUREZZA DELLE GALLERIE STRADALI IN ESERCIZIO

Relatore
Prof. Pierpaolo Oreste

Candidato
Luciano Laterza

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

1	Introduzione sulla sicurezza delle gallerie stradali in esercizio	3
2	Rischi nell'esercizio delle gallerie stradali	5
2.1	L'Incendio in galleria.....	5
2.1.1	Sviluppo e propagazione dei fumi	8
2.1.2	Distribuzione della temperatura nei modelli di incendio	14
2.2	Pericolo e rischio connesso al trasporto di merci pericolose in galleria	16
2.3	Gli sversamenti di sostanze liquide infiammabili	19
2.4	Il fenomeno del get flame (connesso ai rilasci in fase gassosa e liquida).....	20
2.5	Le esplosioni e la loro classificazione.....	21
2.6	Il rischio di incendio classificato per tipologia di incendio	22
2.6.1	Il pool fire.....	22
2.6.2	Il jet fire.....	23
2.6.3	Il fireball.....	24
2.6.4	Il flash fire	24
2.7	Il rischio di esplosione in galleria	25
2.7.1	Gas (o vapor) cloud explosion	25
2.7.2	Rottura di cisterne o serbatoi contenenti gas compresso	28
2.7.3	BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion)	28
2.7.4	Esempi di interazione fra esplosioni ed incendi e di altri scenari possibili	29
2.8	Cenni sulla modellizzazione del flusso delle esplosioni in galleria.....	31
2.8.1	Esempio di test per la determinazione della DDT distance	33
2.8.2	Picco di pressione nelle gas (o vapor) cloud explosion	34
3	Eventi storici rilevanti	41
3.1	Incidente del Traforo del Monte Bianco (Italia - Francia).....	41
3.1.1	Caratteristiche e premesse.....	41
3.1.2	Cronologia dello scenario	42
3.1.3	Conseguenze dell'incidente	45
3.2	Incidente del tunnel dei Monti Tauri (Austria)	46
3.3	Incidente del tunnel del San Gottardo (Svizzera)	48
3.3.1	Ubicazione e caratteristiche	48
3.3.2	Descrizione dello scenario e conseguenze	48
4	Dati disponibili sull'incidentalità e sugli incendi in galleria	51
4.1	Considerazioni dedotte dai dati statistici	52
4.1.1	Dati sugli incendi	54
4.1.2	Tassi di incidenti in galleria e tassi di incendi in galleria	55
4.1.3	Dati inerenti il Traforo del Monte Bianco	56
5	Legislazione in materia di sicurezza delle Gallerie stradali.....	58
5.1.1	Premesse.....	58
5.1.2	Cronologia e nomenclatura legislativa.....	59
5.1.3	Interpretazione della legislazione vigente.....	60
5.1.4	Capisaldi della Direttiva Europea 2004/54/CE	61
5.1.5	Ruoli e funzioni previsti dalla Direttiva Europea 2004/54/CE	65
5.1.6	Allegati e documentazione della Direttiva Europea 2004/54/CE	68
5.2	Decreto Legislativo 2006 n.264	69
5.2.1	Capisaldi del Decreto Legislativo 2006 n.264	69
5.2.2	Ruoli e funzioni previsti dal Decreto Legislativo 2006 n.264	71
5.2.3	Allegati e documentazione del Decreto Legislativo 2006 n. 264	73
5.3	Linee Guida ANAS per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali	76

5.3.1	Premesse.....	76
5.3.2	Aspetti fondamentali del metodo di progettazione della sicurezza in galleria secondo i dettami delle linee guida	76
5.4	Il Decreto Ministeriale del 10 Marzo 1998 e considerazioni tecniche riguardo agli incendi ..	77
5.5	Interpretazione.....	77
6	L'Analisi di Rischio come tecnica per progettare la galleria stradale dal punto di vista della sicurezza (Progettazione della sicurezza di una galleria e Analisi di Rischio).....	88
6.1.1	Cenni storici	88
6.1.2	Considerazioni e definizioni	88
6.1.3	Progettazione della sicurezza secondo i dettami della direttiva Europea 2004/54/CE, del Decreto.264 e delle Linee Guida ANAS per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali.....	95
6.1.4	Modelli di processo e sistema galleria	102
6.1.5	Il modello fluidodinamico del sistema galleria.....	107
6.1.6	Il modello termodinamico del sistema galleria.....	109
6.1.7	Modello termodinamico e modello fluido dinamico.....	109
6.1.8	Pericolo, evento incidentale, danno	110
6.1.9	Evento iniziatore, evento incidentale, albero degli eventi	116
6.1.10	Albero delle cause	123
6.2	L'analisi di rischio	125
6.2.1	La galleria virtuale	140
6.2.2	Livelli di analisi di rischio e metodi di analisi di rischio	142
7	Elementi e impianti oggi attuabili per ridurre il rischio nelle gallerie stradali	144
7.1	l'infrastruttura di sicurezza e misure di sicurezza.....	144
7.2	Misure di sicurezza antincendio.....	148
7.3	Influenza del design (progettazione) sul rischio di esplosioni e sul rischio di incendio.....	160
7.4	Influenza del drenaggio e del design sul rischio di incendio e sul rischio di sversamento di sostanze tossiche in fase liquida.....	162
7.5	Aspetti strutturali (design) su cui operare in fase di progettazione e di adeguamento per aumentare la sicurezza	164
7.6	La ventilazione meccanica	165
7.7	L'illuminazione in galleria.....	175
7.8	Le barriere ridirettive a Led	180
7.9	La via di fuga sospesa	182
7.10	Il by- pass	183
7.11	Impianti o sistemi di rivelazione e allarme incendi	184
7.12	Sistemi per il rivelamento del surriscaldamento dei veicoli pesanti	186
7.13	Sistemi di rilevazione del traffico	187
7.14	Sistemi di videosorveglianza	188
7.15	Sistemi di monitoraggio della qualità dell'aria in galleria	190
7.16	Sistemi di comunicazione per gli utenti	191
7.17	Il manto stradale in calcestruzzo	193
7.18	Il rivestimento della volta e i danni strutturali	196
7.19	La galleria dinamica e lo smart tunnel	199
8	Considerazioni conclusive	202
	Bibliografia	208

1 Introduzione sulla sicurezza delle gallerie stradali in esercizio

Negli anni che precedono la tragedia del Monte Bianco, il tema della sicurezza delle gallerie non destava grande interesse nell'opinione pubblica ed era un argomento di interesse esclusivo dei tecnici del settore venendo spesso considerato come un aggravio dei costi e non come un investimento sulle stesse opere.

Il tema della sicurezza delle gallerie stradali ha acquisito nel corso degli anni importanza sociale sempre crescente in relazione alla domanda di velocizzazione degli spostamenti delle persone e delle merci e all'incremento del volume di traffico.

Lo sviluppo tecnologico che ad esempio permette una maggiore complessità delle gallerie o che permette, l'introduzione dei veicoli elettrici, induce il progettista della sicurezza a riconsiderare periodicamente i livelli di rischio tollerabile.

Nel futuro prossimo questi aspetti socio economici porteranno ad un ulteriore incremento del volume di traffico e molte altre gallerie di elevata lunghezza saranno costruite.

Un altro aspetto che merita molta attenzione è il grado di vetustà delle gallerie presenti su tutto il territorio europeo che richiedono la rivisitazione degli aspetti che concernono la sicurezza e quindi adeguamenti di carattere strutturale e tecnologico.

Per questi motivi la legislazione in materia di sicurezza delle gallerie nel corso degli anni deve rispondere alla domanda di sicurezza da parte dell'individuo e della collettività.

Dunque, oggi giorno la mutata sensibilità nei confronti di questo tema permette di integrare i principi della progettazione della sicurezza con quelli tradizionali della progettazione delle opere e di adeguare le opere del passato agli standard attuali di sicurezza.

È opportuno precisare che tutti gli sforzi inerenti la progettazione della sicurezza possono essere vanificati dai comportamenti scorretti dei conducenti dei veicoli e quindi, il tema della sicurezza delle gallerie deve essere esteso alla formazione non solo degli addetti all'opera ma anche dei fruitori dell'opera stessa.

Per queste ragioni quello che in gergo va sotto il nome di "fattore umano" deve essere tenuto in seria considerazione nella progettazione della sicurezza di una galleria stradale.

Si noti anche che gli incidenti sulle strade in galleria presentano una frequenza inferiore rispetto agli incidenti sulle strade non in galleria in quanto le condizioni meteorologiche avverse non costituiscono un fattore di rischio e in quanto la caratteristica di ambiente confinato della galleria induce ad una guida più responsabile.

A conferma di questo dato di fatto le statistiche dimostrano che la percentuale di incidenti sui tratti autostradali in galleria italiani ammonta a circa il 4,5% del totale degli incidenti in autostrada.

Tuttavia questa stessa caratteristica di ambiente confinato, unita alla grande quantità di liquidi e solidi combustibili distribuiti su uno sviluppo unidimensionale, all'incidenza della ventilazione naturale e/o forzata, determina condizioni favorevoli all'innescò e alla propagazione degli incendi e dei fumi ed incide negativamente sugli aspetti che riguardano gli interventi e i soccorsi in caso di incidenti ed incendi in galleria rendendo estremamente difficoltoso l'accesso dall'esterno ed il raggiungimento delle sezioni interessate del tunnel.

2 Rischi nell'esercizio delle gallerie stradali

2.1 L'Incendio in galleria

Le fasi di un incendio che avviene in un ambiente confinato sono le seguenti [1]:

- Fase di ignizione
- Fase di propagazione
- Fase di flash-over
- Fase di estinzione

Queste quattro fasi possono essere diagrammate esprimendo la variazione della temperatura in funzione del tempo durante l'incendio come si vede nella figura seguente:

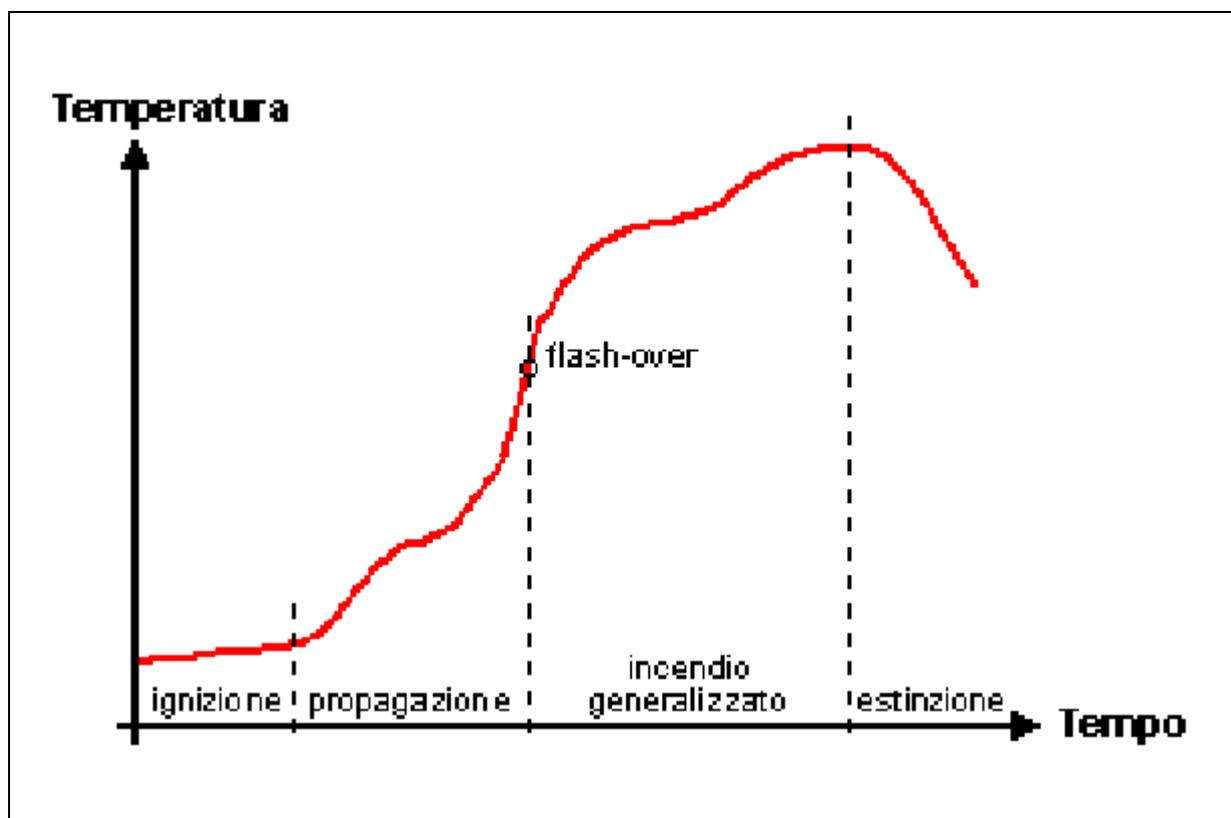


Figura 1: Fasi evolutive dell'incendio [2]

La pendenza della curva all'inizio della fase di ignizione dipende dal tipo di combustibile interessato dall'incendio e dal flusso termico che in questa fase viene ad instaurarsi.

In generale si può dire che nella fase di ignizione dell'incendio la temperatura cresce lentamente.

Nella fase di propagazione l'incremento della temperatura è molto elevato e può essere assimilato ad un andamento esponenziale in funzione del tempo.

Nella fase di propagazione si ha una notevole produzione di fumi e miscele di gas infiammabili che assieme al combustibile sostengono la propagazione dell'incendio.

Nella fase di flash-over l'incendio presenta il suo massimo sviluppo dopo il quale inizia una fase di riduzione della temperatura e quindi il raffreddamento e l'estinzione dell'incendio.

Nel gergo tecnico si dice che la fase di propagazione è **controllata dal combustibile** mentre la fase di flash-over è **controllata dalla ventilazione**, cioè la fase di flash-over dipende in maniera preponderante dal comburente cioè dall'apporto di ossigeno che è appunto agevolato dalla ventilazione.

L'aumento del volume di traffico degli ultimi anni ha accresciuto il livello di rischio [3] connesso agli incendi in galleria.

La conoscenza del fenomeno fisico che l'incendio costituisce è fondamentale ai fini della progettazione dei sistemi di sicurezza e tale conoscenza scaturisce in prevalenza da esperimenti condotti su grande scala realizzati in condizioni controllate (modelli di combustione), dallo studio di incendi realmente accaduti oltre che da studi scientifici teorici.

Un esempio di modello di combustione per un mezzo pesante è rappresentato nella seguente figura che mostra come l'incendio partendo dalla cabina del camion, caricato con 2 tonnellate di mobili, si sia propagato a

tutto il veicolo nel giro di 10 minuti e come l'estinzione spontanea dell'incendio sia iniziata solo dopo un'ora dall'innesco dell'incendio.

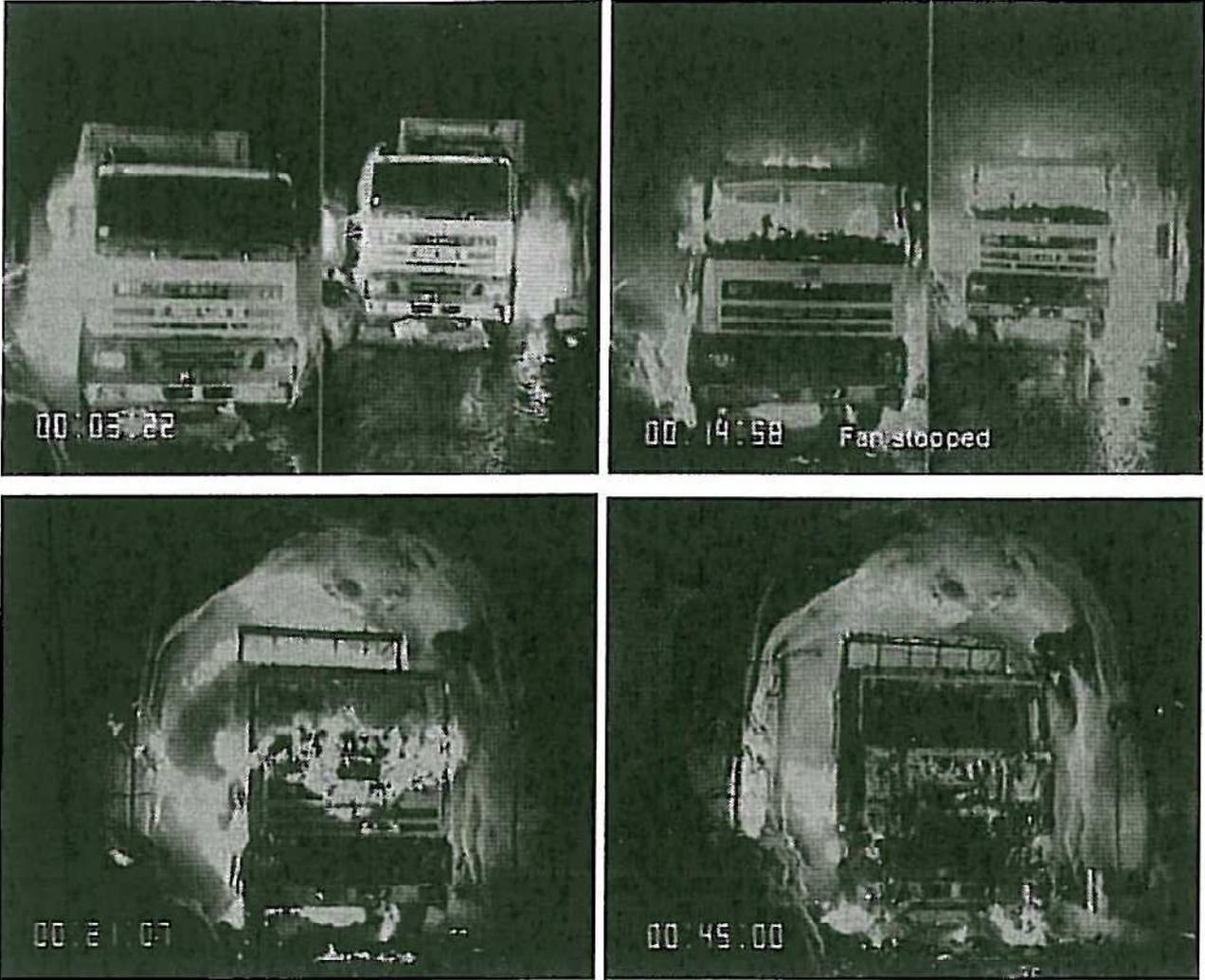


Figura 2: Esempio di modello di combustione [4]

2.1.1 Sviluppo e propagazione dei fumi

Il fumo e i gas tossici prodotti da un incendio costituiscono il maggior pericolo da considerare nella progettazione delle gallerie.

In particolare, i fumi [5], sono la causa della rapidissima riduzione della visibilità che ostacola o addirittura impedisce del tutto la fuga in uno scenario di incidente con incendio.

I fumi ed i gas tossici prodotti in un incendio vanno dagli 80 m³ ai 100 m³ per kg di materiale bruciato.

Dunque la generazione, lo sviluppo e la propagazione dei fumi devono essere studiati con molta attenzione.

Dall'analisi degli eventi incidentali con incendio pregressi si evince come l'incendio si inneschi in corrispondenza del telaio dei veicoli in corrispondenza del combustibile e di altre fonti di innesco e si propaga quindi a tutto il veicolo e da questo ai veicoli circostanti a causa della ossigenazione della ventilazione forzata o della ventilazione naturale.

L'ambiente chiuso della galleria confina il calore e i gas sprigionati dall'incendio mentre la ventilazione può favorire l'ulteriore concentrazione dei fumi caldi in determinati tronchi stradali in galleria e quindi determinare l'incremento della temperatura e quindi la propagazione dell'incendio da veicolo a veicolo.

Ne consegue un ambiente surriscaldato con elevatissima concentrazione di fumi tossici e il volume di traffico influenza fortemente l'estensione di tale ambiente.

La rapida propagazione dei fumi in galleria deriva dalle caratteristiche termodinamiche dei fumi e dell'aria e dipende dalla pendenza della galleria e quindi dal dislivello fra gli ingressi della galleria.

Il riscaldamento dell'aria causato dal calore dell'incendio e dei fumi caldi provoca l'effetto camino e cioè determina un flusso di aria verso l'ingresso più alto della galleria.

Il fumo (e il gas) caldo arriva in corrispondenza dalla volta¹ dove si stratifica sulla fascia di aria sottostante che è più fredda e più pesante e se la volta non è dotata di aperture lo strato dei fumi aumenta il suo spessore e quindi i fumi invadono rapidamente tutta la galleria.

All'aumento della potenza termica dell'incendio le condizioni di visibilità via via peggiorano e per potenze termiche dell'ordine dei 50MW sono accettabili per soli 2 o 3 minuti dall'insorgere dell'incendio.

La velocità di spostamento dei fumi caldi è maggiore della velocità media della corrente d'aria sottostante, i fumi dopo aver percorso una distanza compresa fra 500 e 800 metri iniziano a raffreddarsi e quindi si mescolano con l'aria invadendo rapidamente (pochi minuti) tutta la sezione trasversale della galleria.

Dunque per una corretta progettazione della sicurezza che tenga conto del rischio di incendio non bisogna assolutamente trascurare i seguenti fattori:

- Velocità critica della corrente d'aria di ventilazione
- Stratificazione dei fumi

Si definisce velocità critica della corrente d'aria di ventilazione la più bassa velocità longitudinale della corrente d'aria che impedisce la propagazione dei fumi nel verso opposto a quello della corrente stessa.

Quindi se la velocità della corrente d'aria è inferiore alla velocità critica, i fumi si propagano da entrambi i lati dell'incendio (questo fenomeno in letteratura

¹ A seguito della formazione della corrente termica ascensionale determinata dal calore prodotto dall'incendio, e quindi dalla differenziazione della pressione e della temperatura lungo la sezione trasversale della galleria.

prende il nome di back-layering), altrimenti (superiore alla velocità critica) solo dal lato in cui spira la corrente d'aria.

La figura seguente schematizza il fenomeno del back-layering mostrando come al crescere della velocità della corrente d'aria fino al raggiungimento della velocità critica in fumi si propagano solo da un lato dell'incendio.

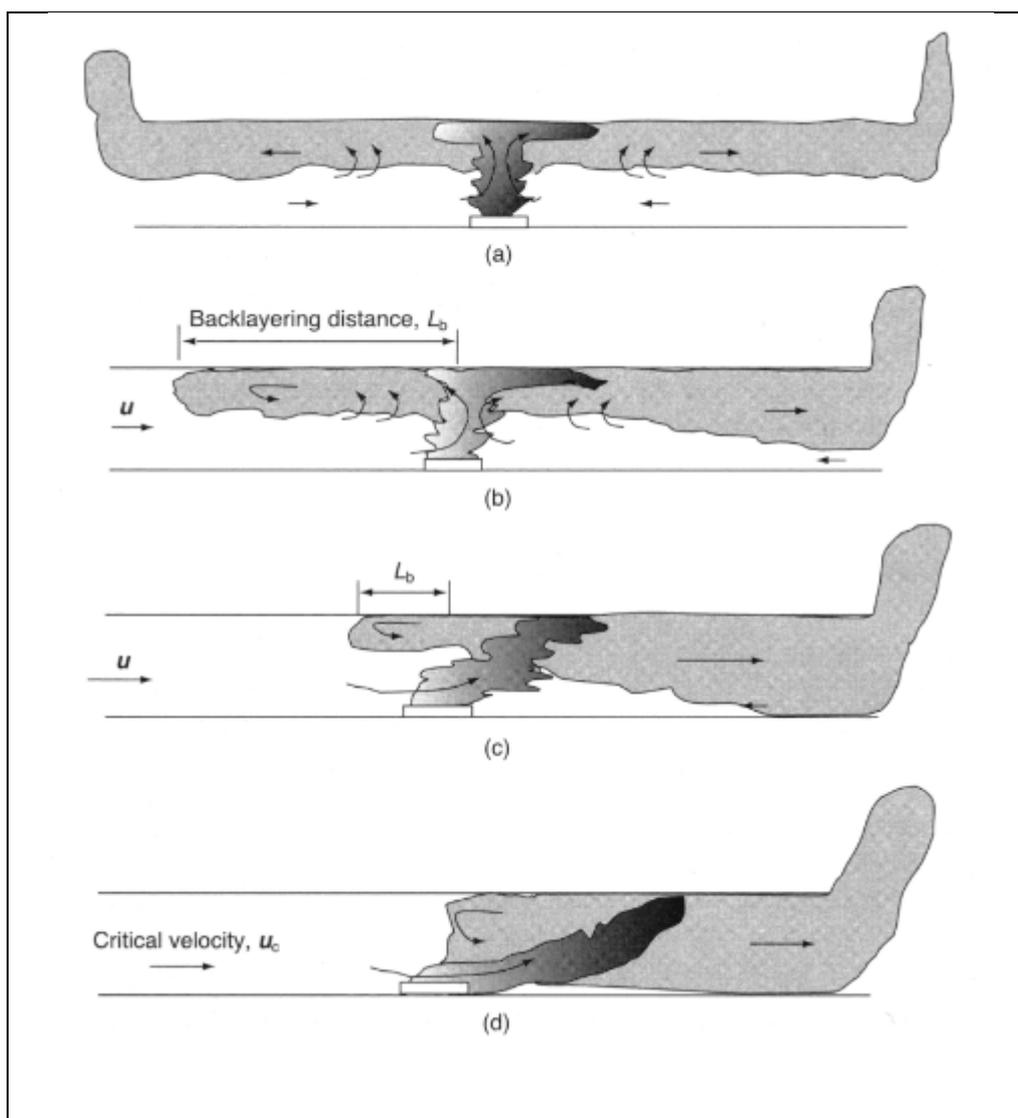


Figura 3: Il fenomeno del Back-Layering [6]

La velocità della corrente d'aria varia a seconda del volume di traffico della ventilazione meccanica e delle condizioni meteorologiche.

La figura seguente visualizza le condizioni di visibilità in relazione alla velocità critica per un incendio di 15 MW di potenza termica nel Memorial Tunnel; si nota come la visibilità sul lato opposto a quello di propagazione dei fumi migliori sensibilmente al crescere della velocità della corrente d'aria di ventilazione rispetto alla velocità critica.

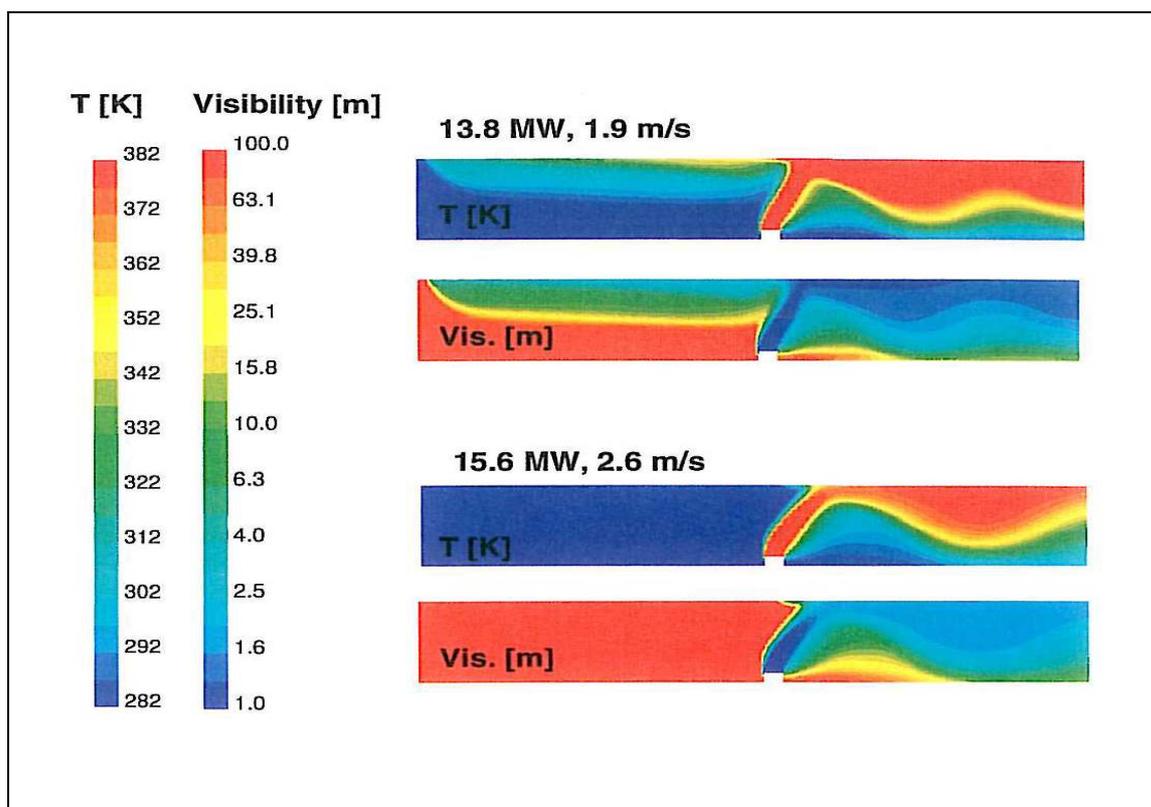


Figura 4: Relazione fra visibilità e velocità dell'aria di ventilazione [7]

Le prove del Memorial Tunnel hanno anche dimostrato che anche con la sola presenza della ventilazione naturale e quindi senza l'effetto sulla ventilazione dovuta al traffico e senza l'effetto della ventilazione meccanica e con un incendio di bassa potenza termica (20MW) il fumo si propaga molto velocemente (2,5-3m/s) e invade un tronco di galleria di circa 800 metri in un intervallo di tempo che va da soli 3 minuti a 5 minuti. Dunque in simili condizioni la visibilità è accettabile per soli 3-4 minuti. Si tenga inoltre

presente che la velocità di fuga di un utente della galleria può essere inferiore a 1-2m/s.

Tutto ciò dimostra come i tempi di rilevamento dei fumi e di intervento dei sistemi di sicurezza (requisiti di sicurezza dei sistemi di sicurezza antincendio in termini di disponibilità) debbano essere estremamente rapidi e cioè anche quanto sia importante adottare delle misure di prevenzione che permettano di intervenire sull'incendio nella primissima fase di propagazione o addirittura prima della fase di innesco.

Tali misure consistono nella installazione di dispositivi di rivelamento di fonti di calore e di rivelamento di fumi.

Per quanto riguarda l'importanza della stratificazione dei fumi occorre rilevare come questa sia condizionata dalla velocità della corrente d'aria e quindi dalla velocità dei fumi che su di essa si stratificano.

Al crescere della velocità longitudinale dell'aria e quindi dei fumi sovrastanti che come detto sono molto più veloci e leggeri (fenomeno che permette l'iniziale stratificazione dei fumi), la stratificazione dei fumi tende a deteriorarsi in quanto i fumi percorrono una lunghezza maggiore di galleria e raffreddandosi tendono a mescolarsi con l'aria sottostante oscurando un tratto di galleria più lungo rispetto a regimi di velocità longitudinali più basse.

Quindi se le velocità longitudinali dell'aria, e quindi dei fumi, sono molto alte i tempi utili di fuga degli utenti si accorciano in quanto la stratificazione, che migliora la visibilità, perdura per tempi più bassi e su tratti più corti di galleria come evidenziato dalla figura seguente, relativa a prove sul modello di combustione del Tunnel Ofnegg in Svizzera del 1965.

Lo schema sulla sinistra è relativo ad una velocità longitudinale di 0,5 m/s quello a destra di 2 m/s.

Il deterioramento della stratificazione (“destratificazione”) è influenzato dalla velocità longitudinale della corrente d’aria, dalla turbolenza² della corrente d’aria, dal moto³ dei veicoli e dalla pendenza longitudinale della galleria.

L’effetto dalla pendenza sulla destratificazione dei fumi è più marcato se il flusso dei fumi che si instaura è nel verso contrario alla pendenza (flusso in contropendenza).

La velocità della corrente d’aria, a sua volta, è influenzata, dal flusso dei veicoli e dalle condizioni meteorologiche che possono determinare condizioni di vento forte.

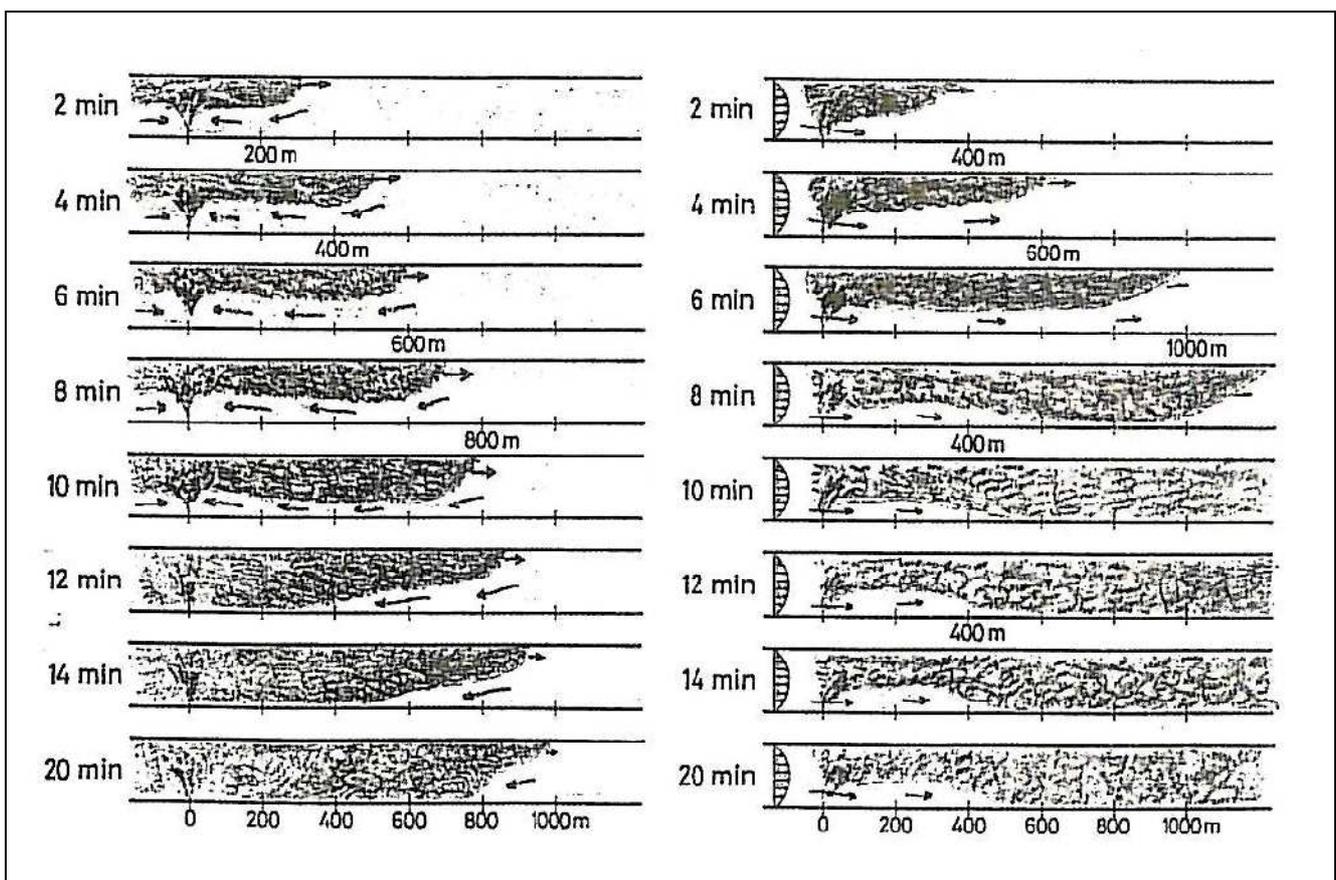


Figura 5: Relazione tra stratificazione dei fumi e velocità longitudinale [8]

² Moto irregolare dell’aria che determina la formazione di vortici e cambi repentini del verso del flusso della corrente d’aria.

³ Il flusso dei veicoli che procedono nel verso concorde della velocità della corrente d’aria accresce la velocità della corrente stessa generando “l’effetto pistone”.

Un'altra grandezza [9] importante che occorre considerare nello studio di un incendio è il **carico di incendio** che è definito come “il potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili contenuti in un certo spazio, corretto in base ai parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali”, e che si misura in MJ.

Nel caso di una galleria il carico di incendio è rappresentato dai veicoli interessati dall'incendio e quindi da:

- Materiali che costituiscono il veicoli
- Carburante dei veicoli
- Carico dei veicoli

2.1.2 Distribuzione della temperatura nei modelli di incendio

In relazione ai danni strutturali connessi con gli incendi in galleria risulta molto importante la distribuzione della temperatura in caso di incendio.

Dagli incendi di dimensionamento⁴ e cioè dai modelli di incendio realizzati al fine della standardizzazione dei dati progettuali della sicurezza si ricava la seguente tabella che evidenzia i picchi di temperatura per gli incendi dei veicoli elencati:

⁴ Le caratteristiche degli incendi di progetto sono stati inserite da molti Paesi nelle linee guida della legislazione in materia di sicurezza.

TIPO DI VEICOLO	TEMPERATURA DI PICCO DELL'INCENDIO
Autoveicolo per trasporto di persone	400°C
Bus/Piccolo camion	700°C
Veicolo pesante	1000°C
Autocisterna	1200-1400°C

Tabella 1 [10]

Si è inoltre visto che l'estensione della zona con la temperatura più alta è piccola quindi questo significa che riuscendo a confinare i fumi nella primissima fase dell'incendio, in modo da impedire la propagazione dell'incendio stesso, la zona di galleria interessata da danni strutturali risulta relativamente ristretta.

Gli incendi di progetto sono caratterizzati e definiti dalla potenza termica il cui andamento viene osservato in una fase iniziale lineare, in una fase intermedia costante e in una fase di declino.

Nella tabella seguente sono raccolte le caratteristiche degli incendi di progetto elencati:

TIPO	POTENZA	PRODUZIONE DI FUMI	TEMPO DI SVILUPPO	DURATA DI PICCO
Piccoli Incendi (automobili)	5-10 MW	20-30 m ³ /s	5 min	20 min
Incendi di veicoli pesanti	20-30 MW	60-80 m ³ /s	10 min	60 min
Grossi incendi (merce pericolosa)	100-200 MW	300 m ³ /s	10 min	60 min

Tabella 2 [11]

2.2 Pericolo e rischio connesso al trasporto di merci pericolose in galleria

Le merci pericolose sono quelle sostanze (solide, liquide o gassose) che, a causa delle loro proprietà chimiche e fisiche possono generare danni sociali (danni alle persone) o ambientali o materiali.

Il trasporto di merci pericolose in galleria costituisce un importante fattore di pericolo per le gallerie proprio per la loro caratteristica di ambiente confinato che contribuisce ad amplificare enormemente il rischio associato a tale tipo di trasporto.

Gli eventi incidentali che coinvolgono i veicoli pesanti sono caratterizzati da un'entità di danno atteso molto rilevante, tuttavia tali eventi incidentali in rapporto agli altri tipi di eventi incidentali che possono occorere in una galleria presentano una frequenza di accadimento più bassa.

L'organismo che per gli Stati membri dell'Unione europea si occupa della regolazione del trasporto di merci pericolose è l'ADR⁵.

La legislazione europea che invece giuridicamente regola il trasporto delle merci pericolose è la Direttiva Europea 2008/68/CE; essa in particolare stabilisce le caratteristiche geometriche, e le dotazioni impiantistiche della galleria che si deve assumere a modello per lo studio e la quantificazione del rischio inerente al trasporto delle merci pericolose.

Oltre all'ADR, anche altri organismi internazionali si sono storicamente occupati dei problemi connessi con la sicurezza del trasporto di merci pericolose come ad esempio il PIARC⁶ e l'OECD⁷.

Gli studi sulla valutazione del rischio connesso al trasporto di merci pericolose consentono di assumere decisioni riguardo alle limitazioni del traffico ai veicoli che trasportano tali merci.

Tali studi evidenziano come il livello di rischio connesso con il trasporto delle merci pericolose aumenti sensibilmente con l'aumentare del volume di traffico dei veicoli pesanti.

L'ADR cataloga le tipologie di sostanze pericolose secondo le classi elencate nella seguente tabella:

⁵ ADR: Acronimo della locuzione " European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Good by road"

⁶ PIARC: World Road Association

⁷ OECD: Organization for Economic Cooperation and Development

CLASSE 1	materie ed oggetti esplosivi;
CLASSE 2	gas;
CLASSE 3	liquidi infiammabili;
CLASSE 4.1	solidi infiammabili, sostanze autoreattive ed esplosivi solidi desensibilizzati;
CLASSE 4.2	materie soggette ad accensione spontanea;
CLASSE 4.3	materie che a contatto con l'acqua sviluppano gas infiammabili;
CLASSE 5.1	materie comburenti;
CLASSE 5.2	perossidi organici;
CLASSE 6.1	materie tossiche;
CLASSE 6.2	materie infettanti;
CLASSE 7	materiali radioattivi;
CLASSE 8	materie corrosive;
CLASSE 9	materie ed oggetti pericolosi diversi.

Tabella 3. Sostanze pericolose [12]

Per le sostanze delle classi 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2, 6.1, 8 e 9 è consentito il trasporto in cisterna.

La classificazione della tabella precedente giustifica il fatto che fra gli eventi iniziatori critici (cioè quelli che presentano le conseguenze peggiori) considerati nelle linee guida⁸ ANAS per la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali, ci siano proprio l'incendio, i rilasci in fase liquida (sversamento) di sostanze infiammabili dai veicoli, i rilasci in fase gassosa di sostanze tossiche, nocive, infiammabili dai veicoli e le esplosioni.

Inoltre, per considerare il rischio connesso con questi eventi iniziatori critici, l'ADR ha definito 5 categorie di gallerie che elencano le restrizioni al

⁸ Linee Guida emanate dall'ANAS in quanto gestore delle gallerie italiane, che come sarà ampiamente ribadito nei prossimi capitoli, esprimono un metodo per la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali attenendosi alle prescrizioni della Direttiva Europea 2004/54/CE e al decreto legislativo n.264.

trasporto delle sostanze pericolose in galleria, proprio in relazione al tipo di rischio connesso al tipo di merce trasportata.

Tali categorie di gallerie sono raggruppate nella seguente tabella:

A	Nessuna restrizione al trasporto di merci pericolose.
B	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante.
C	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante, un'esplosione importante o una perdita importante di materie tossiche.
D	Restrizioni al trasporto di merci pericolose suscettibili di provocare un'esplosione molto importante, un'esplosione importante, una perdita importante di materie tossiche o un incendio importante.
E	Restrizione al trasporto di tutte le merci pericolose salvo i numeri ONU 2919, 3291, 3331, 3359 e 3373

Tabella 4: Classificazione delle gallerie in relazione al tipo di merci pericolose trasportate [13]

Gli argomenti da considerare, connessi con i possibili eventi iniziatori critici elencati e quindi con il trasporto di merci pericolose in galleria sono [14]:

- gli sversamenti di sostanze liquide infiammabili
- il fenomeno del jet flame
- le esplosioni

2.3 Gli sversamenti di sostanze liquide infiammabili

Le prove condotte per studiare gli sversamenti di sostanze liquide infiammabili hanno dimostrato che il comportamento di un liquido infiammabile è molto diverso se durante un esperimento tale liquido infiammabile si trova in un contenitore di acciaio di grande diametro o se

fuoriesce continuamente da una cisterna (o da un serbatoio) in movimento, riversandosi sul manto stradale.

In questo secondo caso quindi le dimensioni dell'eventuale incendio derivante da tale tipo di sversamento risultano molto rilevanti rispetto ad uno sversamento in una pozza localizzata in uno spazio circoscritto dello stesso liquido infiammabile.

Inoltre la pendenza del manto stradale, prevista per il drenaggio dell'acqua, favorendo il movimento del liquido infiammabile contribuisce ad amplificare le dimensioni del potenziale incendio, in quanto favorisce all'accrescimento delle dimensioni della pozza del liquido infiammabile (pool fire).

Purtroppo esistono pochi esperimenti riguardo a questo aspetto del comportamento dei liquidi infiammabili.

In particolare esistono degli studi recenti condotti con la benzina, ma mancano studi condotti con il metanolo e con l'etanolo.

2.4 Il fenomeno del jet flame (connesso ai rilasci in fase gassosa e liquida)

Per quanto riguarda il **fenomeno del jet flame** occorre prevedere l'installazione di valvole di emergenza per le cisterne e per i serbatoi che trasportano gas infiammabili compressi e combustibili liquefatti⁹ in modo da impedire la loro rottura in caso di incidente [15].

Le sostanze infiammabili che si presentano in tali condizioni in fatti, a causa dell'elevata velocità del getto che fuoriesce dagli eventuali fori di rottura della

⁹ A differenza dei combustibili liquidi, i combustibili liquefatti sono quei combustibili in fase gassosa a pressione atmosferica e a temperatura ambiente (condizioni normali o atmosferiche). A seguito dell'aumento di pressione e/o di una riduzione di temperatura i combustibili gassosi vengono liquefatti e immagazzinati nei serbatoi o in autocisterne. Se i combustibili liquefatti vengono esposti improvvisamente alle condizioni atmosferiche, necessitano di assorbire molto calore per evaporare.

cisterna, se innescate, espandendosi in fase gassosa, producono il fenomeno del jet flame.

Il fenomeno del jet flame (e in particolare del jet fire) consiste dunque nella formazione di fiammate di elevata lunghezza accompagnate da un flusso di calore con altissime temperature a seguito del rilascio in fase gassosa di gas compressi e carburanti liquefatti, a seguito della loro espansione.

Questo fenomeno comporta un livello di rischi altissimo per gli utenti, per le squadre di soccorso, e per la struttura, in quanto amplifica enormemente la propagazione dell'incendio ai mezzi circostanti.

Gli studi disponibili, inerenti il fenomeno del jet flame in galleria, sono scarsi e sarebbero molto utili per la quantificazione del rischio ad essi connesso a causa dell'elevato numero di scenari che possono derivare da tale fenomeno.

2.5 Le esplosioni e la loro classificazione

Il rischio delle **esplosioni** in galleria è connesso con il trasporto (o anche con la propulsione dei veicoli stessi) di gas compressi e di combustibili liquefatti e con le batterie dei veicoli stessi [16].

I principali tipi di rischio connessi all'esplosione sono:

- **Rottura di cisterne o serbatoi contenenti gas compresso**
- **Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)**
- **Vapor cloud explosion¹⁰ (o gas cloud explosion)**

¹⁰ La vapor cloud explosion (o gas cloud explosion) consiste in una reazione chimica fra combustibili gassosi premiscelati.

Le conoscenze in materia di rischio connesso alle esplosioni deriva dagli studi sulla sicurezza dei processi dell'industria chimica e sulla sicurezza delle miniere.

Ultimamente, in particolare molta attenzione è stata dedicata agli studi inerenti l'esplosione dell'idrogeno condotti attraverso la modellizzazione in galleria, e altri studi sono stati condotti sull'esposizione al fuoco di serbatoi contenenti idrogeno in ambiente aperto.

Tuttavia esistono ancora pochi dati inerenti al rischio di esplosione di gas compressi e di combustibili liquefatti dei veicoli.

2.6 Il rischio di incendio classificato per tipologia di incendio

Le tipologie di rischio di incendio si dividono in [17]:

- POOL FIRE
- JET FIRE
- FIREBALL
- FLASH FIRE

2.6.1 Il pool fire

Il pool fire come già anticipato, si può verificare quando dopo un incidente si verifica una perdita di combustibile liquido da un veicolo ed esiste una fonte

di ignizione che ad esempio può essere la superficie surriscaldata di parti del motore del veicolo.

Quindi il pool fire può avvenire solo con un combustibile liquido o con un combustibile liquefatto.

Tale tipo di incendio può comportare la formazione di un getto di combustibile liquefatto e contemporaneamente una perdita dello stesso combustibile liquefatto che si riversa sul manto stradale.

Questo succede prevalentemente quando la valvola della pressione si trova al di sotto del livello del combustibile liquefatto.

Se invece il serbatoio (o cisterna) si rompe si forma solamente la pozza e non il getto di combustibile liquefatto in quanto non c'è sufficiente calore perché il combustibile liquefatto possa evaporare istantaneamente [18].

Questo vuol dire che in presenza di un combustibile liquefatto si possono verificare sia il jet fire sia il pool fire.

2.6.2 Il jet fire

Il **jet fire** si verifica in presenza di un veicolo con un gas compresso infiammabile e può avvenire anche con un combustibile liquefatto [19].

Molti combustibili liquefatti possono infatti passare improvvisamente a fase gassosa quando vengono rilasciati nell'ambiente.

In ciascuno dei casi descritti il jet fire avviene quando la valvola della pressione funziona correttamente e il serbatoio non presenta rotture.

Se il veicolo ha molti serbatoi, possono essere attivate molte valvole della pressione e si possono quindi formare diversi getti o una combinazione di getti aggravando quindi gli scenari possibili.

2.6.3 Il fireball

Il fireball [20] può formarsi nella fase iniziale del jet fire o subito dopo la rottura di un serbatoio (o autocisterna). Il fire ball consiste nella immediata ignizione dopo che un gas infiammabile è stato velocemente (improvvisamente) rilasciato, quindi si forma una miscela di gas infiammabile ed aria che permette la formazione di fiammate di forma sferica.

Normalmente le fiamme si concentrano nella zona centrale della nuvola di fuoco dove la miscelazione del gas infiammabile con l'aria è meno accentuata.

2.6.4 Il flash fire

Il flash fire [21] si forma a seguito dell'ignizione di una nuvola infiammabile in cui non c'è un incremento della combustione e nemmeno un incremento della pressione e le fiamme si propagano in modo analogo a un flusso laminare con una velocità di circa 10 m/s.

Questo fenomeno si verifica quando la **velocità di combustione è molto bassa** e questo fatto non permette la formazione di un'onda esplosiva.

Il rischio maggiore del flash fire è connesso con l'alta probabilità di essere investiti direttamente dalle fiamme a causa della trasmissione del calore per convezione combinato alla trasmissione del calore per irraggiamento.

Generalmente il flash fire si verifica in ambienti aperti in cui c'è un ristagno d'aria o in ambienti che non presentano barriere alla propagazione delle fiamme, dunque le caratteristiche di una galleria sono tali da non favorire la formazione del flash fire.

Tuttavia, anche se raramente, il flash fire può formarsi in galleria.

Il flash fire può essere paragonato a una deflagrazione piuttosto che a una esplosione, per via della sua più o meno bassa velocità di combustione, ma, per il modo in cui influenza le persone e la struttura viene considerato come un rischio di incendio.

È opportuno precisare che, un combustibile liquido, in un serbatoio, scaldato ad alte temperature genera gli stessi rischi di un combustibile liquefatto, quindi un combustibile presenta sia il rischio di pool fire, sia di jet fire, sia di firewall, sia di flash fire.

Ma un combustibile liquefatto¹¹, o un gas compresso infiammabile, a differenza di un combustibile liquido, non ha bisogno di essere riscaldato per formare un jet fire o un fire ball (anche se un combustibile liquefatto, per produrre un jet fire con fiamme molto lunghe e un firewall di grandi dimensioni, ha comunque bisogno di esser scaldato).

Quindi il rischio connesso a un combustibile liquefatto o a un gas compresso infiammabile è più alto di quello connesso ad un combustibile liquido.

2.7 Il rischio di esplosione in galleria

2.7.1 Gas (o vapor) cloud explosion

In letteratura questo fenomeno può anche essere indicato con un suo l'acronimo VCE.

¹¹ I serbatoi di combustibile liquefatto e di gas compresso dispongono di valvole di sicurezza (**PRV**) che servono per **evitare la sovrappressione nel serbatoio** (valvole di sfogo) e che si disattivano automaticamente una volta svolta la propria funzione, cioè quando i livelli di pressione all'interno del serbatoio tornano normali. Inoltre dispongono di dispositivi (valvole) di sicurezza (**PRD**) per i **rilasci di pressione di emergenza** e possono essere attivate per evitare la rottura del serbatoio quando la pressione all'interno del serbatoio raggiunge valori troppo alti.

Il fenomeno del **gas (o vapor) cloud explosion** riguarda la **reazione chimica di una miscela di gas combustibile**; questo fenomeno può presentarsi come:

- Deflagrazione
- Detonazione

La deflagrazione comporta un flusso di combustione con velocità di propagazione delle fiamme subsonico mentre per la detonazione, il flusso di combustione ha una velocità di propagazione delle fiamme supersonica.

Tutti i fenomeni di **gas (o vapor) cloud explosion** iniziano sempre con una deflagrazione che ha una bassa velocità di propagazione delle fiamme a meno che non si abbia un grandissima fonte di ignizione.

La velocità di propagazione delle fiamme della deflagrazione aumenta continuamente fino a superare la velocità del suono e in questo modo la deflagrazione evolve in una detonazione [22].

Il passaggio da una deflagrazione ad una detonazione viene spesso indicato con la sigla **DDT(PASSAGGIO DA DEFLAGRAZIONE A DETONAZIONE)**.

In ambiente aperto questo passaggio avviene raramente, invece in una galleria, dove ci sia molto combustibile, la velocità di propagazione delle fiamme può aumentare continuamente fino a che ad una certa distanza dal punto di ignizione si ha il passaggio dalla deflagrazione alla detonazione.

Il fatto che si abbia o non si abbia questo passaggio dipende dalla turbolenza locale delle fiamme che a sua volta dipende dagli ostacoli che queste incontrano durante la loro propagazione.

I parametri che incidono sulla relazione fra l'ignizione e il passaggio da deflagrazione a detonazione sono:

- Il tipo di combustibile
- La quantità di combustibile
- La concentrazione del combustibile
- La distribuzione del combustibile

,mentre l'ignizione dipende dalla ventilazione.

La condizione per cui si possa avere una esplosione è l'esistenza di una nube di gas infiammabile, quindi essa può accadere specialmente in presenza di veicoli con gas compresso infiammabile di veicoli con combustibile liquefatto e di veicoli a batterie elettriche.

Invece il rischi di gas cloud explosion in presenza di veicoli con combustibile liquido è limitato in quanto tale combustibile, per evaporare necessita di un certo tempo di preriscaldamento.

Il gas che può fuoriuscire dai pacchi batteria è costituito in buona parte da idrogeno e quindi i **veicoli a batterie** elettriche determinano un grande rischio di gas cloud explosion.

Se le valvole di emergenza (PRD) di un serbatoio in pressione si attivano, esse consentono il rilascio di gas dal serbatoio (nella forma di un getto) che può essere innescato e quindi può aver luogo la gas cloud explosion.

Tuttavia se la quantità di combustibile rilasciato non è eccessiva, e se tale combustibile non raggiunge il limite di infiammabilità, il rischio di esplosione diventa basso.

Quindi generalmente, l'attivazione delle valvole di emergenza (PRD), non comporta una grave gas cloud explosion.

La gas cloud explosion può avvenire nel caso di incidente, sia per i combustibili liquidi (se riscaldati), sia per i combustibili liquefatti sia per i gas compressi infiammabili, ma è più probabile che avvenga per questi ultimi.

2.7.2 Rottura di cisterne o serbatoi contenenti gas compresso

Come anticipato nel paragrafo 2.5. l'altro rischio connesso con le esplosioni è la rottura di un serbatoio o cisterna contenente gas compresso [23] .

Dunque, a seguito della rottura di un serbatoio o cisterna contenente un gas compresso (ad alta pressione rispetto alla pressione ambiente), questo può fuoriuscire istantaneamente generando un'onda esplosiva (onda d'urto).

Dunque questo fenomeno può anche essere chiamato **esplosione per espansive di un gas compresso**.

La rottura di un serbatoio o cisterna è più probabile che avvenga per i gas compressi.

2.7.3 BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion)

Il fenomeno del BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) si verifica quando un **combustibile liquefatto** viene improvvisamente **esposto alla pressione atmosferica**, a causa dell'attivazione di un dispositivo di sicurezza o a seguito di altri motivi che ne determinano la fuoriuscita.

In questo modo una parte (chiamata **flash fraction**) del combustibile liquefatto, a seguito dell'assorbimento di calore dello stesso combustibile, **evapora** in modo istantaneo [24].

La fuoriuscita improvvisa (istantanea) della flash fraction determina un'onda esplosiva.

Per questo motivo il BLEVE assomiglia al fenomeno della rottura di un serbatoio contenente gas compresso, ma presenta altri aspetti che lo differenziano da esso.

È bene precisare che anche i combustibili liquidi possono dar luogo al BLEVE se vengono esposti al fuoco per un certo tempo, tuttavia i combustibili liquefatti, avendo temperature di ebollizione molto più basse rispetto a combustibili liquidi presentano un ben più alto rischio di BLEVE rispetto ad essi.

2.7.4 Esempi di interazione fra esplosioni ed incendi e di altri scenari possibili

- A seguito della rottura di un serbatoio o a seguito del BLEVE consegue il rilascio di gas che possono essere innescati con la conseguente formazione del fireball che è caratterizzato da una bassa velocità di propagazione delle fiamme e quindi l'onda di pressione determinata dal fireball ha poca influenza sull'onda di pressione determinata dalla rottura del serbatoio o dal BLEVE [25].

Tuttavia ci sono gas esplosivi, come ad esempio l'idrogeno che se innescati presentano una elevata velocità di propagazione delle fiamme, e quindi il fireball dovuto a tali gas contribuisce fortemente all'innalzamento del picco di pressione causato dalla rottura di un serbatoio o da un BLEVE.

Il principale rischio connesso ad un simile scenario è connesso al calore trasmesso (per irraggiamento dovuto la fireball) nell'ambiente circostante e all'eventuale propagazione dell'incendio al combustibile circostante. Questa descrizione di un possibile scenario che ha origine con la rottura di un serbatoio o con il BLEVE mostra come i fenomeni esplosivi e i fenomeni di incendio siano interconnessi anche se vengono studiati separatamente.

- Un altro esempio di tale interazione può essere quello per cui il jet fire¹² provoca la rottura di un serbatoio che quindi determina una esplosione per espansione di un gas compresso.
Oppure può succedere che il jet fire determini la rottura del serbatoio e una gas cloud explosion.
Oppure può succedere che il jet fire determini direttamente una gas cloud explosion.
- Nel caso della rottura di un serbatoio in pressione, i suoi frammenti possono essere proiettati nell'ambiente circostante per lunghe distanze causando danni agli utenti ed alla galleria e quindi anche questo aspetto è connesso con il rischio di esplosione. In particolare, per una galleria, un aspetto connesso al rischio delle esplosioni, è quello della rottura dei vetri (frammenti secondari) dei veicoli a seguito della propagazione dell'onda esplosiva.
- Di non trascurabile importanza è la connessione che, le eventuali collisioni fra i veicoli, e quindi i possibili danni ai serbatoi di tali veicoli, può instaurarsi con i fenomeni descritti, determinando vari scenari incidentali. [26]

Anticipando la tecnica (albero degli eventi¹³) per la descrizione degli scenari possibili derivanti da un evento iniziatore incidentale, nella figura seguente viene riportato l'albero degli eventi relativo ad un veicolo con combustibile liquido.

¹² Determinato ad esempio dall'azionamento di una valvola di sicurezza (PRV) per il rilascio di pressione.

¹³ Discussa nel paragrafo 6.1.9

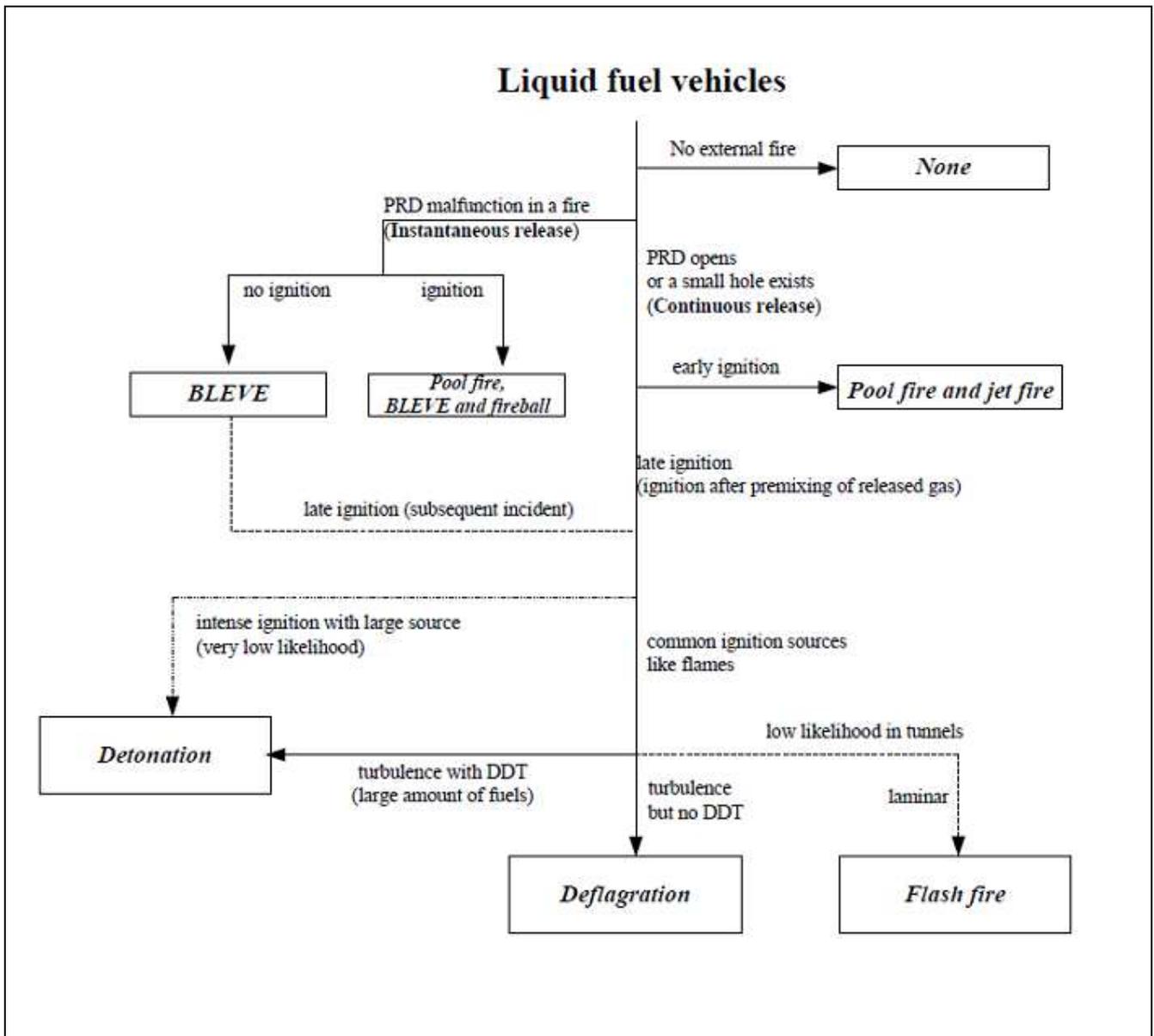


Figura 6: Albero degli eventi relativo ad un veicolo con combustibile liquido [27]

2.8 Cenni sulla modellizzazione del flusso delle esplosioni in galleria

Il flusso delle esplosioni associato al fenomeno della rottura di un serbatoio, della gas cloud explosion e del BLEVE possono essere modellizzati in diversi

modi dopo aver definito le equazioni generali che controllano il fenomeno dell'esplosione e dopo aver definito le condizioni al contorno del sistema [28]. Parallelamente alla realizzazione dei modelli dei flussi esplosivi, dei diversi casi precedentemente elencati, vengono condotti dei test di laboratorio al fine di verificare l'attendibilità del modello realizzato analiticamente o numericamente.

Nei test in scala di laboratorio possono essere ad esempio utilizzati degli ostacoli in acciaio per simulare l'ingorgo del traffico.

Per esempio, la simulazione/modellizzazione del fenomeno della rottura (in galleria) di un serbatoio contenente gas compresso ad alta pressione viene condotta considerando al tempo iniziale (tempo zero) le grandezze iniziali nel serbatoio:

- Pressione iniziale nel serbatoio
- Temperatura iniziale nel serbatoio
- Proprietà iniziali del combustibile nel serbatoio

, e successivamente il gas viene immediatamente rilasciato al di fuori del serbatoio.

Invece la simulazione/modellizzazione del BLEVE può essere condotta simulando il processo esplosivo della evaporazione istantanea di un combustibile liquefatto, attraverso il rilascio di vapore (che rappresenta la flash fraction rilasciata immediatamente nel BLEVE) da una sorgente liquida surriscaldata; mentre la flash fraction viene determinata usando una modellazione analitica.

2.8.1 Esempio di test per la determinazione della DDT distance

In relazione alla modellizzazione della gas cloud explosion e ai relativi test condotti in galleria, nella figura seguente viene riportato un grafico che permette di evidenziare la differenza fra la DDT¹⁴ distance (distanza dal punto di ignizione alla quale si verifica il passaggio dalla deflagrazione alla detonazione) relativa al metano e quella relativa al propano. [29]

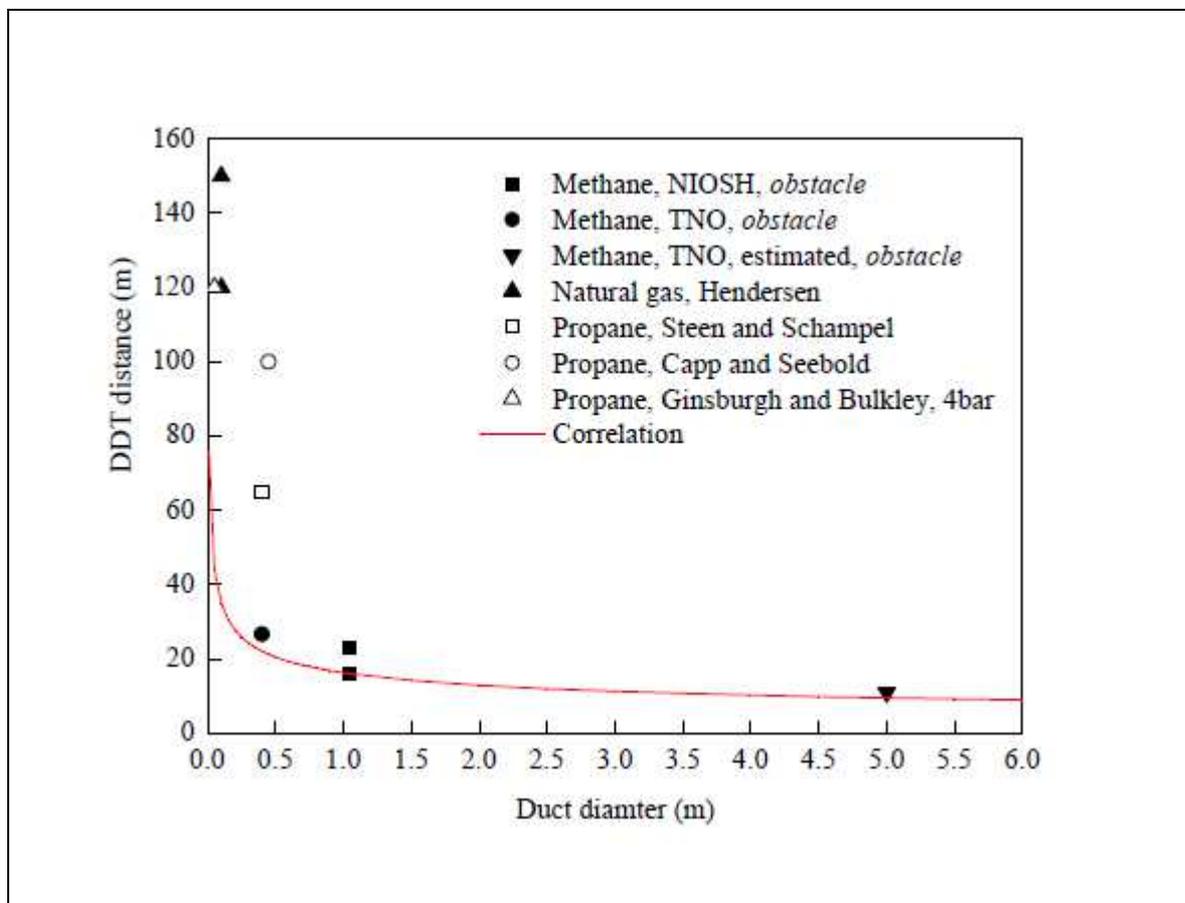


Figura 7: Dati da esperimenti per il calcolo del DDT distance per il metano e per il propano [30]

¹⁴ Che esprime la suscettibilità alla detonazione

2.8.2 Picco di pressione nelle gas (o vapor) cloud explosion

Un esempio [Brandforsk 2018] di test per la verifica di un modello della gas cloud explosion è stato condotto con l'idrogeno, che ha la proprietà di essere suscettibile alla detonazione [31].

Il test in questione riguarda una galleria avente le seguenti caratteristiche geometriche:

- Lunghezza 78,5 m
- Area della sezione trasversale 3.74 m²
- Altezza 1,84 m

I veicoli sono stati modellizzati con una lunghezza di 0,94 m, con una larghezza di 0,362 m e con un'altezza di 0,343 m, e sono stati disposti lungo la linea centrale del manto stradale con una spaziatura di 0,94 m. Inoltre è stato ipotizzato un coefficiente di ingorgo del 3,32%.

Il test è stato suddiviso in tre di prove.

Nella figure seguente è possibile vedere la realizzazione della galleria, e si può notare che il manto stradale è stato assimilato ad uno strato di calcestruzzo.

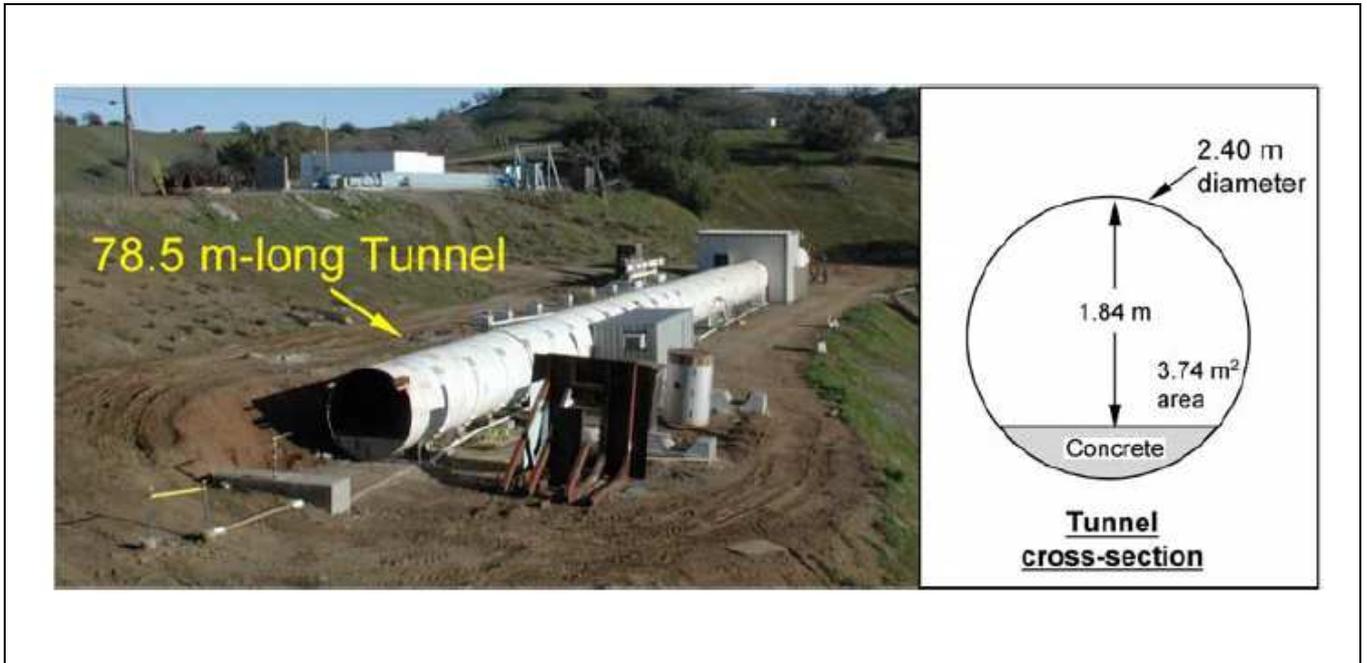


Figura 8: Realizzazione della galleria della modellizzazione [32]

Nella seguente figura invece si vede la realizzazione della modellizzazione dei veicoli in scala 1: 5.



Figura 9: Modellizzazione dei veicoli [33]

- La prima prova è stata condotta con una miscela omogenea di idrogeno ed aria, prima con una concentrazione volumetrica di idrogeno del 9,5%, poi con una concentrazione del 20% e in fine con una concentrazione del 30%.

Per ciascun di queste concentrazioni di idrogeno è stata rilasciata la miscela omogenea di idrogeno ed aria, inizialmente contenuta in un involucro (film) di plastica del volume di 37 m³ disposto al centro della galleria.

Il rilascio della miscela è stato simulato tagliando il film di plastica ed il taglio del film, e quindi il rilascio della miscela, è stato fatto dopo l'innesco della miscela che è avvenuto al centro della base del volume della miscela.

Nella prova con la concentrazione del 9.5% di idrogeno la pressione non è stata abbastanza alta da permettere ai sensori di rilevarla.

Nella prova con la concentrazione di idrogeno del 20% i sensori hanno registrato un picco di sovrappressione di 35 KPa, mentre nella prova con una concentrazione di idrogeno del 30% hanno registrato un picco di sovrappressione di 150 KPa per tutta la lunghezza della galleria.

I dati di questa prima prova sono stati anche usati per la modellizzazione (analitica) del fenomeno della gas cloud explosion. Successivamente i risultati della prova e quelli della simulazione tramite la modellizzazione sono stati confrontati per verificare l'attendibilità della modellizzazione.

L'esito di tale confronto è stato riportato nel grafico della figura seguente. Il grafico evidenzia il picco di sovrappressione di 150 KPa rilevato conducendo la prova con la concentrazione di idrogeno del 30%.

Si è inoltre visto che la modellizzazione della distribuzione dei veicoli ha avuto poca influenza sui risultati della prova (questo è stato appurato conducendo la prova con la concentrazione di idrogeno al 30%, prima in presenza dei veicoli e poi senza).

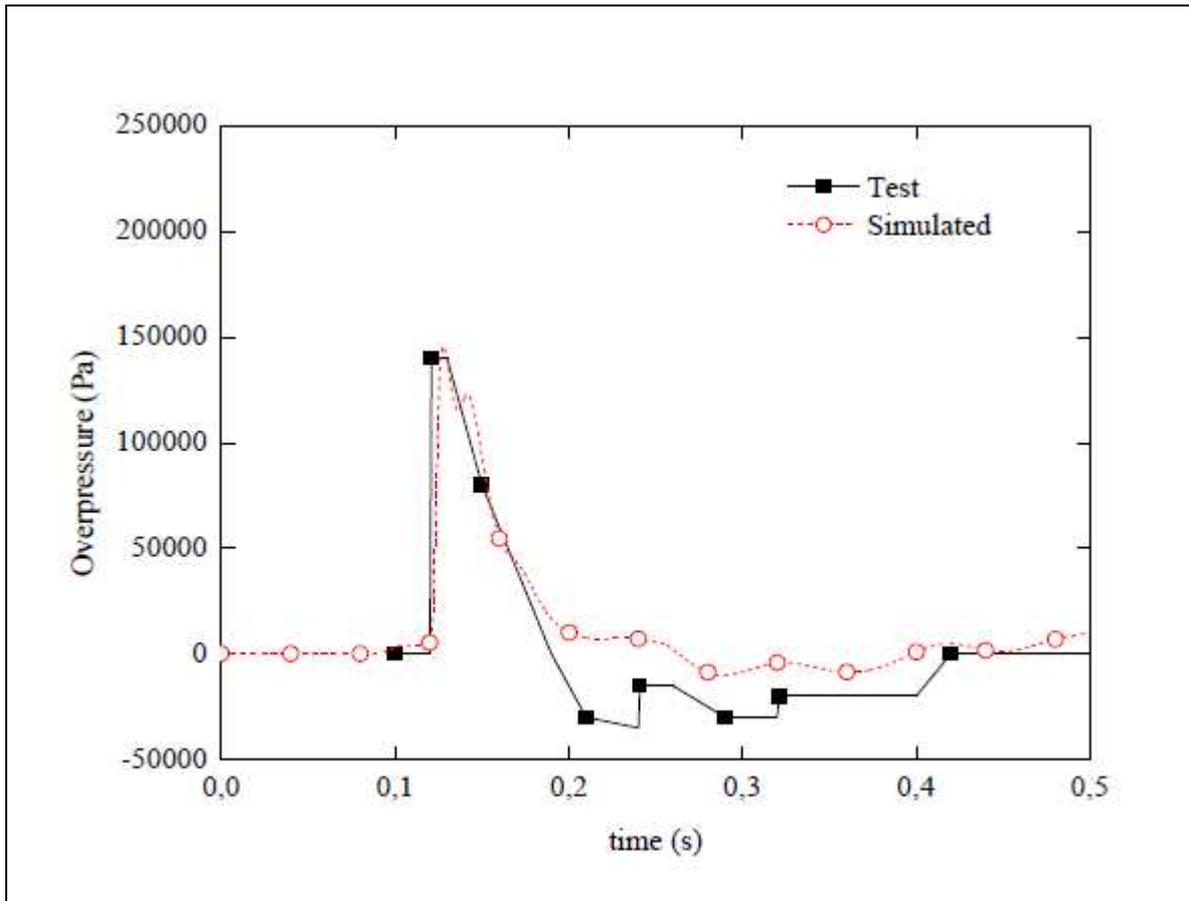


Figura 10: Picco di pressione nella gas cloud explosion [34]

- La seconda prova è stata condotta modellizzando la gas cloud explosion con il rilascio continuo di idrogeno da un ugello posto al centro della galleria per 20 secondi, per un rilascio totale di 1kg di idrogeno.

L'ignizione è stata effettuata in tempi diversi; in particolare in questa seconda prova sono stati condotti due test, quindi la prova è stata ripetuta due volte con tempi di ignizione diversi ed in entrambe le prove i sensori non hanno rilevato la pressione dovuta alla gas cloud explosion a causa della incompatibilità dei dati di pressione della prova con il campo di misurazione di misurazione degli strumenti utilizzati [35].

Tuttavia con questa seconda prova è stato possibile evidenziare che la concentrazione di idrogeno della miscela di idrogeno ed aria che si forma a seguito del rilascio di idrogeno nel fenomeno della gas cloud explosion (nel caso in cui appunto il gas in questione sia l'idrogeno), decresce rapidamente al crescere della distanza dal punto di rilascio dell'idrogeno.

- La terza prova è stata condotta rilasciando l'idrogeno, in una galleria ventilata, in corrispondenza del portale di afflusso dell'aria, con una portata d'aria di 1,26 m³/s.

Questa terza prova è stata condotta prima rilasciando continuamente l'idrogeno per 20 secondi con una portata di 0,005 kg/s per un totale di 1kg di idrogeno rilasciato.

Poi la prova è stata condotta rilasciando continuamente l'idrogeno per 420 secondi per un totale di 2,2 kg di idrogeno rilasciato.

La prova ha evidenziato che **l'ignizione non è avvenuta** a causa della scarsa concentrazione di idrogeno nella miscela idrogeno/aria, e questo fatto è da attribuire alla **ventilazione** della galleria che ha diluito l'idrogeno della miscela.

Il fatto di aver rilasciato l'idrogeno con una portata molto bassa ha permesso di simulare il rilascio delle valvole di rilascio pressione in caso di emergenza (PRD).

Dunque con le portate di rilascio di idrogeno di questa terza prova, e in presenza di ventilazione, la gas cloud explosion non si verificava.

Inoltre si può anche osservare che le portate di rilascio di idrogeno di questa terza prova sono molto più basse di quelle che posso provocare il fenomeno della rottura di un serbatoio o il fenomeno del BLEVE [36].

inoltre la concentrazione di idrogeno di questa terza prova è sufficiente per permettere l'ignizione e per sostenere la propagazione delle fiamme sia nel caso del fenomeno della rottura del serbatoio, sia nel caso del BLEVE.

3 Eventi storici rilevanti

Molto si può imparare in termini di prevenzione e di conseguenze dagli eventi incidentali di incendio occorsi nel passato e per questo motivo analizziamo i tre incendi più eclatanti del passato che hanno contribuito a sensibilizzare enormemente l'opinione pubblica nei riguardi della sicurezza nelle gallerie stradali ed hanno indotto il legislatore a regolamentare la materia a livello europeo.

3.1 Incidente del Traforo del Monte Bianco (Italia - Francia)

3.1.1 Caratteristiche e premesse

Il traforo del Monte Bianco si colloca nelle Alpi Occidentali e collega le città di Courmayeur (Valle d'Aosta) e di Chamonix (dipartimento Francese dell'Alta Savoia) e si estende per una lunghezza di 11,6 chilometri dei quali 7,640 chilometri sono sul territorio francese e 3,960 chilometri su quello italiano [37].

Concepito nel 1946 e fortemente voluto per agevolare i collegamenti fra Italia e Francia, gli scavi iniziarono nel 1959 e fu inaugurato il 6 Luglio del 1965.

Purtroppo anche la sua realizzazione è stata funestata da diversi incidenti.

Si colloca a quota 1274 metri sul livello del mare sul versante francese e a quota 1381 metri sul versante italiano.

Questa caratteristica è correlata al flusso longitudinale spontaneo dell'aria che può spirare nella galleria in determinate condizioni. Data l'imponente colonna di roccia che sovrasta il tunnel, non sono presenti camini di ventilazione e l'aria viene distribuita in galleria mediante bocchette di ventilazione poste a intervalli di 10 metri lungo uno dei due

marciapiedi proveniente da un sistema di canali collocato al di sotto del piano stradale. Invece i gas di scarico vengono aspirati mediante bocchette di aspirazione collocate lateralmente in corrispondenza della volta a intervalli di 300 metri da dove vengono convogliati in un condotto¹⁵ che passa sotto il piano stradale.

È realizzato a singolo foro e fu concepito per un esercizio a traffico bidirezionale.

La sua sezione presenta un'altezza massima di 5,90 metri e una larghezza di 8 metri di cui 7 metri di carreggiata (3,5mt per ciascuna corsia) con la dotazione di due marciapiedi; inoltre l'accesso al traforo dal versante francese presenta una pendenza del 7% su una estensione di 17 chilometri¹⁶.

Improntato a scopi preminentemente turistici (come dimostrano le dimensioni della carreggiata e le condizioni di esercizio), nel corso degli anni il tunnel ha registrato un significativo aumento del volume del traffico pesante che nel 1998 era già di circa il 40% che è la causa di un incremento di rischio.

3.1.2 Cronologia dello scenario

L'incidente si verificò il **24 Marzo del 1999** a seguito dell'ingresso in galleria (10:30) e dell'incendio (10:47) di un camion frigorifero, evento quest'ultimo, che costituisce l'evento iniziatore degli eventi che ne seguirono [38].

¹⁵ Questo condotto all'occorrenza può essere usato per introdurre aria supplementare nel tunnel svolgendo dunque una doppia funzione di aspirazione gas di scarico e immissione di aria pulita supplementare.

¹⁶ Questa caratteristica determina il surriscaldamento dei motori dei mezzi in ingresso dal versante francese.

Il camion transitava dal versante francese verso quello italiano con un carico di margarina¹⁷ e farina ed aveva il motore surriscaldato probabilmente a causa della forte pendenza che caratterizza il tratto di strada che precede l'ingresso al tunnel dal versante francese.

Le testimonianze riportarono che il camion emetteva fumo fin dal suo ingresso in galleria.

L'incendio indusse l'autista del camion a fermarsi nella galleria e questo determinò un ingorgo di veicoli.

A seguito dell'allarme (10:51), gli ingressi al tunnel vennero chiusi (alle 10:55 quello del versante francese e alle 10:56 quello del versante italiano), mentre la richiesta di soccorso fu fatta alle 10:58, che arrivarono alle 11:09.

La durata dell'incendio fu di **53 ore** e solo una settimana dopo la temperatura registrata in galleria era di circa 30°C e permanevano ancora focolai potenzialmente pericolosi.

I seguenti eventi hanno determinato l'esito della tragedia [39]:

- A causa del tipo di merci¹⁸ trasportate e dei materiali costituenti il camion l'incendio del camion stesso ha avuto uno sviluppo rapidissimo ed ha sprigionato una elevatissima quantità di fumi tossici e molto caldi che l'impianto di aspirazione non riusciva a smaltire.

¹⁷ Margarina: emulsione di grassi vegetali ed animali.

¹⁸ Il carico di margarina ammontava a 9 tonnellate che bruciarono assieme al camion nel giro di un'ora: a questo proposito può essere utile un confronto con il modello di combustione descritto a pag. 4.

- Il camion è stato abbandonato sulla corsia (al chilometro 6,545) e questo in sinergia con la grande quantità di fumo ha ostacolato il transito dei veicoli che si sono bloccati a ridosso del camion.
A 500 metri dietro il camion, avvolto dalle fiamme e dal fumo, si bloccarono 13 autocarri un furgone e 9 automobili, mentre sul lato italiano a 300 metri dal camion si bloccarono 8 autocarri e 9 automobili; contrariamente alle ipotesi della fase di progettazione del tunnel, quel giorno, a seguito di particolari condizioni meteorologiche il flusso longitudinale dell'aria spirava in direzione del versante francese e questo da un lato consentì alle 9 automobili ferme sul lato italiano di invertire il senso di marcia e di uscire quindi dal tunnel, mentre fu una delle concause del tragico epilogo dell'incidente. Infatti le ipotesi secondo cui, a causa del dislivello fra l'ingresso sul lato francese e quello italiano generano una differenza di pressione tale da sospingere la corrente d'aria verso l'ingresso italiano, non avevano considerato l'influenza delle condizioni meteorologiche su questo fenomeno. Per questo motivo i progettisti ritennero di collocare il presidio di pronto intervento antincendio solo sul versante francese convinti che in caso di incendio si dovesse intervenire dal lato francese.
- Nel giro di 5 minuti, i 900 m che separavano il camion in fiamme dal chilometro 5,6 vennero invasi dai fumi tossici che raggiungevano una temperatura di 600°C.

- In queste condizioni si è innescata la combustione e la pirolisi dei materiali¹⁹ solidi e la combustione del combustibile dei veicoli presenti in quel tratto di corsia causando quindi la propagazione dell'incendio anche ai veicoli bloccati dietro il camion. In queste condizioni la temperatura era compresa fra 500°C e oltre 1000 °C ed anche il manto stradale ha contribuito alla propagazione dell'incendio. **Si è stimato che al suo culmine l'incendio abbia raggiunto una potenza termica di circa 190 MW.**

3.1.3 Conseguenze dell'incidente

I primi soccorritori furono costretti dal fumo e dalle fiamme a fermarsi a 750 metri dal camion sul versante francese e a 300 metri dal camion sul versante italiano mentre i successivi soccorsi del versante francese si bloccarono a 2700 metri dal camion. Nell'incidente persero la vita 39 persone²⁰ fra cui un vigile del fuoco francese ed un soccorritore italiano e ci furono diversi feriti. Ben 34 veicoli bruciarono e il sottostante manto stradale si fuse, di questi veicoli gran parte erano autoveicoli pesanti.

A cavallo della progressiva 6,5 Km un tratto di rivestimento del tunnel lungo un chilometro risultò completamente distrutto.

Il tunnel restò chiuso per 3 anni per effettuare le riparazioni e questo provocò notevoli disagi socio economici. I costi di ricostruzione ed

¹⁹ Fra i materiali di cui era costituito il camion refrigerato spicca la schiuma di poliuretano che è un materiale plastico utilizzato come isolante termico del camion e che si ritiene sia stato un'altra concausa della tragedia.

²⁰ La diffusione dei fumi tossici fu la principale causa di morte.

adeguamento delle misure di sicurezza ammontarono a circa 300 milioni di euro.

Si evince quindi che vi furono non solo imponenti conseguenze in termini di vite umane e in termini di danni ai singoli individui ma vi furono anche ingenti danni socio economici e quindi come la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali rivesta un ruolo tutt'altro che secondario.

3.2 Incidente del tunnel dei Monti Tauri (Austria)

La galleria si colloca nei Monti Tauri, in Austria, ed ha una lunghezza di 6,400 chilometri ed è stato inaugurato nel 1975.

Si tratta di una galleria con un singolo fornice con traffico bidirezionale.

L'incidente è occorso il 29 maggio del 1999 (solo due mesi dopo la tragedia del Monte bianco).

L'evento iniziatore dello scenario è stato la collisione (tamponamento) di un veicolo pesante (carico di bidoni di vernice) con una fila di veicoli (un veicolo pesante e 4 automobili) fermi ad un semaforo alla progressiva 800 metri dal portale nord.

Un precedente incidente aveva reso necessario l'allestimento di un cantiere e comportato la limitazione del traffico in un tronco di galleria mediante l'esercizio a senso alternato gestito con un semaforo.

La collisione provocata dal camion in movimento ha spinto due delle auto ferme al semaforo sotto il camion fermo, mentre le altre due auto sono state spinte contro il muro della galleria, e la cabina del camion in movimento è

arrivata ad urtare il retro del camion fermo, come si può vedere dalla schematizzazione dello scenario rappresentata nella figura seguente.

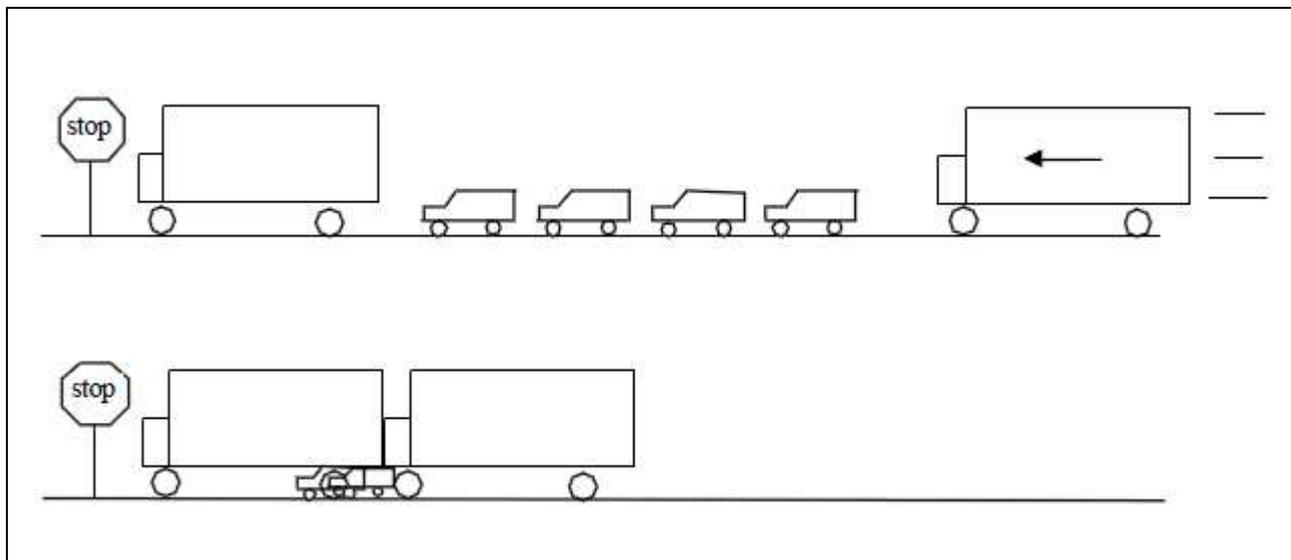


Figura 11: Rappresentazione dello scenario dell'incidente dei Monti Tauri del 29 maggio 1999
[Lulea University, 2006]

A seguito della collisione si è innescato un incendio che ha immediatamente coinvolto il veicolo pesante, un altro veicolo pesante (che trasportava bombolette spray) e quattro automobili coinvolte nella collisione.

Nell'incidente sono morte **12 persone**, 8 a causa della collisione e 4 a causa dell'incendio e dei fumi.

L'incendio è stato estinto dopo circa **15 ore** ed ha distrutto **16 veicoli pesanti** e **24 auto**.

3.3 Incidente del tunnel del San Gottardo (Svizzera)

3.3.1 Ubicazione e caratteristiche

La galleria del San Gottardo, in Svizzera, collega il Canton Ticino (portale sud) con il Canton di Uri (portale nord) ed è stata inaugurata nel 1980.

La galleria è:

- lunga 16,920 km
- larga 7.8 m
- alta 4,5 m

la galleria è a **fornice singolo bidirezionale** con i seguenti raggi di curvatura:

- 760 m portale sud
- 700 m portale nord
- 2000 m in galleria

Il portale sud (Airolo) si trova a una quota di 1146 m sul livello del mare mentre il portale nord (Goschenen) si trova a 1080 m sul livello del mare.

3.3.2 Descrizione dello scenario e conseguenze

L'incidente è occorso il **24 ottobre 2001** alle 9:45, a circa un chilometro dal portale sud nel settore 69 della galleria.

L'evento iniziatore è stato la **collisione frontale** di un veicolo pesante (con un carico di pneumatici) proveniente dal portale sud con un veicolo pesante proveniente dal portale nord, e la collisione è stata causata dalla perdita del controllo del veicolo proveniente da sud.

La collisione ha determinato la **perdita di carburante** del veicolo pesante investito, che a seguito di un **corto circuito** ha generato l'**incendio** del veicolo pesante.

L'incendio si è velocemente propagato al carico di pneumatici e ai veicoli circostanti determinando la produzione, e la rapida propagazione, di una grande quantità di **fumi e di gas tossici**.

L'incendio ha interessato un troncone di galleria lungo circa 150 m, determinando picchi di temperatura che hanno superato i 1000 °C ed hanno provocato il crollo della volta in alcuni tratti di galleria.

I veicoli più vicini al portale sud sono riusciti ad invertire la marcia e le squadre di soccorso si sono bloccati a circa 100 m dall'incendio che è stato definitivamente estinto dopo due giorni.

Nella tragedia hanno perso la vita **11 persone**.

La presenza di luoghi sicuri realizzati con una spaziatura di 250 m e di una galleria di evacuazione (cunicolo di sicurezza) hanno permesso di salvare 30 persone.

L'incendio ha interessato 23 veicoli di cui 13 pesanti.

La figura seguente permette di visualizzare lo scenario dell'incidente e la vastità del carico di incendio.

Inoltre, la composizione del traffico, evidenzia come nel primo tronco di galleria interessato dall'incidente, e cioè il primo dal basso²¹ nella figura, siano presenti ben 7 veicoli pesanti.

Inoltre dalla figura, osservando gli altri due tronchi di galleria proseguendo dal basso verso l'alto, e cioè verso il portale nord, ed osservando la numerazione delle vittime , è possibile valutare l'influenza della propagazione dei fumi e dei gas tossici sull'incidente.

²¹ In corrispondenza del portale sud

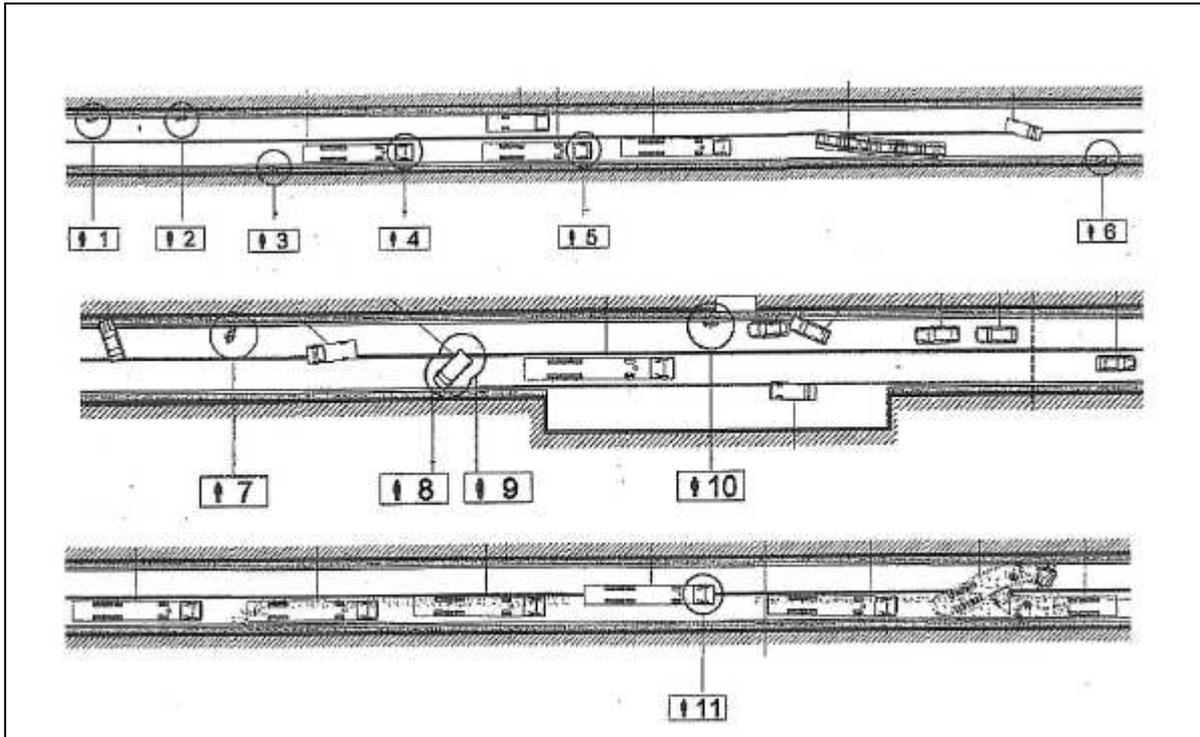


Figura 12: Scenario dell'incidente della Galleria del San Gottardo del 24 Ottobre 2001 [40]

4 Dati disponibili sull'incidentalità e sugli incendi in galleria

I dati a disposizione in materia di sicurezza sono essenzialmente di due tipi:

- Dati empirici (cioè prevalentemente dati derivanti da eventi incidentali passati).
- Dati sperimentali (cioè dati ricavati o indotti dalla modellazione di eventi al fine di una loro uniformità e confrontabilità quali possono essere ad esempio i dati degli incendi di progetto).

L'importanza della raccolta, della catalogazione e della divulgazione (agli operatori del settore) dei dati relativi agli incidenti in galleria è tale da aver indotto il legislatore a renderla obbligatoria e a regolamentarla con pari considerazione di tutti gli altri aspetti della sicurezza delle gallerie.

A questo proposito una fonte preziosa di acquisizione di dati in materia di sicurezza delle gallerie è rappresentata dalle relazioni periodiche (relazioni biennali) che ciascuno Stato membro dell'Unione Europea redige in relazione agli incidenti e agli eventi di incendio accaduti in galleria e che la Commissione Europea divulga a Tutti gli stati membri.

Nella tabella seguente vengono riportati gli incidenti in galleria, più grandi nel mondo, nel periodo compreso fra il 1970 e il 1999.

TUNNEL	LOCALITA'	LUNGHEZZA	DATA	MORTI	FERITI
Pecorile	Genova	662 m	1983	9	22
Nihonzaka	Shizuoka (JP)	2045 m	1979	7	2
Caldecott	Oakland (California)	1020 m	1982	7	2
Valsen	Valsen (olanda)	770 m	1978	5	5
Isola Delle Femmine	Palermo	150 m	1996	5	20
Serraripoli	Bologna	442 m	1993	4	-
De l'Arm	Nizza	1105 m	1986	3	5
Plander	Austria	6719 m	1995	3	-
Gumelens	Berna (Svizzera)	340 m	1987	2	-
Kajwara	Giappone	740 m	1980	1	-

Tabella 5 [41]

4.1 Considerazioni dedotte dai dati statistici

Secondo le statistiche italiane francesi e svizzere gli incidenti nelle gallerie stradali sono meno frequenti rispetto a quelli sulle strade a cielo aperto tuttavia le conseguenze di un incendio in galleria possono essere molto più serie di quelle di un incendio su strada a cielo aperto.

Dunque l'incendio in galleria rappresenta un evento di rischio molto grande, in termini di conseguenze che esso può provocare, e per questo motivo, in fase di progettazione della sicurezza di una galleria, esso rappresenta il più importante dei rischi da considerare.

Anche se, dai dati statistici, la possibilità di un evento di incendio serio in galleria sembra molto bassa, considerando l'elevata densità di traffico nelle gallerie, la possibilità che un tale evento si verifichi è più grande di quanto si possa pensare.

A conferma di questo molti tragici eventi di incendio si sono verificati, quasi ogni anno fra il 1994 e il 2004.

A titolo di esempio si pensi che fino al 1990, circa 37 milioni di veicoli per anno hanno attraversato il Tunnel Elb in Germania.

Inoltre, i dati aggiornati al 2010 mostrano che attraverso il Tunnel del Monte Bianco transitano circa due milioni di veicoli all'anno.

Si tenga poi presente che nella sola Europa ci sono moltissime gallerie e molte di esse hanno elevate lunghezze (molti chilometri).

Da queste considerazioni sugli incidenti in galleria e sugli incendi in galleria emerge la necessità della valutazione e della quantificazione del rischio ad essi connesso.

4.1.1 Dati sugli incendi

I dati più significativi sugli incendi in galleria sono per rilevanza numerica in termini di perdita di vite umane quelli di seguito elencate:

Tunnel del Monte Bianco 24 Marzo 1999	39 morti	Incendio di veicolo pesante dovuto probabilmente a surriscaldamento del motore
Tunnel dei Monti Tauri 29 Maggio 1999	12 morti	Incendio in seguito a collisione di veicolo pesante
Tunnel del San Gottardo 24 Ottobre 2001	11 morti	Incendio in seguito a collisione di veicolo pesante

Tabella 6

Le statistiche francesi dicono che si verifica uno o due incendi di auto, per chilometro di galleria, su ogni 100 milioni di auto che transitano in una galleria.

Inoltre 8 incendi di veicoli pesanti, per chilometro di galleria, su ogni 100 milioni che transitano in galleria, sono abbastanza seri da causare danni alla galleria stessa.

Si stima anche che gli incendi molto seri che coinvolgono veicoli pesanti (ed altri veicoli con presenza di morti) sono da uno a tre, per chilometro di galleria, su ogni mille milioni di veicoli pesanti che transitano in galleria. Alcuni studi indicano il comportamento umano e l'errore umano come il più importante dei fattori che causano morti negli eventi di incendio in galleria e

questo evidenzia quindi l'importanza della informazioni agli utenti della galleria quale elemento imprescindibile della progettazione della sicurezza.

Il comportamento e l'errore umano diventano ancora più influente sul rischio di incendio in galleria quanto più la galleria è lunga, proprio perché una elevata lunghezza della galleria influenza il comportamento umano in galleria; e già di per se la lunghezza della galleria è uno dei parametri della progettazione della sicurezza come si evince dalla legislazione in materia di sicurezza.

Questo però non deve indurre a pensare che gli eventi incidentali di incendio siano avvenuti solo in gallerie di elevate lunghezze, infatti i dati mostrano che anche nelle gallerie relativamente corte sono avvenuti seri eventi di incendio.

4.1.2 Tassi di incidenti in galleria e tassi di incendi in galleria

Altre fonti presentano i tassi di incidenti e di incendi in galleria nel seguente modo:

<i>Veicolo</i>		<i>Casi / 10⁸ veicoli per km</i>
Guasti		500-1500
Incidenti	Totale	50
	con feriti	10
	con vittime	1
Veicoli privati	tutti gli incendi	2-10-(25)
Veicoli pesanti (senza merci pericolose)	tutti gli incendi	10
	con danni alla galleria	1
Veicoli pesanti (con merci pericolose)	tutti gli incendi	2 (stima)

Tabella 7 [42]

Si nota come la percentuale di guasti sia preponderante rispetto alla percentuale totale di incidenti (differiscono infatti per uno o due ordini di grandezza) e quindi come questa incida nel caso di incidenti che possano occorrere per cause che non siano state considerate in fase di progettazione della sicurezza (il caso dell'incidente del Monte Bianco è di esempio).

4.1.3 Dati inerenti il Traforo del Monte Bianco

Il volume di traffico del Monte bianco è andato via via aumentando passando dall'8% del primo anno di esercizio a circa il 40% rispetto al volume totale di traffico del 1998.

La tabella seguente evidenzia fra, il 1966 (anno di apertura) e il 1998 (anno che precede la tragedia), un raddoppio del traffico leggero e turistico e un vertiginoso aumento (circa 18 volte) del traffico pesante.

ANNO	AUTO+BUS (PERSONE)	MERCI	TOTALE (PERSONE +MERCI)	TOTALE PREVISIONI DI PROGETTO (PERSONE+MERCI)
1966	547594	44856	592450	590000
1970	616342	138176	754518	664000
1975	766399	290360	1056759	733000
1980	871966	537214	1409180	809000
1985	905847	454956	1360803	850000
1990	1148538	746523	1895061	894000
1995	1164893	773911	1938804	939000
1998	1221085	776604	1997689	968000

Tabella 8 [43]

I seguenti grafici, differenziati in base alla composizione del traffico, mostrano il divario fra i volumi di traffico reali, e quelli attesi.

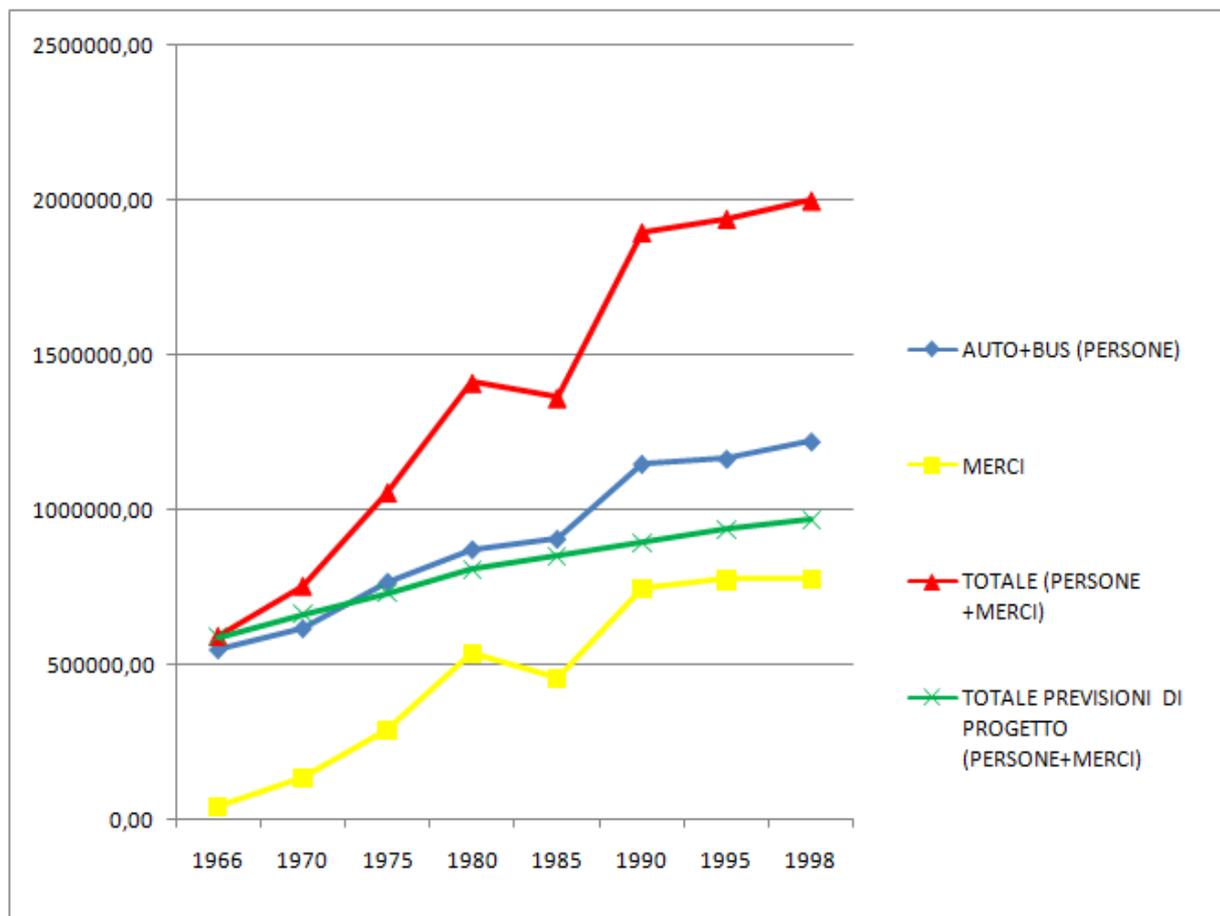


Figura 13

Antecedentemente alla tragedia del Monte Bianco del 1999, nei primi 34 anni di esercizio, all'interno dello stesso tunnel, sono occorsi 32 incidenti, 29 di essi hanno provocato un totale di 37 feriti e ognuno dei tre restanti incidenti ha provocato un morto.

Di questi 32 incidenti, 14 sono stati causati dall'eccesso di velocità o dalla guida in stato di ebbrezza.

In questi 34 anni ci sono stati 32 incendi le cui cause sono da ascrivere prevalentemente al surriscaldamento dei motori e dei freni o perdite fluidi²² infiammabili causati da rotture di guarnizioni.

5 Legislazione in materia di sicurezza delle Gallerie stradali

5.1.1 Premesse

Successivamente alle tragedie del Tunnel del Monte Bianco del 24 Marzo 1999 , del Tunnel dei Monti Tauri del 1999 e del Tunnel del San Gottardo del 2001, e alla conseguente aumentata sensibilità collettiva, la domanda di sicurezza (nella accezione più generale possibile) è inevitabilmente diventata perentoria.

Inoltre, con particolare riferimento al rischio di incendio, le considerazioni del capitolo 4 relative ai dati statistici in materia di sicurezza delle gallerie stradali²³ in esercizio, evidenziano la necessità di adottare misure di sicurezza tese alla diminuzione di tale rischio sia in termini di prevenzione dell'incendio in galleria sia in termini di gestione delle conseguenze dell'incendio.

Entrambi questi aspetti sono contemplati in maniera rigorosa dalla legislazione europea e dalla legislazione nazionale a partire dal 2004, che estende il suo raggio di regolamentazione sia alle gallerie stradali in esercizio esistenti prima del 2004 sia a quelle di nuova costruzione.

²² La causa dell'innesco dell'incendio del 1999 del camion nel tunnel del Monte Bianco è stata la perdita di carburante sulla superficie surriscaldata di parti del motore.

²³ Invece il problema della sicurezza delle gallerie ferroviarie presenta delle caratteristiche tali da essere considerato separatamente.

5.1.2 Cronologia e nomenclatura legislativa

- Il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, su proposta della Commissione Europeo, il 29 Aprile 2004 hanno promulgato la **DIRETTIVA EUROPEA 2004/54/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO²⁴** in materia di requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete dei trasporti stradale transeuropea (TEN²⁵)
Tale normativa fornisce agli Stati membri, attraverso le linee guida per la sua attuazione, uno strumento di progettazione della sicurezza delle gallerie stradali.
- L'Italia ha recepito ed attuato tale direttiva attraverso il **DECRETO²⁶ LEGISLATIVO 5 OTTOBRE 2006 n. 264**. Che porta come titolo: "Attuazione della Direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea".
- La Direzione Centrale Progettazione dell'ANAS²⁷ s.p.a, nel Novembre del 2006 ha emanato la revisione²⁸ della circolare intitolata: **LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA NELLE GALLERIE STRADALI**
L'iter di tale circolare è il seguente:

²⁴ Pubblicata in Gazzetta Ufficiale del 7.6.2004

²⁵ TEN: acronimo di Rete Dei Trasporti Transeuropea

²⁶ Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 235 del 9 Ottobre 2006, suppl. ord.

²⁷ ANAS: acronimo di Ente Nazionale per le Strade.

²⁸ A seguito dell'approvazione Dlgs N°264 del 5/10/2006 di recepimento della Direttiva 2004/54/CE

Oggetto	Data
Emissione Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali	Aprile 2005
Revisione a seguito del voto del CSLLPP del 29 settembre 2005	Dicembre 2006
Revisione a seguito del voto del CSLLPP del 15 dicembre 2005	Febbraio 2006
Revisione a seguito dell'approvazione Dlgs N°264 del 5/10/2006 di recepimento della Direttiva 2004/54/CE	Novembre 2006

Tabella 9: Emissione e revisioni delle Linee Guida ANAS

5.1.3 Interpretazione della legislazione vigente

Sia le leggi europee che quelle dei singoli stati , mediante le linee guida le prime, e mediante norme attuative le seconde, hanno lo scopo prioritario di fornire criteri e metodi di progettazione della sicurezza per innalzare i livelli di sicurezza delle gallerie di nuova costruzione.

Inoltre, tali leggi e linee guida, hanno lo scopo, non secondario, di aggiornare la valutazione del rischio delle gallerie esistenti (gallerie stradali in esercizio) e quindi disporre misure e interventi di sicurezza tesi all'adeguamento con nuovi livelli di sicurezza (livelli di rischio) e alla omogeneizzazione dei livelli di sicurezza fra le varie gallerie, quindi considerando anche il fatto che molte gallerie sono entrate in esercizio molti anni addietro quando cioè le tecniche di progettazione della sicurezza e la tecnologia degli impianti e delle attrezzature erano molto diverse da quelle attuali.

L'importanza del rischio connesso all'Innesco di incendio in galleria giustifica il risalto che la legislazione gli attribuisce, disponendo norme e criteri di progettazione finalizzati ad abbattere sensibilmente tale rischio e finalizzati ad

abbattere il rischio che si verifichino eventi che possano condurre all'incendio in galleria.

5.1.4 Capisaldi della Direttiva Europea 2004/54/CE

- La Direttiva europea 2004/54/CE [44] ha lo scopo di **garantire un livello minimo di sicurezza** agli utenti della strada nelle gallerie della rete²⁹ dei trasporti stradale transeuropea **mediante la prevenzione di situazioni critiche** che possano metter in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria e **mediante la protezione in caso incidente**.
- La direttiva si applica a tutte le gallerie della rete dei trasporti stradale transeuropea di lunghezza superiore ai 500 m, che siano già in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progetto.
- I **requisiti minimi di sicurezza** della galleria, che permettono il raggiungimento del **livello minimo di sicurezza**, previsto dalla normativa, si ottengono adottando le **misure di sicurezza** previste nei paragrafi dell'allegato I (della normativa stessa). Inoltre le misure di sicurezza da realizzare in una galleria si ottengono facendo considerazioni rigorose sull'**infrastruttura galleria, sull'esercizio della galleria, sugli utenti e sui veicoli** e cioè sull'intero **"sistema galleria"**, vale a dire sui seguenti **parametri di sicurezza**:

²⁹ Definita alla sezione 2 dell'allegato I della decisione n. 1692/96/CE ed illustrata da carte geografiche/o descritta nell'allegato II della decisione

PARAMETRI DI SICUREZZA
<ul style="list-style-type: none"> - lunghezza della galleria - numero di fornici - numero di corsie - geometria della sezione trasversale - allineamento verticale e orizzontale - tipo di costruzione - traffico unidirezionale o bidirezionale - volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione 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

Tabella 10 [45]

Nel caso in cui determinati requisiti strutturali di sicurezza (finalizzati al raggiungimento del livello minimo di sicurezza) possano essere ottenuti soltanto tramite tecniche irrealizzabili o tramite tecniche che hanno un costo sproporzionato, l'autorità amministrativa può accettare misure di sicurezza alternative (misure di contenimento del rischio alternative) che permettano l'ottenimento di tali requisiti, a patto che con tali misure alternative si raggiunga un livello di sicurezza equivalente o accresciuto cioè a patto che si ottengano una prevenzione e una protezione accresciute.

Per quanto invece riguarda la progettazione delle **infrastrutture di sicurezza** (stazioni di emergenza, segnaletica, piazzole di sosta, uscite di emergenza, ritrasmissione radio se richiesta) non è consentito discostarsi dai requisiti di sicurezza previsti nell'allegato I della normativa, questo per consentire uniformità dei livelli di sicurezza minimi di tutte le gallerie a cui si applica la normativa.

- Per le gallerie il cui progetto non è stato ancora approvato, cioè per le nuove gallerie, la procedura di messa in esercizio è regolata dall'allegato II della normativa.

- Nel caso di gallerie già in esercizio, il gestore della galleria, se necessario, propone all'autorità amministrativa un piano di adeguamento alla direttiva europea stessa oppure propone gli interventi correttivi che vuole realizzare.

L'autorità amministrativa approva gli interventi correttivi o chiede che vi vengano apportate modifiche.

Se gli interventi correttivi comportano modifiche sostanziali nella struttura o nell'esercizio, una volta realizzati tali interventi (modifiche), si attua la procedura dell'allegato II, cioè si procede come con una nuova galleria.

- Al fine di garantire che la galleria sia conforme alla direttiva europea, l'autorità amministrativa verifica che l'ente per le ispezioni effettui ispezioni periodiche con una cadenza che non superi i sei anni. Se dalla relazione dell'ente per le ispezioni emerge la non conformità della galleria alla direttiva europea, l'autorità amministrativa comunica al gestore della galleria e al responsabile della sicurezza che devono essere adottate misure volte ad accrescere il livello di sicurezza della

galleria e cioè dirette a soddisfare i requisiti minimi di sicurezza previsti dalla normativa. Inoltre l'autorità amministrativa definisce le condizioni per il mantenimento in esercizio o per la riapertura da applicare fino al completamento degli interventi correttivi. Se tali interventi correttivi comportano modifiche sostanziali alla struttura galleria o all'esercizio della galleria cioè al "sistema galleria", la galleria è soggetta a una nuova autorizzazione di esercizio cioè si procede come con una nuova galleria.

- L'analisi di rischio rappresenta lo strumento per la valutazione del livello di rischio del "sistema galleria" previsto dalla direttiva europea. Tale livello di rischio deriva dall'adozione delle misure di sicurezza e quindi dai requisiti minimi previsti dalla direttiva in base ai parametri di sicurezza adottati per la progettazione della sicurezza della galleria. Qualora il livello di rischio non fosse accettabile (confronto con le curve di rischio) occorre modificare i parametri di rischio fino ad ottenere un livello di rischi accettabile.

La direttiva europea prevede che l'analisi di rischio venga effettuata da un organismo funzionalmente indipendente dal gestore della galleria.

L'analisi di rischi viene inserita nella documentazione di sicurezza che viene trasmessa all'autorità amministrativa come previsto nell'allegato II della direttiva europea.

Ciascuno stato membro informa la Commissione Europea riguardo alla metodologia di analisi di rischio utilizzata e quest'ultima informa elettronicamente di ciò tutti gli altri stati membri.

- Qualora il gestore della galleria lo richiedesse, adducendo un valida documentazione, l'autorità amministrativa può concedere deroghe ai requisiti della direttiva europea per consentire l'utilizzo di equipaggiamenti di sicurezza innovativi e l'impiego di procedure di sicurezza innovative che consentano un **livello di sicurezza equivalente** o accresciuto.

L'iter procedurale di questa richiesta iter procedurale viene regolamentato dalla direttiva stessa.

- Per considerare l'aspetto dell'adeguamento della direttiva e quindi degli allegati della direttiva stessi al progresso tecnologico rispetto alla data di promulgazione della direttiva, è prevista un'apposita procedura (procedura di comitato).

5.1.5 Ruoli e funzioni previsti dalla Direttiva Europea 2004/54/CE

AUTORITA' AMMINISTRATIVA

Ciascuno Stato membro dell'Unione Europea designa **una o più autorità amministrative** la cui responsabilità è di assicurare il rispetto di tutti gli aspetti in materia di sicurezza di una galleria e di prendere disposizioni necessarie per garantire l'osservanza della normativa.

Ciascuna galleria che si trova nel territorio di un solo Stato della rete stradale dei trasporti transeuropea è soggetta alla responsabilità di una sola autorità amministrativa.

Se una galleria si trova sul territorio di due Stati, ciascuno stato designa un'autorità amministrativa oppure entrambi gli stati designano un'autorità amministrativa comune.

L'autorità amministrativa mette in servizio le gallerie, sospende o limitando l'esercizio delle gallerie se queste non soddisfano i requisiti di sicurezza e specifica le condizioni per ristabilire le condizioni di normale esercizio.

L'autorità amministrativa periodicamente ispeziona le gallerie, effettua delle prove, ed **elabora nuovi requisiti di sicurezza a seguito delle mutate condizioni del sistema galleria** e del conseguente mutato livello di sicurezza connesso con il grado di vetustà di tale sistema galleria e del progresso tecnologico.

Si occupa inoltre di redigere i piani di intervento in caso di emergenza ed altri schemi organizzativi ed operativi finalizzati alla formazione e all'equipaggiamento dei servizi di pronto intervento.

Definisce la procedura per la chiusura immediata di una galleria in caso di emergenza.

Si occupa dell'attuazione delle misure necessarie di riduzione del rischio.

GESTORE DELLA GALLERIA

Per ciascuna galleria del territorio di uno stato membro, che si trovi nella **fase di progettazione**, di **costruzione** o di **esercizio**, l'autorità amministrativa identifica quale gestore della galleria un organismo pubblico o privato.

Il gestore della galleria è responsabile della gestione della galleria nella **fase interessata**.

Ciascuna galleria ha un unico gestore.

Il gestore della galleria può coincidere con l'autorità amministrativa.

Il gestore della galleria ha anche il compito di redigere un rapporto di inconvenienti per tutti gli incidenti o eventi di rilievo che si verificano in una galleria.

RESPONSABILE DELLA SICUREZZA

Per ciascuna galleria il gestore della galleria designa un responsabile della sicurezza che coordina tutte le misure di prevenzione e di salvaguardia dirette a garantire la sicurezza degli utenti e del personale di esercizio.

Le funzioni del responsabile della sicurezza sono:

Assicura il coordinamento con servizi di pronto intervento e partecipa alla preparazione dei piani operativi
Partecipa alla pianificazione , all'attuazione e alla valutazione degli interventi di emergenza
Partecipa alla definizione dei piani di sicurezza e delle specifiche della struttura, degli equipaggiamenti e del funzionamento, sia nel caso di gallerie nuove sia nel caso di modifica delle gallerie esistenti
Verifica che il personale di esercizio e i servizi di pronto intervento vengano formati, e partecipa all'organizzazione di esercitazioni svolte a intervalli regolari
Viene consultato sulla messa in servizio della struttura, sugli equipaggiamenti e sul funzionamento delle gallerie
Verifica che siano effettuate la manutenzione e le riparazioni sulla struttura e degli equipaggiamenti delle gallerie
Partecipa alla valutazione di ogni incidente di rilievo

Tabella 11

ENTE PER LE ISPEZIONI

La funzione ispettiva di questo ente può anche essere svolta dall'autorità amministrativa.

Questo ente deve essere funzionalmente indipendente dal gestore della galleria.

COMITATO

Assiste la Commissione Europea nella procedura di adeguamento al progresso tecnologico della direttiva europea e quindi dei suoi allegati.

5.1.6 Allegati e documentazione della Direttiva Europea 2004/54/CE

ALLEGATO I

Definisce i requisiti minimi di sicurezza, attraverso i quali si definiscono le misure di sicurezza che permettono di raggiungere un livello minimo di sicurezza del “sistema galleria” in relazione ai parametri di sicurezza indicati dallo stesso allegato.

ALLEGATO II

Regolamenta le fasi di **progettazione**, di **messa in esercizio**, di **esercizio** della galleria, le eventuali **modifiche** al “sistema galleria” e le **esercitazioni periodiche** di sicurezza.

DOCUMENTAZIONE DI SICUREZZA

Contiene tutte le informazioni inerenti la sicurezza del “sistema galleria” e viene prodotta e aggiornata in tutte le fasi di realizzazione (e modifiche) del “sistema galleria”.

RELAZIONI PERIODICHE

Con cadenza biennale, gli stati membri dell'Unione Europea redigono relazioni sugli incendi occorsi nelle gallerie e sugli incidenti descrivendone le cause e la frequenza.

In queste relazioni vengono espresse valutazioni su tali eventi e sono contenute informazioni inerenti l'efficacia delle misure di sicurezza.

Attraverso la Commissione europea queste relazioni vengono divulgate a tutti gli Stati membri.

5.2 Decreto Legislativo 2006 n.264

5.2.1 Capisaldi del Decreto Legislativo 2006 n.264

- Per la sua natura di decreto attuativo presenta lo stesso scopo della direttiva europea che attua.

Dunque tale decreto [46] vuole “garantire un **livello minimo** sufficiente di sicurezza agli utenti della strada nelle gallerie della rete stradale trans-europea mediante la progettazione e l'adozione di **misure di prevenzione** atte alla riduzione di situazioni critiche che possono mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria, nonché mediante **misure di protezione** in caso di incidente” e si applica a tutte le gallerie del territorio nazionale appartenenti alla **rete dei trasporti stradale trans-europea** di lunghezza **superiore ai 500 metri**, in fase di progetto, in fase di costruzione o in già in esercizio.

- Nel decreto viene precisato che con la locuzione “**servizio di pronto intervento**” si intendono: tutti i servizi locali sia pubblici che privati, o del

personale di servizio della galleria che intervengono in caso di incidente.

- Per **lunghezza della galleria** si intende la lunghezza della corsia di circolazione più estesa misurata nei tratti di galleria completamente chiusi sui quattro lati.
- Per garantire un livello minimo di sicurezza, le misure di sicurezza adottate devono essere tali che i **requisiti minimi** del sistema galleria siano quelli prescritti dal decreto stesso descritti nell'allegato 2 del decreto.

I requisiti minimi fanno riferimento ai parametri di sicurezza riportati nell'allegato 2 del decreto e che ricalcano l'elenco dei parametri di sicurezza previsto dalla Direttiva Europea 2004/54/CE di cui si è detto nel paragrafo 5.1.4 di questa tesi.

- Nell'articolo 13 del decreto viene precisato che l'analisi di rischio viene effettuata da un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal gestore della galleria.

Qualora la galleria presentasse un livello di sicurezza non accettabile, con l'analisi di rischio si deve provvedere ad innalzare il livello di sicurezza.

Inoltre nel caso in cui, per una galleria, si possa raggiungere un livello di sicurezza accettabile con misure di sicurezza tecnicamente irrealizzabili o dal costo sproporzionato, l'analisi di rischio deve dimostrare che con misure di sicurezza integrative ed alternative si deve ottenere un livello di sicurezza della galleria equivalente o accresciuto rispetto a quello ottenuto con le misure di sicurezza prescritte con l'allegato 2.

Lo stesso articolo 13 prescrive che l'analisi di rischio deve essere effettuata con le modalità dell'allegato 3.

Inoltre i contenuti dell'analisi di rischio devono essere inseriti nella documentazione di sicurezza.

5.2.2 Ruoli e funzioni previsti dal Decreto Legislativo 2006 n.264

COMMISSIONE PERMANENTE PER LA GALLERIE

Il ruolo e le funzioni dell'autorità amministrativa previsto dalla Direttiva Europea 2004/54/ce vengono assunti dalla commissione permanente per le gallerie che viene istituita dal Consiglio³⁰ Superiore dei Lavori Pubblici e viene nominata dal presidente di tale consiglio.

Il compito principale della commissione permanente per le gallerie è quello di assicurarsi che i gestori delle gallerie considerino tutti gli aspetti connessi alla sicurezza delle gallerie.

Inoltre la commissione approva i progetti per l'attuazione delle misure di sicurezza predisposti dal gestore della galleria.

Effettua le ispezioni, le valutazioni inerenti alle gallerie ed i collaudi delle gallerie stesse e valuta gli aggiornamenti e le proposte di nuove metodologie di analisi di rischio.

Per le funzioni ispettive, la commissione permanente per le gallerie si avvale di ingegneri del **Dipartimento dei vigili del fuoco del soccorso pubblico e della difesa civile**.

La commissione può sospendere o limitare l'esercizio di una galleria se i requisiti di sicurezza non sono rispettati e specifica le condizioni per ripristinarlo.

³⁰ “ Organo di consulenza tecnica del Ministero dei Lavori Pubblici per i progetti e le questioni di interesse urbanistico”. [Wikipedia]

IL GESTORE DELLA GALLERIA

È la figura responsabile della gestione della galleria.

Per le strade in gestione diretta il gestore delle gallerie è l'ANAS mentre, per le strade gestite in concessione, la gestione delle gallerie è affidata alle società concessionarie.

All'articolo 5, comma 3 del decreto legislativo in analisi si precisa anche che il gestore della galleria redige un rapporto per tutti gli incidenti o eventi di rilievo che si verificano in galleria e che possono influire sulla sicurezza.

Il gestore della galleria periodicamente fa delle prove, delle verifiche e dei controlli sulle gallerie e individua ed attua i provvedimenti di sicurezza che queste attività richiedono per la riduzione dei rischi connessi alla galleria.

Inoltre il gestore attua schemi organizzativi ed operativi, compresi i piani di intervento in caso emergenza per fornire formazione ed equipaggiamento ai servizi di pronto intervento.

Il gestore definisce le procedure per la chiusura immediata della galleria in caso di emergenza.

Inoltre il gestore compila e aggiorna, per ogni galleria, la documentazione di sicurezza e ne consegna una copia al responsabile della sicurezza.

IL RESPONSABILE DELLA SICUREZZA

Viene designato dal gestore della galleria previa accettazione da parte della commissione permanente delle gallerie.

Egli coordina tutte le misure di prevenzione e salvaguardia (protezione) finalizzate a garantire la sicurezza degli utenti e del personale di esercizio della galleria e, per tutte le questioni inerenti alla sicurezza opera in piena autonomia.

Il decreto in questione prevede anche la designazione da parte del gestore, previa accettazione della commissione permanente delle gallerie di un **sostituto del responsabile della sicurezza**.

Le mansioni del responsabile della sicurezza sono:

- Assicurare il coordinamento con i servizi di pronto intervento e partecipare alla preparazione dei piani operativi
- Partecipare alla pianificazione, all'attuazione e alla valutazione degli interventi di emergenza
- Partecipare alla definizione dei piani di sicurezza e delle specifiche della struttura, degli equipaggiamenti e del funzionamento, sia nel caso di gallerie nuove sia nel caso di modifica delle gallerie esistenti.
- **Verifica che il personale di esercizio e i servizi di pronto intervento vengano formati e partecipa all'organizzazione di esercitazioni svolte ad intervalli regolari non superiori ad un anno.**
- Viene consultato sulla messa in servizio della struttura, sugli equipaggiamenti e sul funzionamento delle gallerie.
- Verifica, attraverso visite periodiche, che siano effettuate la manutenzione e le riparazioni della struttura e degli equipaggiamenti delle gallerie.
- Partecipa alla valutazione di ogni incidente o evento di rilievo.

5.2.3 Allegati e documentazione del Decreto Legislativo 2006 n. 264

- **ALLEGATO 1**
Fornisce il glossario relativo al decreto stesso che è previsto dall'articolo 1.

- **ALLEGATO 2**

Descrive le misure di sicurezza e quindi elenca i parametri di sicurezza e definisce i requisiti minimi di sicurezza.

In particolare l'allegato 2 elenca i seguenti punti:

1. Criteri per decidere sulle misure di sicurezza
2. Misure infrastrutturali
3. Misure riguardanti l'esercizio
4. Campagne di informazione

- **ALLEGATO 3**

Definisce le modalità (metodologia) dell'analisi di rischio e precisa che la metodologia di analisi di rischio prescritta dal decreto n.264 si riferisce agli eventi critici iniziatori di seguito elencati:

- Incendi
- Collisioni con incendio
- Sversamenti di sostanza infiammabili
- Rilasci di sostanze tossiche e nocive

Quindi la metodologia di analisi di rischio utilizzata considera separatamente l'incidentalità stradale dalla incidentalità elencata nei precedenti punti.

La metodologia per determinare il livello di rischio della galleria in esame che l'allegato 3 prescrive è quella dell'analisi di rischio quantitativa.

La **precisione**³¹ con cui si applica l'analisi di rischio quantitativa deve essere tale da permettere la **saldabilità** degli utenti della galleria in relazione agli scenari derivanti dagli eventi iniziatori critici precedentemente elencati.

- **ALLEGATO 4**

Questo allegato regola tutti gli aspetti inerenti ai seguenti punti:

1. Approvazione del progetto
2. Documentazione di sicurezza
3. Messa in servizio
4. Modifiche
5. Esercitazioni periodiche

- **DOCUMENTAZIONE DI SICUREZZA**

La documentazione di sicurezza contiene il progetto della sicurezza in cui sono riportate le misure di sicurezza di prevenzione, protezione e mitigazione adottate per la galleria.

Fra gli altri aspetti contenuti e descritti nella documentazione di sicurezza deve esserci uno studio sulle previsioni di traffico e sulle modalità di trasporto delle merci pericolose.

Per tali previsioni deve essere effettuata ed allegata l'analisi di rischio.

³¹ Livello di analisi di rischio

5.3 Linee Guida ANAS per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali

5.3.1 Premesse

Le linee guida per la progettazione della sicurezza in galleria costituiscono un metodo di progettazione della sicurezza stessa.

Per questo motivo, molta parte della loro descrizione, nella presente tesi, viene accorpata alla descrizione dell'analisi di rischio che invece costituisce uno strumento tecnico analitico della progettazione della sicurezza in galleria.

5.3.2 Aspetti fondamentali del metodo di progettazione della sicurezza in galleria secondo i dettami delle linee guida

Fra gli aspetti fondamentali del metodo di progettazione della sicurezza in galleria secondo i dettami delle linee guida spicca la distinzione fra misure le misure di sicurezza strutturali che riguardano la struttura galleria e le misure di sicurezza impiantistiche che riguardano l'infrastruttura di sicurezza.

Inoltre il metodo prevede la definizione di gruppi omogenei di misure di sicurezza in relazione a ciascun parametro di sicurezza.

In accordo con l'obiettivo di sicurezza della Direttiva Europea, il metodo prevede fra i suoi obiettivi quello di raggiungere un livello di sicurezza tale da prevenire il verificarsi di tutte le situazioni che possano metter in **pericolo** la vita umana, l'ambiente, la struttura e le dotazioni impiantistiche. Il metodo risponde anche all'obiettivo di **protezione** previsto dalla Direttiva Europea prefissandosi come scopo che nel caso incidente, i soggetti direttamente in esso coinvolti debbano potersi mettere in salvo, mentre

quelli non direttamente coinvolti debbano poter reagire in modo immediato evitando ulteriori danni.

I servizi di emergenza devono poter intervenire con efficacia.

Inoltre il metodo fa riferimento anche alla protezione in caso di evento incidentale, oltre che degli utenti, dei soccorritori, della struttura galleria, della infrastruttura di sicurezza, anche dell'ambiente e dell'economia, prevedendo che i danni materiali e i danni economici, in caso di incidente, siano limitati.

5.4 Il Decreto Ministeriale del 10 Marzo 1998 e considerazioni tecniche riguardo agli incendi

5.5 Interpretazione

Il decreto ministeriale del 10 marzo 1998 è intitolato:

“criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro”.

Tale decreto **attua** le disposizioni del comma 1 dell'articolo 13 del decreto legislativo del 19 settembre 1994 n. **626**.

Dunque il decreto stabilisce i criteri di valutazione dei rischi di incendio **nei luoghi di lavoro**.

Inoltre il decreto indica le **misure di prevenzione e protezione** da adottare in relazione al fenomeno dell'incendio nei luoghi di lavoro.

Il decreto estende il suo campo di applicazione anche ai **cantieri temporanei e mobili** (la cui attività è regolata dal decreto legislativo n. **494**)

e alle attività industriali (la cui attività è regolata dal decreto Presidenziale n.175).

Nell'**allegato 1** del decreto sono riportati i criteri per la valutazione del rischio di incendio nei luoghi di lavoro, ma non vengono impediti altri metodi per valutare tale rischio.

L'**allegato 1** è quindi intitolato come:

“linee Guida per la valutazione dei rischi di incendio nei luoghi di lavoro”

l'**allegato 1** fornisce una definizione sia di pericolo di incendio sia di rischio di incendio.

Il concetto di **pericolo di incendio** è connesso con le cause che possono determinare un incendio mentre il **rischio di incendio** è connesso con le conseguenze che può determinare un incendio (questo in analogia con le definizioni generali di rischio e di pericolo che verranno approfondite nei paragrafi successivi).

Dunque il pericolo di incendio è connesso con i **materiali presenti**³² nei luoghi di lavoro e con il tipo di lavoro svolto in quel luogo mentre il rischio di incendio è connesso con il danno³³ che tali materiali e tali metodi di lavoro possono indurre.

A seguito della valutazione del rischio di incendio, al con l'obiettivo di tutelare i lavoratori e dei presenti sul luogo di lavoro, il **datore di lavoro** adotterà delle **misure di prevenzione degli incendi**.

³² E con la loro disposizione nel luogo di lavoro

³³ E quindi con i lavoratori e con le persone presenti nel luogo di lavoro.

Inoltre il datore di lavoro trae dalla valutazione del rischi di incendi le **informazioni** che occorre trasmettere ai lavoratori e ai presenti sul luogo di lavoro in merito al pericolo ed al rischio di incendio.

In più, a seguito della valutazione del rischi incendio, il datore di lavoro, dispone la formazione dei lavorati affinché le misure di prevenzione e di protezione (tecniche, organizzative e gestionali) possano essere adottate efficacemente.

La valutazione del rischio incendio dà particolare enfasi alla prevenzione degli incendi e quindi alle misure di prevenzione degli incendi, infatti nell'allegato 1 si precisa che qualora non fosse possibile eliminare del tutto il rischio di incendio, questo deve essere ridotto e deve esser valutato anche il **rischio residuo**.

Le fasi previste dalla metodologia di valutazione del rischi incendio del decreto in studio (allegato 1) sono [47]:

- INDIVIDUAZIONE DI OGNI PERICOLO DI INCENDIO e cioè ad esempio individuazione di sostanze facilmente combustibili e infiammabili, sorgenti di innesco, situazione che possono determinare la facile propagazione di un incendi.
- INDIVIDUAZIONE DEI LAVORATORI E DEI PRESENTI SUL LUOGO DI LAVORO ESPOSTE AL RISCHI DI INCENDIO.
- ELIMINAZIONE O RIDUZIONE DEI PERICOLI DI INCENDIO
- VALUTAZIONE DEL RISCHIO RESIDUO DI INCENDIO
- VERIFICA DELLA ADEGUATEZZA DELLE MISURE DI SICUREZZA ADOTTATE OVVERO INDIVIDUAZIONE DI EVENTUALI ULTERIORI

PROVVEDIMENTI E MISURE DI SICUREZZA NECESSARIE AD ELIMINARE O RIDURRE I RISCHI RESIDUI DI INCENDIO.

I materiali facilmente combustibili ed infiammabili che l'allegato 1 considera sino: **vernici e solventi infiammabili, adesivi infiammabili, gas infiammabili, grandi quantità di carta e materiali di imballaggio, materiali plastici (in particolare sotto forma di schiume), grandi quantità di manufatti infiammabili, prodotti chimici che possono essere infiammabili o che possono reagire con altre sostanze provocando un incendio, prodotti derivati dalla lavorazione del petrolio, vaste superfici di pareti o solai rivestite con materiali facilmente combustibili.**

Per ridurre i pericoli derivanti dalle sostanze e dei materiali combustibili ed infiammabili l'allegato 1 precisa, nei criteri³⁴ per ridurre tali pericoli che, ad esempio che i materiali infiammabili devono essere immagazzinati in luoghi realizzati con strutture resistenti al fuoco.

Per **resistenza al fuoco [48]** si intende la capacità di una struttura di conservare le proprie caratteristiche meccaniche in presenza di un incendio per un periodo di tempo misurato in minuti primi.

A seconda del numero di minuti per i quali una struttura è in grado di conservare le sue caratteristiche meccaniche è possibile classificare i livelli di resistenza al fuoco di una struttura.

A livello tecnico nel concetto di resistenza al fuoco è insito il concetto di **compartmentazione antincendio** (per quanto riguarda la resistenza al fuoco).

³⁴ E quindi nelle misure di prevenzione degli incendi.

Per **compartimento antincendio** [49] si intende una struttura o una parte di struttura delimitata da elementi strutturali³⁵ e non strutturali³⁶ dotati di una certa resistenza al fuoco.

Dunque più in generale la resistenza al fuoco di una struttura si realizza anche compartimentando la struttura stessa.

Ne gergo tecnico si incontra anche la definizione di **reazione al fuoco** che: “esprime il comportamento al fuoco di un certo materiale che decomponendosi alimenta il fuoco stesso a cui è esposto”.

In relazione alla reazione alla reazione al fuoco si può parlare di” **capacità di compartimentazione** di un certo elemento costruttivo che esprime l’attitudine di tale elemento, sotto l’azione del fuoco, a conservare un sufficiente isolamento termico e una sufficiente tenuta ai fumi e ai gas caldi derivanti dalla combustione” [50].

Raggruppando queste considerazioni tecniche è possibile classificare gli elementi strutturali mediante un indice che dal punto di vista tecnico viene indicato con l’acronimo REI.

Tale indice REI³⁷ esprime dunque le caratteristiche di resistenza meccanica (R), di tenuta alle fiamme ai fumi e ai gas (E), e di isolamento termico di un certo elemento strutturale.

L’allegato 1 elenca anche le sorgenti di innesco e le fonti di calore che possono costituire pericolo di incendio o di propagazione dell’incendio.

Un esempio di tali sorgenti può essere la presenza di fiamme libere o scintille proprie di alcune metodologie di lavoro come ad esempio la saldatura.

³⁵ Come possono essere ad esempio i muri o i solai.

³⁶ Come possono essere ad esempio le porte o altri elementi divisorii di una struttura.

³⁷ “REI è l’acronimo di: resistenza, étanchèité au feu (tenuta in italiano), isolamento”.

Per quanto riguarda l'identificazione dei lavoratori e dei presenti sui luoghi di lavoro, l'allegato 1 precisa in particolare che deve essere rivolta molta attenzione alle situazioni occasionali di **affollamento**³⁸ negli stessi luoghi di lavoro e alle situazioni di difficoltà di reazione da parte dei lavoratori e dei presenti ad un incendio.

La metodologia di valutazione del rischio di incendio descritta conduce alla **classificazione del livello di rischio di incendio dei luoghi di lavoro.**

In base a tale classificazione i luoghi di lavoro potranno essere classificati come:

- LUOGHI DI LAVORO A RISCHIO DI INCENDIO BASSO
- LUOGHI DI LAVORO A RISCHIO DI INCENDIO MEDIO
- LUOGHI DI LAVORO A RISCHIO INCENDIO ELEVATO

Questa classificazione si riferisce ai luoghi di lavoro stessi o a parti di essi.

Ad esempio i luoghi di lavoro a rischio incendio alto sono **“quei luoghi di lavoro o parti di essi per cui a causa della presenza di sostanze altamente infiammabili e/o per le condizioni locali e/o per le condizioni di esercizio sussistono notevoli probabilità di sviluppo incendio e, nella fase iniziale sussistono forti probabilità di propagazione delle fiamme, ovvero non è possibile la classificazione come luogo a rischio incendio basso o medio”.**

L'allegato 1 precisa che **“per i luoghi di lavoro grandi o complessi si può ridurre il livello di rischio mediante l'adozione di misure di protezione attiva di tipo automatico come ad esempio gli impianto di spegnimento automatici, impianti automatici di rivelazione incendi o gli impianti di estrazione dei fumi”.**

³⁸ Nell'allegato 3 l'**affollamento** viene definito come: “il numero massimo ipotizzabile di lavoratori e di persone presenti nel luogo di lavoro o in una determinata area dello stesso”.

È molto importante notare che l'allegato 1 prevede che la classificazione di un luogo di lavoro come luogo di lavoro ad elevato rischio di incendio viene fatta per quei luoghi di lavoro per cui l'affollamento, lo stato dei luoghi, o le limitazioni motorie dei presenti rendono difficoltosa l'evacuazione in caso di incendio.

Questa classificazione restrittiva viene fatta indipendentemente dal fatto che in tale luogo siano o no presenti sostanze infiammabili e dalla facilità di propagazione delle fiamme.

Nell'allegato 1 vengono anche elencate le **misure di sicurezza antincendio compensative** che sono quelle misure che devono essere adottate nel caso in cui le misure di sicurezza antincendio previste dall'allegato 1 stesso non possano essere adottate in modo completo.

La procedura di valutazione del rischio di incendio prevede la redazione di un **documento** di tale valutazione in cui vengono riportati i pericoli individuati e i lavoratori ed i presenti nei luoghi di lavoro esposti agli stessi pericoli.

L'allegato 2, a seguito della procedura di valutazione del rischio di incendio nei luoghi di lavoro, regola le misure di prevenzione degli incendi che sono:

- Misure di tipo tecnico
- Misure di tipo organizzativo e gestionale

Inoltre l'allegato 2 elenca le cause ed i pericoli più comuni degli incendi.

L'allegato 3 regola le misure relative alle vie di uscita in caso di incendio e in particolare riporta la definizione di:

- **Luogo sicuro**
- **Percorso sicuro**

Un **luogo sicuro** viene definito come definito come “il luogo dove le persone possono ritenersi al sicuro dagli effetti di un incendio”.

Invece un **percorso sicuro** viene definito come “un percorso caratterizzato da una adeguata protezione contro gli effetti di un incendio che può svilupparsi nella restante parte dell’edificio”.

L’allegato 4 regola le **misure per la rivelazione e l’allarme in caso di incendio**.

Tali misure hanno lo scopo di avvisare tempestivamente le persone presenti in un luogo di lavoro della presenza di un principio di incendio in modo che l’allarme di incendio coincida con l’inizio della procedura di esodo (o che comunque tale procedura inizi molto prima della fase di flash-over).

Inoltre l’allarme di incendio dovrebbe coincidere con l’inizio delle procedure di intervento antincendio, infatti è di fondamentale importanza che queste inizino nella primissima parte della fase di ignizione e comunque molto prima della fase di flash-over dell’incendio al fine di contenere i danni dell’incendio qualora non si riuscisse ad estinguerlo nella fase di ignizione.

In relazione a queste considerazioni è possibile constatare che la curva di incendio che esprime la variazione della temperatura in funzione del tempo, è molto più bassa nel caso in cui durante l’incendio intervengano impianti di protezione attiva rispetto al caso in cui tali impianti non siano previsti o non intervengano correttamente [51].

L’allegato 4 precisa le procedure di allarme e le modalità tecniche di invio dei segnali di allarme che possono essere sia di tipo acustico sia di tipo luminoso.

Le tipologie dei luoghi di lavoro e le loro dimensioni definiscono le tipologie delle fasi di evacuazione e le tipologie di allarme e quindi le tipologie tecnologiche dei sistemi di allarme.

L'allegato 5 regola le attrezzature e gli impianti di estinzione degli incendi.

Inoltre l'allegato 5 classifica gli incendi come [52], [53]:

- INCENDI I CLASSE A
- INCENDI DI CLASSE B
- INCENDI DI CLASSE C
- INCENDI DI CLASSE D

Gli **incendi di classe A** sono gli incendi dei materiali solidi che determinano la formazione di braci e per tali incendi gli agenti estinguenti più utilizzati sono l'acqua e la schiuma.

Gli **incendi di classe B** sono gli incendi delle sostanze liquide e dei solidi liquefacibili come ad esempio le vernici, le paraffine e il petrolio e per tali incendi gli agenti estinguenti più utilizzati sono le schiume, le polveri e l'anidride carbonica.

Fra questi tre agenti estinguenti, le schiume, sono le più indicate per l'estinzione degli incendi di classe B.

Inoltre per gli incendi di classe B non deve essere impiegata acqua con getto pieno ma può essere impiegata acqua con getto frazionato o nebulizzato.

Gli **incendi di classe C** sono gli incendi dei gas, e per l'estinzione di tali incendi occorre intervenire interrompendo il flusso del gas.

Per questo tipo di incendio, nell'allegato 5, viene precisato che esiste il rischio di esplosione qualora l'incendio venisse estinto prima dell'interruzione del flusso di gas.

Per questi incendi si usano le polveri come agenti estinguenti mentre per il raffreddamento delle tubazioni e dei serbatoi del gas si può utilizzare acqua con getto frazionato o nebulizzato.

Gli **incendi di classe D** sono gli incendi di sostanze metalliche e per l'estinzione di tali incendi si usano **polveri estinguenti speciali** avvalendosi di personale specializzato per questo tipo di intervento.

Questi incendi sviluppano temperature molto alte e in questo risiede la difficoltà della loro estinzione.

Negli incendi di classe D di sostanze o materiali contenenti alluminio e magnesio si usa la polvere di cloruro di sodio come agente estinguente.

Per questi incendi non devono essere usati l'acqua, né la schiuma, né l'anidride carbonica come agenti estinguenti in quanto questi possono dare origine a reazioni che determinano la produzione di gas tossici o determinano esplosioni.

Inoltre l'allegato 5 menziona anche gli **incendi di impianti ed attrezzature elettriche sotto tensione** per i quali gli agenti estinguenti utilizzati sono le polveri dielettriche³⁹ e l'anidride carbonica.

Per l'estinzione di questo tipo di incendio non devono essere usati l'acqua e le schiume [54].

L'allegato 5 regola la scelta e l'utilizzo degli estintori portatili e carrellati ed inoltre precisa che a seguito della procedura di " **valutazione del rischio**, ed **in particolare, in presenza di particolari rischi di incendio che non possono**

³⁹ I materiali dielettrici (o sostanze dielettriche) sono quei materiali considerati cattivi conduttori di elettricità.

essere rimossi o ridotti, in aggiunta agli estintori occorre prevedere impianti di spegnimento fissi, manuali o automatici”.

“Tuttavia in ogni caso occorre prevedere l’installazione di estintori portatili per consentire al personale di estinguere i principi di incendio”.

6 L'Analisi di Rischio come tecnica per progettare la galleria stradale dal punto di vista della sicurezza (Progettazione della sicurezza di una galleria e Analisi di Rischio)

6.1.1 Cenni storici

L'analisi di rischio, come metodo di valutazione del rischio ha avuto le sue prime applicazioni nella progettazione della sicurezza degli impianti chimici e nucleari, che per le sostanze trattate e per le dimensioni degli stessi impianti lasciavano prevedere scenari disastrosi in caso di incidenti.

Il primo approccio all'analisi di rischio è stato di tipo deterministico per cui il verificarsi di un evento è conseguenza di condizioni antecedenti.

La teoria dell'approccio deterministico prevede la certezza dei risultati e la veridicità degli scenari degli eventi e si fonda sugli eventi occorsi nel passato.

Il passo successivo dell'analisi di rischio è stato il passaggio all'analisi di rischio probabilistica comunemente identificata con l'acronimo PRA⁴⁰.

Questo diverso approccio rispecchia il passaggio graduale, nel corso degli anni da una progettazione della sicurezza delle gallerie stradali di tipo deterministico/prescrittivo a una progettazione di tipo probabilistico/prestazionale⁴¹, passaggio peraltro, auspicato dalla stessa Direttiva Europea 2004/54/CE.

6.1.2 Considerazioni e definizioni

Poiché la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali deve rispettare le prescrizioni del Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006 n.264⁴² di recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE, il metodo di progettazione della

⁴⁰ PRA: Probabilistic Risk Analysis.

⁴¹ Prestazioni delle barriere di sicurezza in termini di affidabilità, efficienza e disponibilità

⁴² Che da ora in poi per brevità indicheremo semplicemente come decreto n.264

sicurezza delle gallerie stradali, utilizza un approccio olistico, o anche detto approccio di sistema, allo studio della sicurezza del “Sistema Galleria”.

Infatti il comma 2 dell’articolo 13 del Decreto n.264 prescrive che l’analisi di rischio relativa a una galleria tenga conto di tutte le caratteristiche progettuali e delle condizioni di traffico.

In altri termini l’analisi di rischio deve considerare l’infrastruttura galleria (compresi l’ambiente circostante e l’infrastruttura di sicurezza), l’esercizio della galleria (ad esempio del flusso di traffico, limitazioni di velocità, possibilità di sorpasso, distanze di sicurezza, sensi alternati, semafori e cadenza del flusso di traffico, lunghezze di transizione⁴³, ecc), gli utenti (comportamenti e fattori umani) e i veicoli (volume di traffico, composizione del traffico, densità di flusso); cioè deve considerare il “sistema galleria”.

Dunque l’analisi di rischio rappresenta uno strumento analitico per la progettazione della sicurezza di una galleria il cui scopo è la valutazione del rischio connesso al “sistema galleria” rispetto alle conseguenze che un evento incidentale (o evento di incendio) determina sulla popolazione, sull’ambiente, sulla struttura e sull’economia.

La valutazione del rischio permette la quantificazione del rischio e quindi la determinazione del livello di rischio connesso al sistema galleria in relazione al verificarsi di un evento pericoloso.

Alla quantificazione del rischio del sistema galleria si arriva realizzando **modelli di rischio** basati sulle conoscenze scientifiche di fenomeni (risolvibili analiticamente e numericamente) che sono in relazione con eventi incidentali.

⁴³ Breve tratto stradale dove l’utente adegua la velocità in relazione a esigenze geometriche e funzionali, come ad esempio può essere una corsia laterale di immissione in galleria.

Dunque la valutazione del rischio, che consegue dall'analisi di rischio, permette di capire se l'**obiettivo di sicurezza** (garantire un livello minimo di un sistema galleria), previsto dalla Direttiva Europea e dal decreto n.264 per il sistema galleria viene o non viene conseguito.

La misurazione quantitativa del rischio avviene tramite l'indice di rischio che è appunto un indicatore quantitativo di rischio, funzione della probabilità di accadimento di un evento incidentale (o di incendio) e dell'entità delle conseguenze che tale evento determina.

In particolare i fattori che influenzano maggiormente il livello di sicurezza di una galleria stradale sono il volume di traffico⁴⁴ e la qualità delle attrezzature e delle apparecchiature che costituiscono l'infrastruttura di sicurezza, (in quanto deve essere garantita la loro affidabilità e disponibilità nelle situazioni di emergenza).

Il **rischio** è definito come il legame analitico tra la probabilità di accadimento di un evento e l'entità delle conseguenze da esso derivanti.

Una conseguenza è invece definita come la risultanza dell'accadimento di un evento pericoloso sulla popolazione, sull'ambiente, sulla struttura e sull'economia esposti a tale pericolo.

Le conseguenze possono essere misurate con il numero di vittime o feriti, in costi dovuti ai danni al sistema galleria e all'ambiente.

⁴⁴ Il glossario dell'allegato 2 del Decreto n.264 definisce il **VOLUME DI TRAFFICO** come la media annua del traffico giornaliero per corsia di una galleria.

$R = P \cdot C$	R = RISCHIO
	P = PROBABILITA' CHE SI VERIFICHI UN DATO EVENTO
	C = CONSEGUENZE

Tabella 12: Definizione di rischio

Il rischio può essere distinto:

- RISCHIO SOCIALE
- RISCHIO INDIVIDUALE

- Il **rischio sociale** può essere descritto⁴⁵ con le cosiddette **curve cumulate F(X) - N** che rappresentano la relazione fra la frequenza annua F (o probabilità) di accadimento di un evento incidentale ed il danno da esso derivante in termini di perdita di vite umane⁴⁶ (N= numero di morti= fatalities in scala logaritmica).

Questo tipo di rappresentazione può essere fatta in relazione a qualsiasi tipo di rischio.

Ad esempio relativamente al rischio connesso con il trasporto delle merci pericolose di cui si è detto nel capitolo 2 , nella figura seguente vengono rappresentati i risultati di test di laboratorio inerenti al rischio di ammoniaca e di cloro in galleria attraverso un foro (di rottura) di 50 mm.

Dal grafico si evince come, a parità di frequenza, l'evento di rilascio di cloro sia molto più rischioso rispetto al rilascio di ammoniaca;

⁴⁵ Per descrizione di un rischio si intende la sua rappresentazione mediante Indicatori cioè mediante la frequenza o probabilità di un certo evento incidentale in funzione delle conseguenze in termini di danno atteso da tale evento.

⁴⁶ O anche in termini di numero di persone ferite

dal grafico si vede infatti che il numero dei morti attesi nel caso del rilascio di cloro⁴⁷ può superare di un ordine di grandezza quello atteso per il rilascio di ammoniaca.

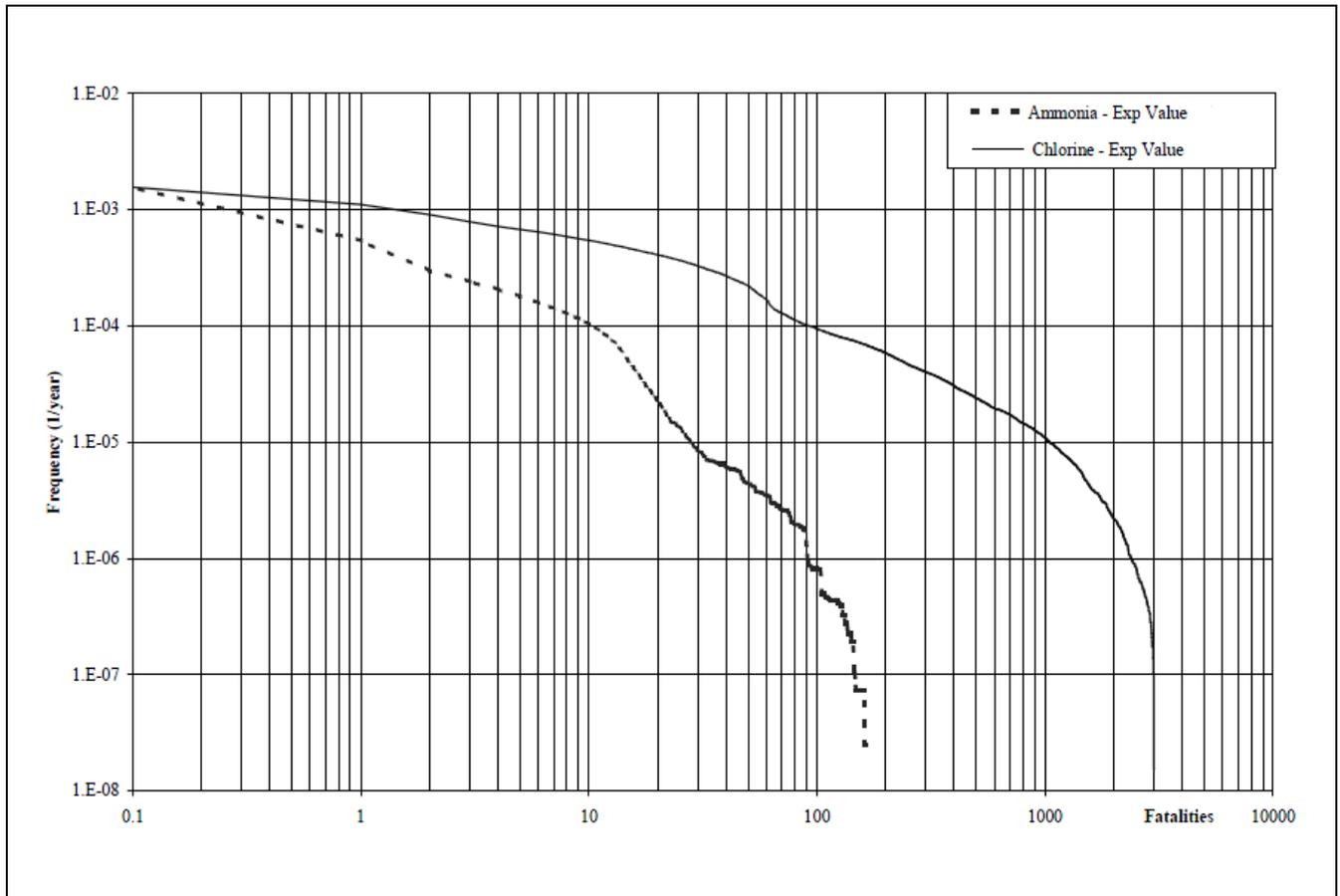


Figura 14: Rappresentazione del rischio connesso al rilascio di cloro e di ammoniaca [OECD 2001]

- A differenza del rischio sociale, il **rischio individuale** riguarda la popolazione ristretta di un luogo in cui potrebbe capitare un determinato evento incidentale.

Il rischio individuale può essere espresso sia attraverso la frequenza o probabilità annua di un certo evento, o attraverso la frequenza media in un certo intervallo di anni con cui due eventi incidentali si presentano

⁴⁷ Il trasporto di cloro non è consentito in molti in molte nazioni, e dove è consentito lo è per solo per piccole quantità.

con certe conseguenze in termini di perdita di vite umane o in termini di danni alle persone (feriti).

Il rischio individuale può essere rappresentato graficamente nello spazio in cui un certo evento incidentale può accadere attraverso delle mappe bidimensionali, e un esempio di mappa di rischio bidimensionale inerente al trasporto di merci pericolose viene riportato nella figura seguente.

In tale mappa, i diversi colori rappresentano le zone interessate da un certo evento, dove la stima della frequenza (o probabilità) dell'entità del danno in termini di perdita di vite umane⁴⁸ è compreso in un certo intervallo numerico.

Le mappe di rischio possono anche essere utilizzate, oltre che per la rappresentazione del rischio individuale, anche per la rappresentazione del rischio ambientale e del rischio socio economico, e cioè questa rappresentazione (inerente ad un metodo quantitativo probabilistico della quantificazione del danno⁴⁹) del rischio, può essere anche essere usato per la stima dei danni materiali, economici, ed ambientali.

⁴⁸ O in termini di feriti

⁴⁹ E quindi del rischio

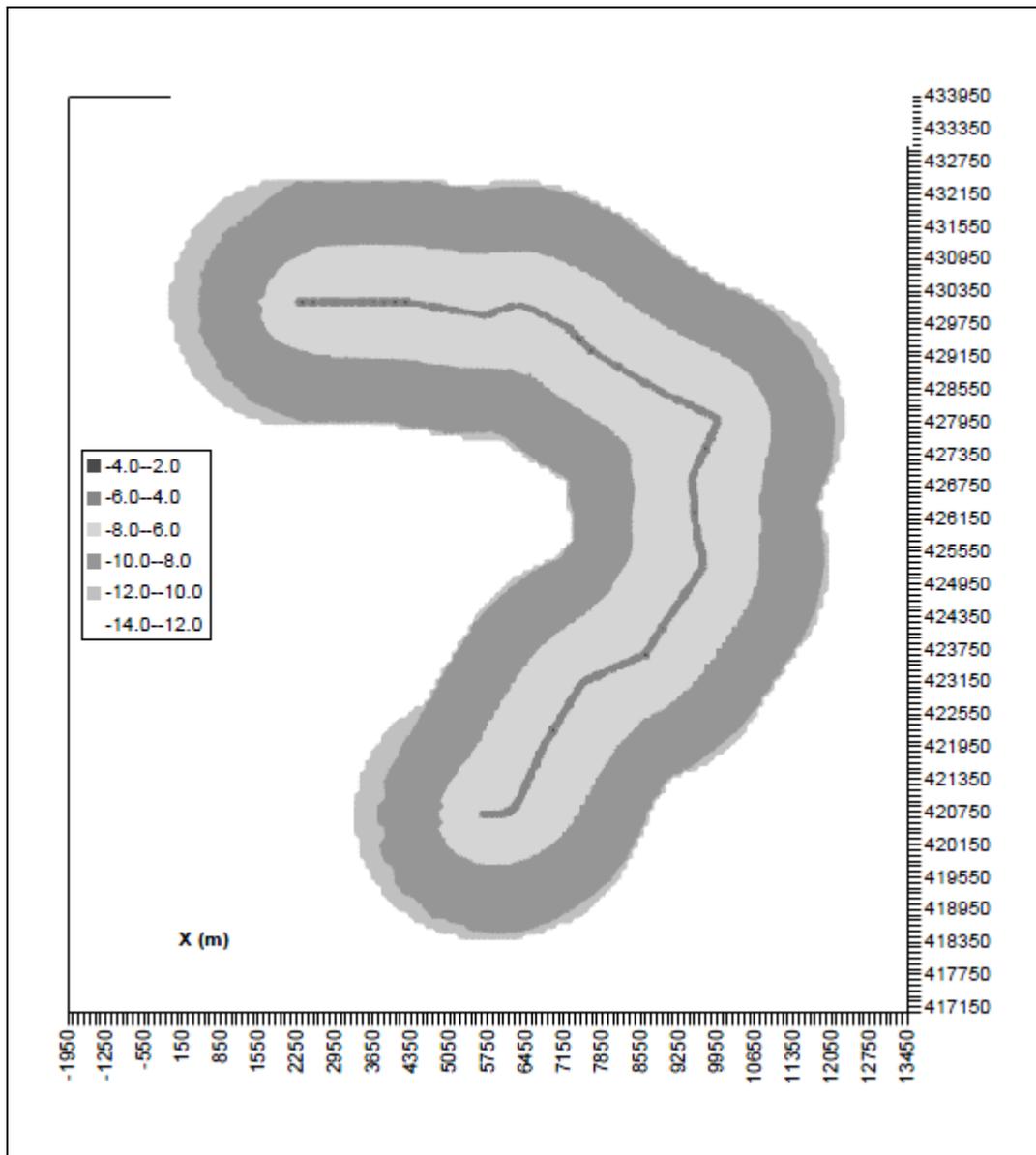


Figura 15: Esempio di mappa di rischio individuale connesso con il trasporto di merci pericolose [OECD 2001]

Nel caso della progettazione della sicurezza delle gallerie stradali si considera il rischio sociale.

Partendo dal presupposto che non esiste un “sistema galleria” del tutto sicuro e cioè che è impossibile azzerare il rischio proprio perché il concetto di sicurezza di tale sistema scaturisce dalla combinazione di fattori di tipo

ingegneristico, di tipo tecnologico e di fattori umani occorre affiancare alla definizione di rischio anche il concetto (cultura) della **accettazione del rischio**.

L'accettazione del rischio quindi implica l'esistenza e la considerazione di diversi livelli di rischio dunque deve essere possibile valutare e quantificare il rischio per poter poi gestire il rischio stesso, cioè adottare le misure strutturali, gestionali (esercizio del sistema galleria) e tecnologiche (infrastruttura di sicurezza) e di emergenza finalizzate a contenere il pericolo che un evento accada o le conseguenze di un evento nel caso questo evento accadesse.

6.1.3 Progettazione della sicurezza secondo i dettami della direttiva Europea 2004/54/CE, del Decreto.264 e delle Linee Guida ANAS per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali

Il metodo per la progettazione della sicurezza illustrato dalle linee guida ANAS è congruente con il conseguimento degli obiettivi della Direttiva Europea.

Mediante la progettazione della sicurezza di una galleria stradale, secondo le linee guida, si vuole arrivare a:

1. QUANTIFICARE LA SICUREZZA
2. CARATTERIZZARE PRESTAZIONALMENTE⁵⁰ LE BARRIERE DI SICUREZZA (in termini di affidabilità ed efficienza)
3. DEFINIRE GLI SCENARI DI ESODO POSSIBILI PER LA POPOLAZIONE ESPOSTA AL FLUSSO DI PERICOLO CONSEGUENTE ALL'ACCADIMENTO DI

⁵⁰ La progettazione della sicurezza di una galleria secondo i dettami della Direttiva Europea, combina la progettazione prestazionale (cioè tesa all'adeguatezza delle misure di sicurezza adottate) delle gallerie con la progettazione che si avvale dell'analisi di rischio, (probabilistica e deterministica).

UN EVENTO INCIDENTALE CRITICO CONDIZIONATO NELL'INTENSITA ' E NELLO SVILUPPO, DALL'AZIONE PREVENTIVA E PROTETTIVA DELLE BARRIERE DI SICUREZZA

Inoltre si vuole integrare le varie metodologie di progettazione della sicurezza esistenti in una procedura completa e coerente.

I metodi di valutazione del rischio (e quindi anche i metodi di analisi di rischio) che vengono utilizzati sono di tipo probabilistico e di tipo deterministico.

Invece il metodo **deterministico** considera una serie di eventi pericolosi più importanti e considera la misura (stima) della probabilità che un dato scenario possa accadere.

Tale metodo valuta poi le conseguenze dell'evento (ad esempio in termini di misura dei danni alla struttura galleria o all'infrastruttura di sicurezza in termini di numero di vittime o di feriti).

Nel metodo deterministico, che si avvale dell'utilizzo di appositi indici o indicatori o frequenze di accadimento di evento, l'analisi di rischio viene fatta in relazione a ciascuno scenario derivante da ciascun evento considerato.

Poiché il metodo deterministico ha un approccio più selettivo nella valutazione del rischio, risulta più indicato per lo studio di aspetti della sicurezza ritenuti più significativi ed è particolarmente utile per la progettazione degli interventi di emergenza.

Come già anticipato il metodo **probabilistico** considera il "sistema galleria", quindi ha un approccio globale al problema della valutazione del rischio permettendo di considerare tutti gli aspetti della valutazione del rischio.

Quando nelle linee guida della normativa si parla di **livello di analisi di rischio** (da non confondere con il livello di rischio del sistema galleria) si vuole intendere che per l'analisi di rischio, in Italia, si usa l'approccio Bayesiano Classico con Analisi delle Incertezze⁵¹.

Questo perché le scelte dei livelli di analisi di rischio cambiano a seconda dei campi di applicazione e degli aspetti particolari che di ciascun campo si vogliono studiare più in dettaglio (ad es è diverso nel campo delle gallerie ferroviarie) e a seconda degli stati dell'Europa e del Mondo.

Dunque i metodi di valutazione del rischio e i criteri di accettazione del rischio (dottrina dell'accettazione del rischi⁵²) sono tutt'altro che omogenei nel mondo e in Europa.

In particolare sia i criteri di accettazione del rischio sia i livelli di valutazione del rischio, si basano su studi del rischio di tipo quantitativo e probabilistico e su studi di tipo qualitativo e deterministico.

È importante precisare che la direttiva europea non prescrive nulla rispetto al livello di analisi di rischio da adottare per il sistema galleria, quindi la scelta della metodologia della analisi di rischio da adottare spetta alle autorità legislative dei singoli Stati membri.

La Direttiva Europea si limita ad auspicare che si giunga all'identificazione di un livello di analisi di rischio unico e condiviso da tutti gli Stati membri.

A livello italiano questo vuoto legislativo è stato colmato dal Decreto n.264 di recepimento della Direttiva europea che definisce una metodologia di analisi di rischio per la determinazione del livello di rischi per le gallerie stradali italiane e che è anche descritto dal metodo di progettazione della sicurezza secondo i dettami delle Linee Guida ANAS.

⁵¹ Come viene precisato nel paragrafo 1.1.1 delle linee guida ANAS.

⁵² La **dottrina o criterio dell'accettazione del rischio** e i livelli di analisi di rischio vengo studiati da organizzazioni e gruppi di studiosi su scala mondiale.

Alla valutazione qualitativa del rischio si giunge con la definizione di livelli soglia derivanti dalla dottrina dell'accettazione del rischio, mentre alla valutazione quantitativa del rischio si giunge mediante misurazioni del rischio (sociale o individuale) rappresentate graficamente o analiticamente mediante indici di rischio⁵³.

I modelli di rischio consentono la realizzazione di diagrammi di indici di rischio e tali diagrammi definiscono le aree di accettabilità del rischio.

Il confronto del livello di rischio scaturito dall'analisi di rischio del sistema galleria in esame con i diagrammi dei modelli di rischio (della direttiva) permette di stabilire se il livello di rischio del sistema galleria in studio è o non è accettabile, e cioè permette di stabilire se gli obiettivi di sicurezza sono stati raggiunti.

L'aspetto prescrittivo della Direttiva Europea, e cioè la "prevenzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria", (come si legge nell'obiettivo di sicurezza all'articolo 1 della Direttiva stessa) viene considerato nel metodo di progettazione delle linee guida attraverso la fase di **analisi di vulnerabilità del sistema galleria** che viene anche detta fase di **identificazione dei pericoli** prevista dal metodo stesso.

Al fine di riassumere parte dei concetti fin qui descritti, essi vengono schematizzati nel seguente diagramma di flusso che riporta le fasi del metodo di progettazione della sicurezza secondo le linee guida:

⁵³ Indice di rischio: Indicatore quantitativo di rischio espresso in funzione della probabilità di accadimento di un evento incidentale e dell'entità delle conseguenze da esso derivanti.

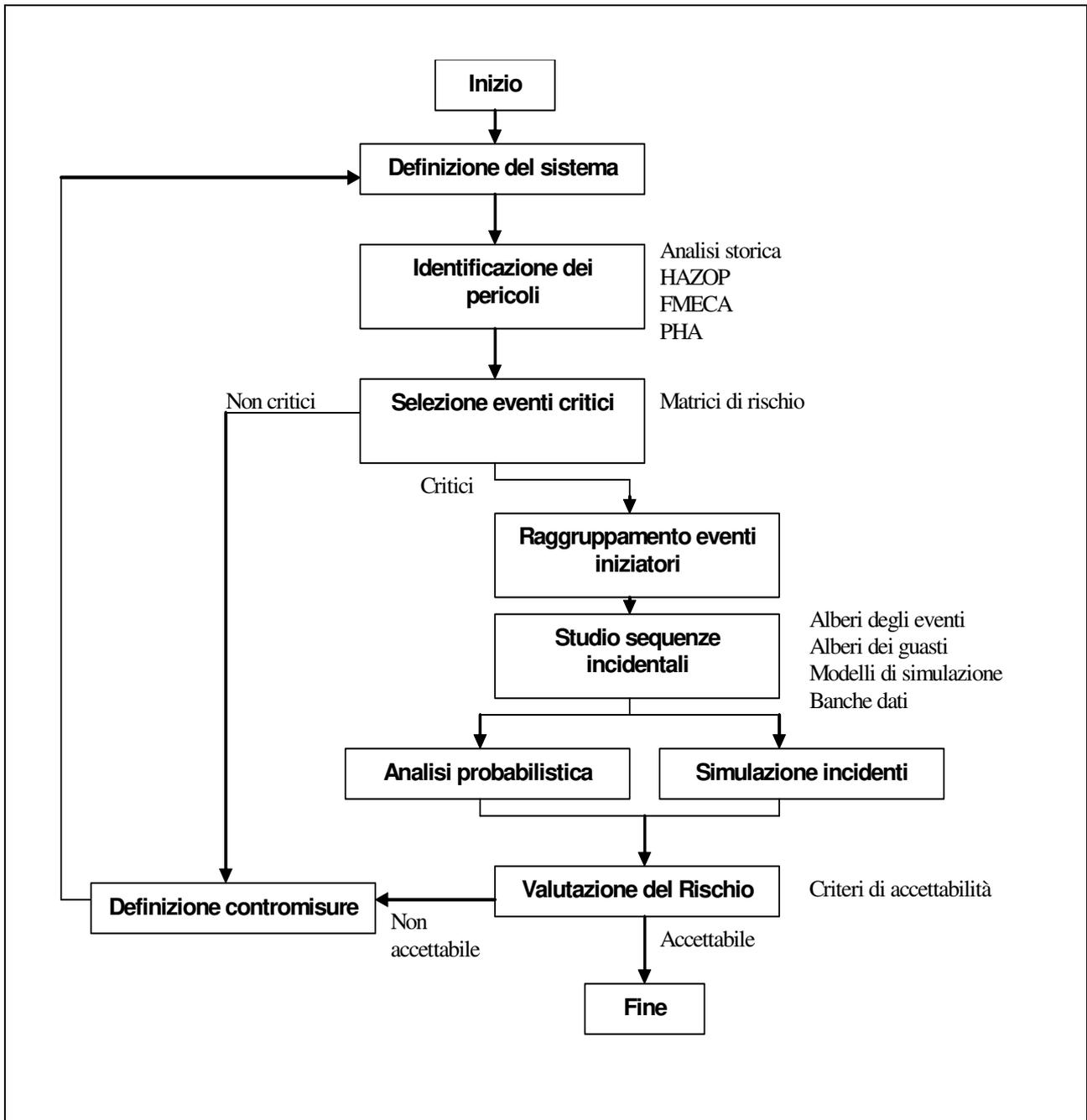


Figura 16: Fasi della progettazione della sicurezza del sistema galleria stradale [55]

Il livello di analisi di rischio del metodo di progettazione della sicurezza secondo le linee guida utilizza le seguenti tecniche:

Tecniche probabilistiche di identificazione e caratterizzazione degli eventi incidentali rilevanti pertinenti al sistema galleria (funzioni di distribuzione e 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 costituiscono o 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 di pericolo nel sistema galleria, determinato da fenomeni termici e fluidodinamici indotti da specifici eventi incidentali. Tali modelli hanno lo scopo 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 FLUIDODINAMICI SEMPLIFICATI, modelli fluidodinamici realizzati e risolti usando il metodo della Fluidodinamica Computazionale).
Tecniche statistiche di soluzione di dei modelli di esodo degli utenti del sistema galleria in condizioni di emergenza (Tecniche o metodo Monte Carlo).
Tecniche analitiche e grafiche di rappresentazione del rischio connesso a una galleria stradale (curve cumulate complementari).
Criteri di valutazione del rischio congruenti con dottrine di accettabilità del rischio note.

Tabella 13

Il metodo di progettazione della sicurezza secondo le linee guida permette di raggiungere i seguenti **risultati**:

<p>VERIFICARE L'ACCETTABILITA' DEL LIVELLO DI RISCHIO proprio del sistema galleria quando essa si realizzata soddisfacendo i requisiti minimi di sicurezza fissati dalla Direttiva Europea, avendo assunto che le misure di sicurezza strutturali e i sistemi di sicurezza che realizzano le misure di sicurezza impiantistiche siano progettati in conformità ai dettami della buona pratica e realizzati a regola d'arte.</p>
<p>INDIVIDUARE MISURE DI SICUREZZA ALTERNATIVE⁵⁴ (contromisure) ED INEGRATIVE al gruppo di requisiti minimi di sicurezza fissati dalla direttiva per un determinato sistema galleria, in funzione dei suoi parametri di sicurezza, nel caso in cui tali parametri assumano valori tali da determinare un livello di rischio non accettabile, ovvero quando sussista un reale impedimento all'adozione di determinate misure di sicurezza causato dall'impossibilità tecnica di realizzarle oppure causato dai costi sproporzionati per realizzarle.</p>
<p>DIMOSTRARE L'EQUIVALENZA DEL LIVELLO DI RISCHIO OVVERO LA RIDUZIONE DEL LIVELLO DI RISCHIO conseguito attraverso l'adozione di misure di sicurezza alternative ed integrative, RISPETTO AL LIVELLO DI RISCHIO ASSICURATO DAL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI MINIMI DI SICUREZZA PRESCRITTI DALLA DIRETTIVA EUROPEA.</p>

Tabella 14: Risultati della progettazione della sicurezza

⁵⁴ Per considerare questo aspetto che è previsto all'articolo 3 (misure di sicurezza), comma 2, il metodo di progettazione della sicurezza secondo le linee guida, prevede di avvalersi della analisi di rischio.

6.1.4 Modelli di processo e sistema galleria

Il sistema galleria, nel metodo di progettazione secondo le linee guida e cioè la struttura galleria e l'infrastruttura di sicurezza⁵⁵, può essere assimilato a un sistema di processo sul quale si possono fare degli studi quantitativi.

Per tale sistema galleria è quindi possibile definire le **variabili di stato** (o **variabili di processo**) che sono:

- MASSA DEI VEICOLI IN TRANSITO
- ENERGIA TOTALE DEI VEICOLI E DELLE MERCI TRASPORTATE

L'energia totale dei veicoli e delle merci trasportate è data dalla somma delle seguenti forme di energia:

ENERGIA POTENZIALE ASSOCIATA ALLA MASSA DEI VEICOLI E DELLE MERCI
ENERGIA CINETICA ASSOCIATA ALLA MASSA E ALLA VELOCITA' DEI VEICOLI CON LE MERCI
ENERGIA INTERNA ASSOCIATA ALLE CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DEI VEICOLI E DLLE MERCI

Tabella 15: Energia dei veicoli e delle merci trasportate

I sistemi di processo, o **modelli di processo**, possono essere di tipo **termodinamico e di tipo fluidodinamico**⁵⁶, che permettono la realizzazione di

⁵⁵ Sistemi e apparecchiature tecnologiche preposte a realizzare le misure di prevenzione in condizioni di esercizio e le misure di protezione in caso (condizioni) di incidente.

⁵⁶ Il sistema galleria infatti costituisce un sistema termodinamico o fluidodinamico aperto che può essere descritto o "modellizzato" secondo i principi della termodinamica e della fluidodinamica; infatti la struttura galleria può essere assimilata al **volume di controllo** del sistema di processo,

metodi di progettazione della sicurezza prestazionali quale è quello che stiamo descrivendo secondo i dettami delle linee guida.

Nel metodo di progettazione della sicurezza del sistema galleria, secondo i dettami delle linee guida, è possibile identificare i seguenti **eventi incidentali critici**⁵⁷:

- COLLISIONI SEGUITE DA INCEDIO DEI VEICOLI COINVOLTI
- INCENDI DEI VEICOLI
- RILASCI IN FASE LIQUIDA (SVERSAMENTI) DI SOSTANZE INFIAMMABILI DAI VEICOLI
- RILASCI IN FASE GASSOSA DI SOSTANZE TOSSICHE, NOCIVE, INFIAMMABILI, DAI VEICOLI
- ESPLOSIONI

Avendo assimilato il sistema galleria ad un sistema di processo è possibile definire la traiettoria del sistema galleria come la successione degli stati assunti dal sistema galleria (sistema di processo) in funzione del tempo.

Una traiettoria del sistema galleria, si dice **di successo** se è realizzata in condizioni di esercizio⁵⁸.

Si può anche parlare di **scenario di successo**, che è una traiettoria di successo, per indicare la successione del sistema galleria nello spazio degli

termodinamico o fluidodinamico, entro cui avviene il trasporto di massa e lo scambio energetico derivante dai veicoli in transito. Sulla superficie che racchiude il volume di controllo e che lo separa dall'ambiente esterno, c'è un numero finito di porte attraverso cui avviene lo scambio di massa e di energia con lo stesso ambiente esterno.

⁵⁷ Eventi che determinano gravi conseguenze

⁵⁸ Con maggiore precisione, si definiscono **condizioni di normale esercizio**, quelle condizioni corrispondenti alla preservazione del traffico in assenza di eventi incidentali.

stati del sistema galleria (sistema di processo) stesso in condizioni di normale esercizio.

Un insieme di traiettorie del sistema galleria, si dicono **di emergenza** se realizzate i condizioni di incidente.

Dunque con questa nomenclatura è possibile caratterizzare il sistema galleria in termini di traiettorie di successo e/o di emergenza.

Inoltre,relativamente al sistema galleria, si parla di **flusso di (del) traffico** se il flusso dei veicoli, avviene in condizioni di esercizio, mentre si parla di **flusso di (del) pericolo** se il flusso dei veicoli avviene in condizioni di emergenza (evento incidentale).

Il flusso di (del) pericolo, deriva dal processo di scambio di massa e di energia dovuti all'accadimento di un evento incidentale e tali scambi sono condizionati dalla variazione delle prestazioni dei sistemi di sicurezza⁵⁹.

Il flusso di pericolo determina l'ambiente all'interno del sistema galleria.

Il flusso di (del) pericolo e la distribuzione dei veicoli all'interno del sistema galleria dovuti all'accadimento di specifici eventi incidentali critici permettono di definire gli **scenari di esodo possibili per la popolazione esposta (utenti e addetti al soccorso).**

Gli **stati di fine emergenza** derivano dagli scenari di esodo possibili e determinano le conseguenze sulle **componenti sensibili del sistema galleria** (che sono: la popolazione esposta, la struttura galleria, l'infrastruttura di sicurezza e l'ambiente circostante).

⁵⁹ In quanto il sistema galleria è condizionato dai sistemi di sicurezza (infrastruttura di sicurezza).

Il danno è definito come il vettore delle conseguenze sulle componenti sensibili del sistema galleria.

Per visualizzare i concetti fin qui esposti di seguito si riporta sistema galleria assimilato a un sistema di processo termodinamico con un flusso di traffico e con una traiettoria di successo del sistema.

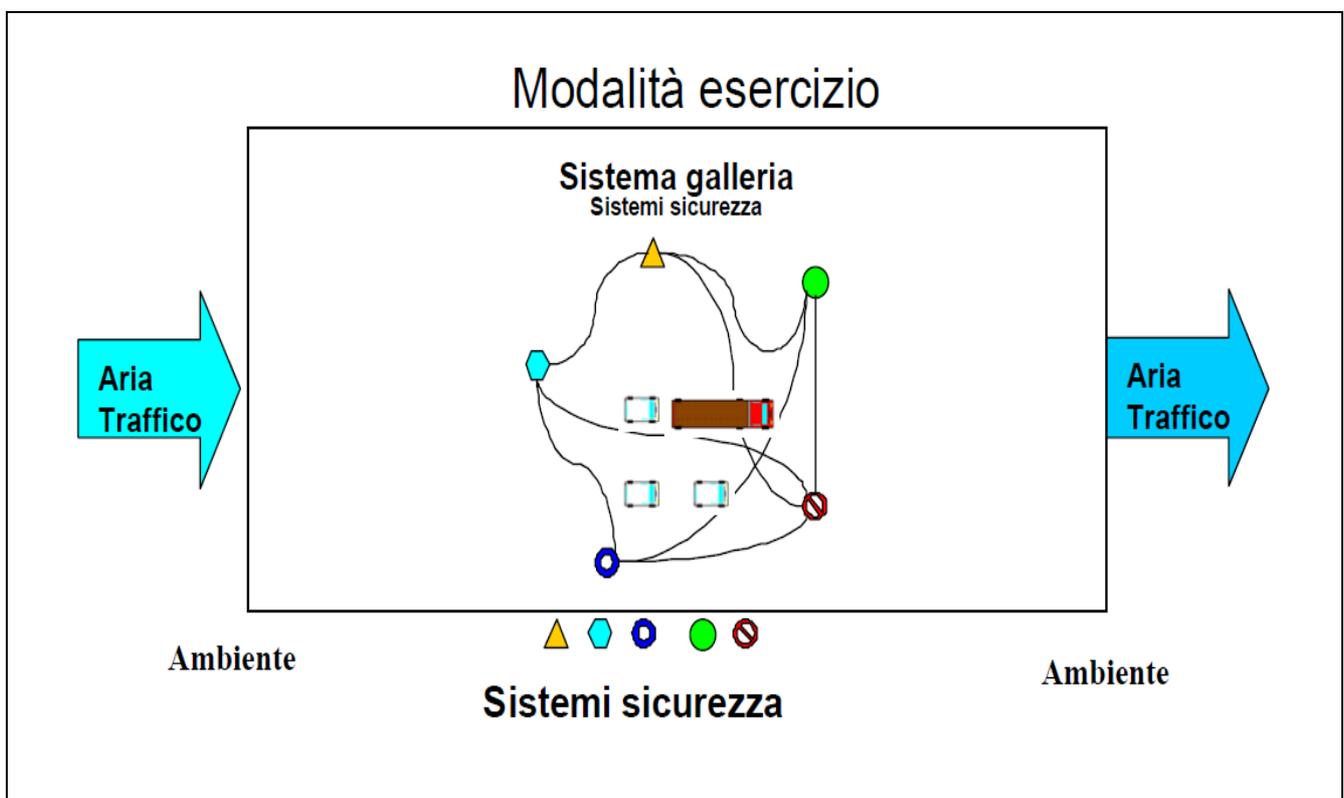


Figura 17: Modello termodinamico con flusso di traffico e traiettoria (o scenario) di successo [56]

Di seguito invece si riporta lo schema (Modello) di un sistema galleria assimilato a un sistema di processo termodinamico con flusso di pericolo e con traiettoria di emergenza.

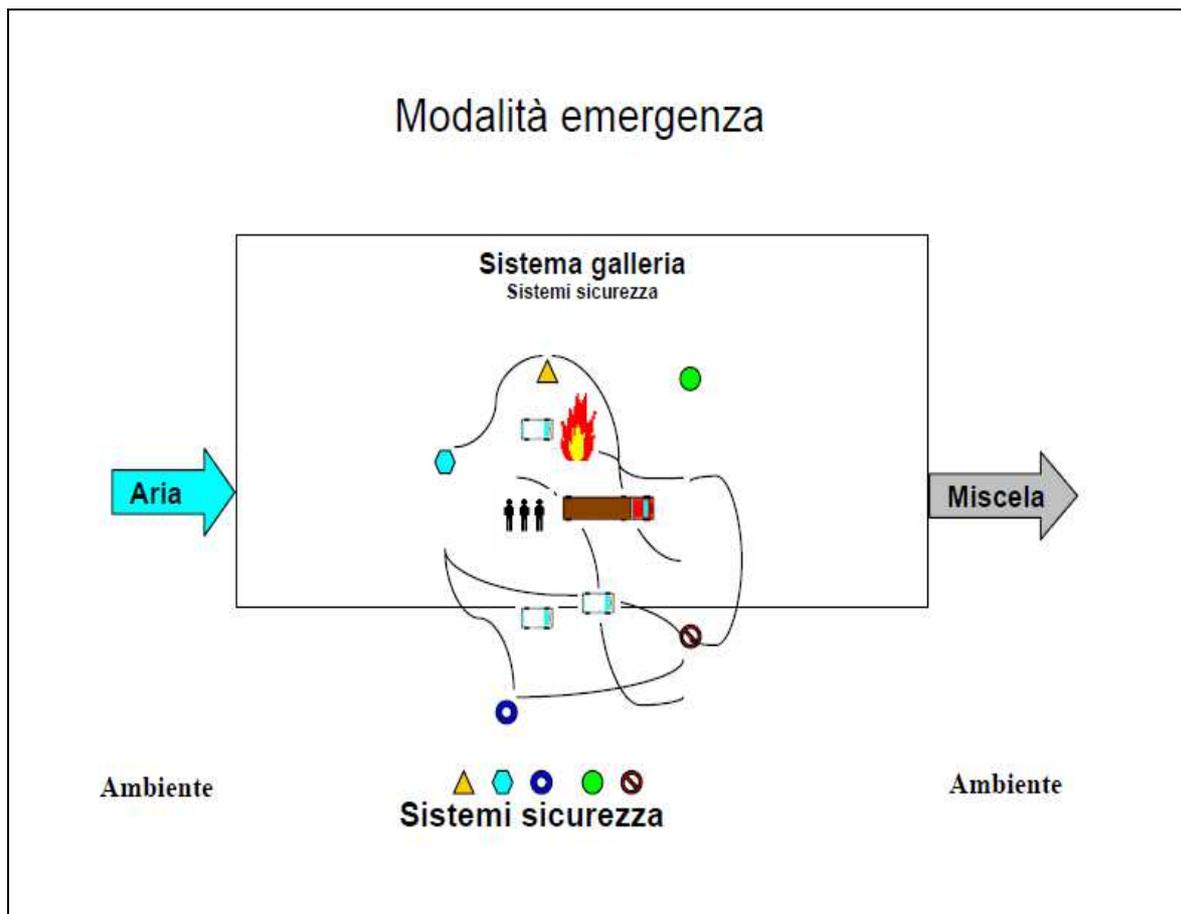


Figura 18: Modello termodinamico con flusso di pericolo e traiettoria (o scenario) di emergenza [57]

Il fatto di rappresentare una successione di stati del sistema galleria con una traiettoria degli stati e quindi con una traiettoria di un scenario (di successo o di emergenza), descrivendo quindi l'evoluzione degli stati della sistema galleria con un numero discreto (successione) di stati (tratti), consente di assumere misure di sicurezza preventive⁶⁰ che vincolino il sistema galleria su una traiettoria (o scenario) di successo.

In altri termini, la discretizzazione del sistema galleria, e cioè la modellizzazione del sistema galleria attraverso un sistema di processo (fluidodinamico o termodinamico) permette di individuare le deviazioni dalla traiettoria di successo, cioè permette di individuare le traiettorie di emergenza (o traiettorie degli scenari di emergenza).

⁶⁰ Di un evento incidentale

Le traiettorie di emergenza, cioè le traiettorie degli scenari di emergenza e quindi gli scenari di emergenza (più comunemente detti), saranno evitati, assumendo le misure di sicurezza di prevenzione del pericolo di accadimento di un evento incidentale.

6.1.5 Il modello fluidodinamico del sistema galleria

In particolare, il **modello fluidodinamico del sistema galleria**, permette di studiare gli **scambi di massa** del sistema stesso con l'ambiente esterno.

Questo tipo di modellizzazione permette di conseguire i risultati elencati nella seguente tabella:

ANALIZZARE IL FLUSSO DI TRAFFICO e quindi di studiare le condizioni per cui si verificano variazioni da un flusso di traffico scorrevole ad un flusso di traffico anomalo
MODELLIZZARE IL FLUSSO (O CORRENTE D'ARIA O VENTILAZIONE) DETERMINATO DAL MOTO (FLUSSO) DEI VEICOLI, OVVERO DALL'IMPIANTO DI VENTILAZIONE MECCANICA (se presente), OVVERO DALLE CONDIZIONI DI PRESSIONE VIGENTI IN CORRISPONDENZA DEI DUE PORTALI. I tipi di ventilazione ⁶¹ elencati provocano la dispersione dei gas di scarico dei veicoli all'interno del sistema galleria e in corrispondenza dei portali, che a sua volta dipende dalle condizioni e dalla composizione del traffico.
PROGETTARE SISTEMI DI GESTIONE E CONTROLLO DEL TRAFFICO
PROGETTARE SISTEMI DI CONTROLLO DELLA QUALITA' DELL'ARIA IN GALLERIA E DI DEPURAZIONE DELL'ARIA
PROGETTARE SISTEMINI DI SICUREZZA. Questi modelli infatti, possono essere utilizzati per lo studio del fenomeno del Back – Layering
PROGETTARE SISTEMI DI VENTILAZIONE MECCANICA A BASSO CONSUMO ENERGETICO (con un guadagno in termini di impatto ambientale).

Tabella 16: Risultati della modellizzazione fluidodinamica

⁶¹ Tali tipi di ventilazione sono anche influenzati dalle condizioni metrologiche (ad esempio il vento), come è stato evidenziato a seguito della tragedia del Monte Bianco del 1999

6.1.6 Il modello termodinamico del sistema galleria

Il modello termodinamico del sistema galleria, permette di studiare gli scambi energetici del sistema stesso.

Questo tipo di modellizzazione permette di conseguire i risultati elencati nella seguente tabella:

ANALIZZARE E QUANTIFICARE LE COVERSIONI ENERGETICHE E GLI SCAMBI ENERGETICI NELLE ESPOLSIONI, permettendo una caratterizzazione energetica delle sorgenti esplosive, in funzione delle proprietà chimico fisiche e della quantità delle sostanze trasportate . Permette inoltre di analizzare gli scambi energetici nella forma di lavoro di compressione.
ANALIZZARE E QUANTIFICARE LE CONVERSIONI ENERGETICHE E GLI SCAMBI ENERGETICI NEGLI EVENTI DI INCENDIO E NEI RILASCI di sostanze (in fase liquida o gassosa) infiammabili.

Tabella 17: Risultati della modellizzazione termodinamica

6.1.7 Modello termodinamico e modello fluido dinamico

Sia il modello termodinamico che il modello fluidodinamico permettono, in condizioni di flusso di pericolo cioè in condizioni di incidente (e quindi con traiettorie o scenari di emergenza), di:

MODELLARE IL FENOMENO DI DISPERSIONE DI SOSTANZE TOSSICHE E NOCIVE
MODELLARE IL FLUSSO TURBOLENTO DELL'ARIA IN GALLERIA GENERATO DALLE ESPLOSIONI con lo scopo di analizzare le onde di compressione e di espansione
MODELLARE IL FLUSSO TURBOLENTO E REATTIVO DEI FUMI (MISCELA DI ARIA E PRODOTTI DI COMBUSTIONE) GENERATO DA EVENTI DI INCENDIO con lo scopo di studiare la propagazione degli incendi e la diffusione dei fumi in relazione al funzionamento dell'infrastruttura di sicurezza.
MODELLARE I FLUSSI TERMICI DOVUTI ALLA PROPAGAZIONE DI INCENDI O I FLUSSI DOVUTI A RILASCI IN RELAZIONE ALLE MISURE DI MITIGAZIONE E PROTEZIONE

Tabella 18

6.1.8 Pericolo⁶², evento incidentale, danno

I fattori che possono causare un evento incidentale sono:

1. Caratteristiche architettoniche, strutturali ed ambientali (geometria, ambiente interno e ambiente esterno).

⁶² Nel linguaggio tecnico, il pericolo (Hazard in inglese), si definisce come: “una sorgente di danno”, quindi il concetto di pericolo è legato alle “origini” di un potenziale danno (il danno, in termini di perdite di vite umane o feriti o costi socio-economici ed ambientali, quantifica le conseguenze di un evento incidentale pericoloso). Al contrario, il concetto di rischio è legato alle conseguenze, e quindi al danno, provocato da un evento incidentale pericoloso. In queste considerazioni risiede la spiegazione della definizione di rischio data nel paragrafo 6.1.2, per cui il rischio scaturisce dalla probabilità che si verifichi un evento incidentale e da una certa conseguenza (in termini di danno); in altri termini, il rischio è la probabilità di un certo danno.

Si pensi ad esempio al fatto che una galleria possa avere un raggio di curvatura più o meno elevato, o al fatto che la galleria sia unidirezionale o bidirezionale, o al fatto che abbia una forte pendenza longitudinale o trasversale, o al fatto che si trovi ad alta quota, ecc

2. Dinamica del traffico (flusso, occupazione, velocità).
3. Comportamento utenti, cioè **fattore umano** (modalità di guida, carico psico-fisico)
4. Caratteristiche dei veicoli (capacità dei veicoli, malfunzionamento delle componenti)

, tali fattori interagiscono fra di loro a due a due, e concorrono a causare un evento incidentale nel modo descritto dallo schema della figura 19.

I fattori elencati raggruppano i **parametri di sicurezza** indicati dalla Direttiva Europea, elencati nel precedente capitolo di questa tesi, per la progettazione della sicurezza.

In altri termini i parametri di sicurezza usati per la progettazione della sicurezza rappresentano anche i fattori a cui sono connessi i pericoli che causano l'evento incidentale nel sistema galleria.

Più in generale in un'analisi di rischio di un qualunque sistema (compreso ad esempio un dispositivo meccanico o elettronico) , di un processo o di un servizio, la fase di identificazione dei pericoli o analisi di vulnerabilità può essere attuata in diversi modi.

Tale analisi di identificazione dei pericoli può essere di tipo qualitativo e quindi prevedere:

- un'analisi storica che, attingendo a banche dati tecniche permette di evidenziare le modalità di guasto di un certo sistema, delle sue componenti o delle procedure operative o gestionali di un certo sistema o processo permettendo quindi di giungere alla identificazione di particolari eventi pericolosi.

Dunque l'analisi storica attinge agli eventi incidentali del passato per poter trarre delle conclusioni inerenti agli eventi incidentali che sono oggetto di studio e ciò avviene facendo delle analogie con gli eventi incidentali occorsi nel passato.

In altri termini l'analisi storica di un sistema può essere considerata come una analisi di rischio preliminare di tipo qualitativa (e non quantitativa), basata anche sull'esperienza di personale qualificato finalizzata ad indirizzare la progettazione del sistema verso condizioni di un maggior livello di sicurezza.

Questo modo di operare permette anche di capire quali possono essere le misure di sicurezza da adottare per il sistema galleria in studio.

Il punto debole della analisi storica è insito nelle scarsità, nella limitata accuratezza e nella frammentazione dei dati inerenti agli eventi incidentali del passato che è possibile reperire nelle banche dati, tuttavia costituisce un valido strumento per l'inizio di una analisi di sicurezza più accurata in quanto appunto consente un inquadramento generale e preliminare della progettazione della sicurezza.

Esistono altre modalità di analisi di identificazione dei pericoli che rispondono agli acronimi seguenti:

- **HAZOP** (hazard and operability analysis o **analisi dell'operabilità**).

Questa tecnica permette di effettuare una analisi di rischio preliminare e qualitativa avvalendosi di strumenti di analisi di rischio che vanno sotto il nome di matrici di rischio.

- **FMEA** (failure mode and effect analysis) o individuazione dei modi di guasto del sistema.
- **FMECA** (failure mode effect and criticality analysis) o individuazione dei modi di guasto e delle criticità del sistema.
- **PHA** (preliminary hazard analysis) o analisi preliminare di rischio. Questa tecnica di analisi di rischio permette di individuare gli aspetti più critici della sicurezza del sistema in esame e quindi di indirizzare in modo preliminare la progettazione della sicurezza.

Le **principali banche dati** o data base disponibili hanno i seguenti acronimi:

- **MARS** (major accident reporting system).
È una banca dati dell'Unione Europea.
Questa banca dati cataloga gli incidenti rilevanti (circa 800 al 2017) avvenuti nel passato a partire dal 1980 in impianti di stoccaggio, in case farmaceutiche ed in impianti di raffinazione.
Il contributo italiano a questa banca dati avviene tramite ISPRA (istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale) del Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare.
- **FACTS** (failure and accident technical information system).

Questa banca dati è stata realizzata dal dipartimento olandese della sicurezza industriale e cataloga incidenti industriali (circa 20000) occorsi in tutto il mondo.

- **MHIDAS** (major hazard incident data service).

Questa banca dati cataloga gli incidenti industriali occorsi in Italia, negli USA, nel Regno Unito, in Canada, in Francia, in India e in Germania.

- **ADB** (accident data base), che è una banca dati della Gran Bretagna.
- **IRIS** (incident reporting information system). È una banca dati che cataloga incidenti inerenti al trasporto di sostanze pericolose con rilasci e sversamenti.

Per quanto riguarda la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali, nelle banche dati elencate è possibile trovare informazioni su incidenti inerenti al trasporto di merci pericolose e quindi inerenti agli sversamenti di sostanze pericolose, agli incendi e alle esplosioni.

Queste informazioni devono essere considerate ricordando la caratteristica fondamentale della galleria è quella di essere un ambiente confinato con sviluppo unidimensionale.

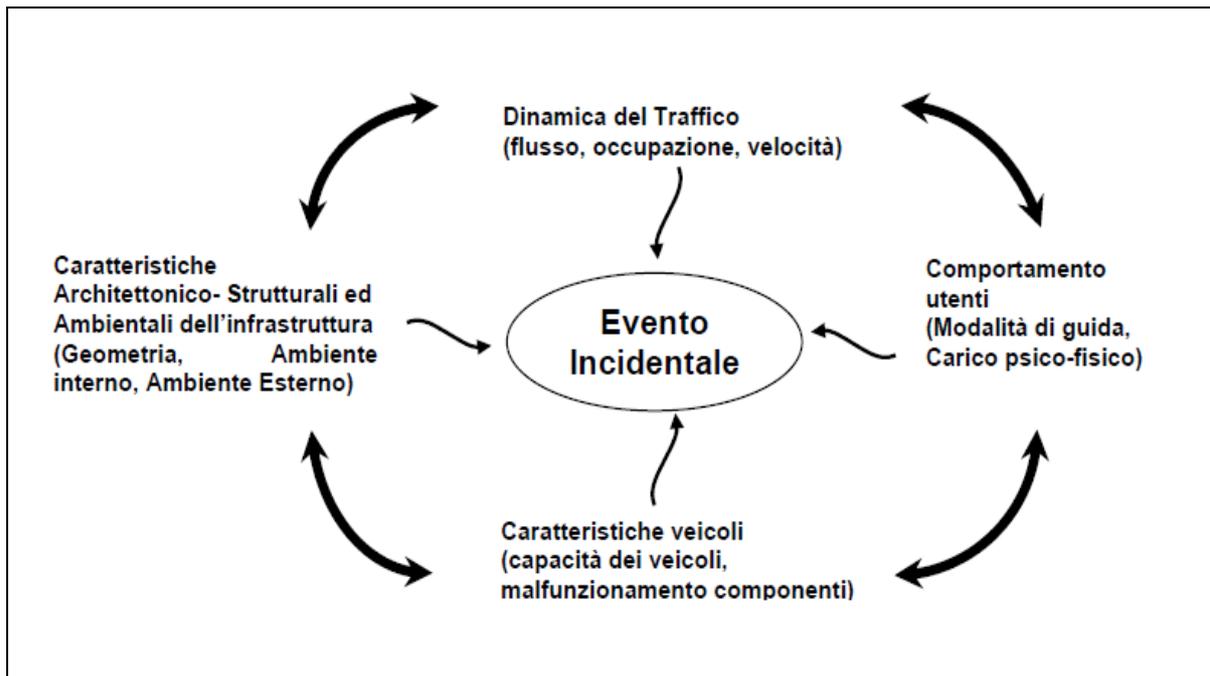


Figura 19: [58]

L'accadimento di un evento incidentale in galleria è determinato dall'instabilità di ciascuno dei fattori indicati e le misure di sicurezza preventive adottate per il sistema galleria hanno lo scopo di controllare l'instabilità di tali fattori.

Inoltre, le misure di sicurezza preventive influenzano gli utenti in condizioni di flusso di traffico.

Il metodo di progettazione della sicurezza secondo le linee guida che stiamo analizzando, fra i parametri di sicurezza che abbiamo indicato parlando della Direttiva Europea, ne individua due, che definisce come **parametri di sicurezza rilevanti** che sono:

- LA LUNGHEZZA DELLA GALLERIA
- IL VOLUME DI TRAFFICO

I rimanenti parametri di sicurezza della Direttiva Europea vengono definiti come **parametri di sicurezza caratteristici**.

6.1.9 Evento iniziatore, evento incidentale, albero degli eventi

Un **evento incidentale pericoloso** costituisce quello che viene definito un **evento iniziatore** del processo attraverso il quale il pericolo si trasforma in danno determinando una evoluzione degli stati del sistema galleria che, deviando dalla traiettoria di successo genera in un insieme di traiettorie di emergenza.

Inoltre un evento incidentale costituisce un **punto di diramazione** in cui la traiettoria di successo può essere deviata dando luogo ad un insieme di traiettorie (scenari) di emergenza.

Dunque un insieme di eventi incidentali costituisce un insieme di punti di diramazione di una traiettoria di emergenza che a sua volta rappresenta gli stati (successione di stati) che il sistema galleria assume durante il flusso di pericolo cioè durante l'evoluzione degli stati del sistema in condizioni di flusso di pericolo.

L'insieme delle traiettorie (e quindi di scenari) di emergenza possibili costituisce l'**albero degli eventi** che può quindi essere schematizzato come si vede in figura.

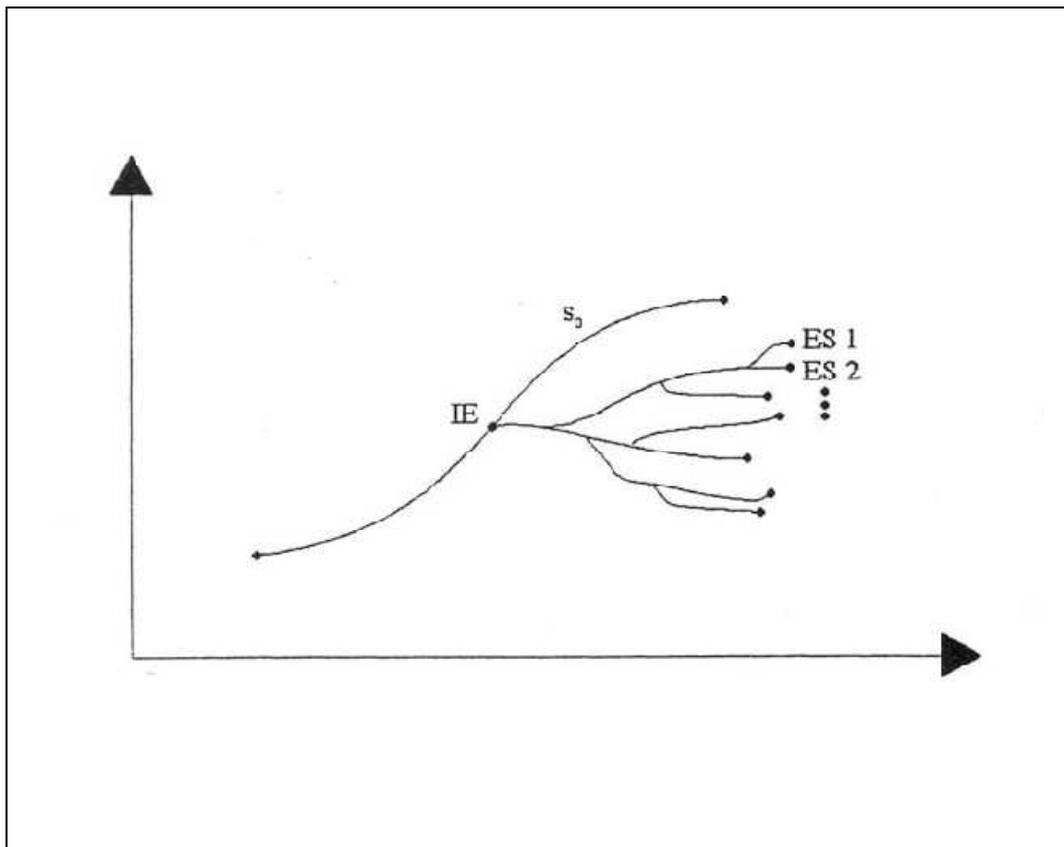


Figura 20: [ANAS s.p.a.]

L'albero degli eventi permette dunque visualizzare i diversi scenari incidentali possibili e le loro traiettorie di emergenza, inoltre si possono anche visualizzare le probabilità di accadimento di tali scenari, in questo modo si dispone di un quadro globale dei flussi di pericolo.

La tecnica dell'albero degli eventi prevede un **procedimento deduttivo** per l'individuazione degli eventi intermedi che costituiscono i punti di diramazione dello stesso albero.

A ciascun **evento intermedio** viene assegnata una probabilità⁶³ di accadimento, e questo consente di calcolare la probabilità di accadimento (frequenza di accadimento) di ciascuno scenario incidentale possibile cioè di ciascuna traiettoria di emergenza possibile.

⁶³ Tale probabilità è una **probabilità condizionata** da tutti gli eventi precedenti intermedi incontrati percorrendo il ramo dell'albero degli eventi a partire dall'evento iniziatore critico.

Volendo fare un' analogia botanica, la frequenza dei vari scenari possibili costituisce la frequenza di accadimento sulle foglie dell'albero degli eventi [59], essendo partiti dalla frequenza (probabilità) di accadimento dell'evento incidentale iniziatore (evento radice).

La traduzione grafica di questo concetto viene fatta dalla figura seguente.

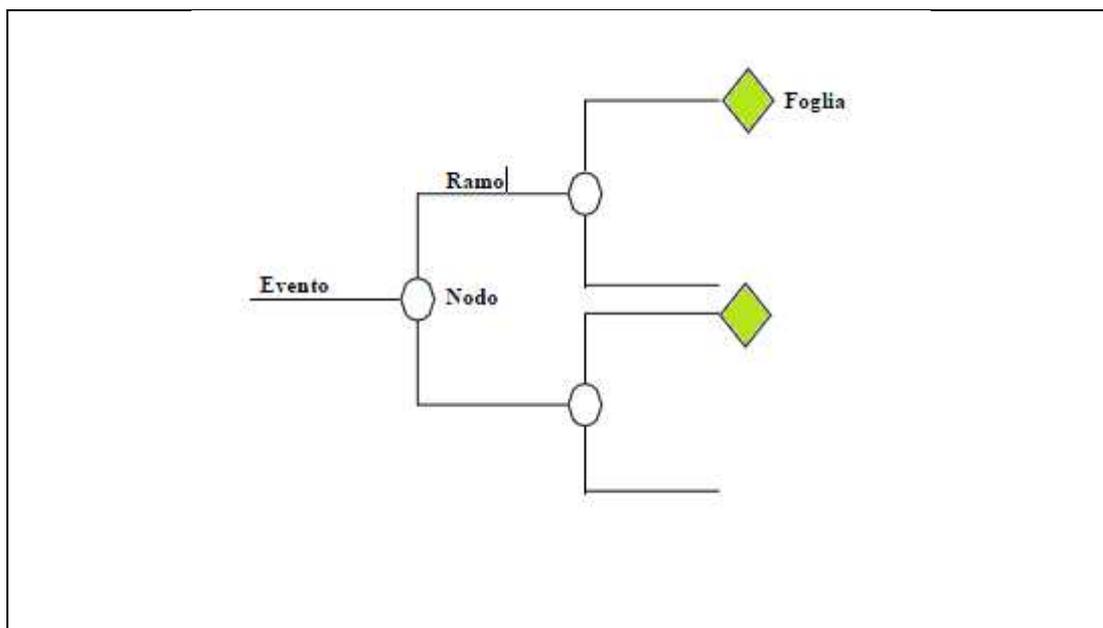


Figura 21 Analogia botanica foglia/evento di fine scenario (stato di fine emergenza) [60]

Questo **procedimento di assegnazione delle probabilità** (frequenze), può essere fatto per ciascuno degli eventi iniziatori critici che possono essere individuati per il sistema galleria.

Considerando i vari eventi incidentali critici iniziatori (eventi radice) che possono essere individuati, è quindi possibile definire dei **sottoalberi** per ciascuno di questi eventi incidentali critici iniziatori.

Inoltre considerando le varie componenti che costituiscono il sistema galleria e cioè l'infrastruttura di sicurezza, le apparecchiature e gli equipaggiamenti

tecnologici, e considerando le procedure operative o organizzative o gestionali, si possono individuare dei sottosistemi che possono essere analizzati con la tecnica dell'albero degli eventi⁶⁴.

La scelta degli eventi incidentali critici iniziatori viene effettuata in sede di analisi di rischio.

Il carattere deduttivo (deterministico) della tecnica di analisi dell'albero degli eventi, permette che molti aspetti tecnici (costruttivi ed impiantistici) ed operativi (gestionali e comportamentali) possano emergere e quindi essere tenuti in debita considerazione.

Questa considerazione è particolarmente importante per la progettazione dell'infrastruttura di sicurezza del sistema di sicurezza o dei suoi singoli equipaggiamenti e nella definizione delle barriere di sicurezza di tipo procedurale.

A questo scopo l'albero degli eventi deve essere costruito sulla base di una solida esperienza professionale⁶⁵, oppure scelto con molta cura fra quelli messi a disposizione dalla conoscenza di letteratura in modo che tutti gli eventi intermedi (nodi logici) che possono aggravare l'evento iniziatore critico e che quindi possono aggravare le diverse traiettorie (o scenari) di emergenza vengano presi in considerazione.

Per questo motivo la tecnica dell'albero degli eventi risulta avere proprietà di ampia versatilità (in quanto durante l'analisi dello scenario a seconda del giudizio che si esprime su un certo evento intermedio, lo scenario può diramarsi verso un certo evento di fine scenario o verso un altro).

Inoltre questa tecnica ha anche proprietà di ottima adattabilità (in quanto può essere utilizzato per descrivere sia aspetti puramente tecnici del

⁶⁴ E con la tecnica dell'albero delle cause descritta più avanti.

⁶⁵ Infatti l'analisi dello/degli scenario con la tecnica dell'albero degli eventi ha una connotazione logica ed intuitiva (deduttiva o deterministica).

funzionamento di impianti o di attrezzature, sia aspetti di tipo gestionale, organizzativo ed operativo⁶⁶, sia aspetti funzionali di un determinato sistema quale appunto può essere il sistema galleria o qualunque altro sistema ingegneristico).

Per le caratteristiche tecniche e funzionali di questa tecnica, l'albero degli eventi, permette di evidenziare in corrispondenza della diramazione da un evento intermedio, l'assenza (interruzione) della funzionalità del sistema che si sta studiando, e per questo motivo si parla di guasto del sistema in corrispondenza di un certo evento (nodo) intermedio dell'albero degli eventi. Dunque, dalla diramazione dell'albero degli eventi, a partire da un evento intermedio può derivare uno **stato di successo** o uno **stato di guasto** del sistema considerato.

E, come si è visto nell'analisi degli scenari, lo scopo dell'albero degli eventi è quello di quantificare il danno⁶⁷ di un evento di fine scenario e cioè il danno dello scenario stesso, e quindi anche quello di quantificare la funzionalità del sistema in oggetto quantificando (stimando) anche l'**incertezza associata a tale funzionamento**.

Lo studio di un particolare scenario (ramo dell'albero degli eventi), compreso in procedimento di assegnazione delle probabilità di accadimento⁶⁸ degli eventi incidentali intermedi e dell'evento finale ("evento foglia" o stato di fine emergenza), prende il nome di **analisi dello scenario mediante la tecnica dell'albero degli eventi (ETA: Event Tree Analysis)**.

⁶⁶ Si pensi ad esempio alla organizzazione delle squadre di pronto intervento in caso di emergenza.

⁶⁷ **O più precisamente stimare il danno con un'incertezza statistica**

⁶⁸ L'espressione probabilità di accadimento, di un evento o di uno scenario, viene anche detta frequenza dell'evento o dello scenario.

Nella figura seguente si vede la rappresentazione grafica dell'analisi di uno scenario sull'albero degli eventi.

Sommando la probabilità di accadimento (o probabilità di guasto) di ciascun evento di fine scenario, (cioè la probabilità di ciascuno scenario) si ottiene la probabilità **totale** di guasto del sistema galleria cioè si ottiene la probabilità che non si realizzi la traiettoria di successo.

Ciascun evento di fine scenario può essere studiato (analizzato) con un albero delle cause.

Per la stima del danno o della funzionalità del sistema in oggetto, queste due tecniche di analisi degli scenari, si avvalgono di **banche dati** a loro dedicate.

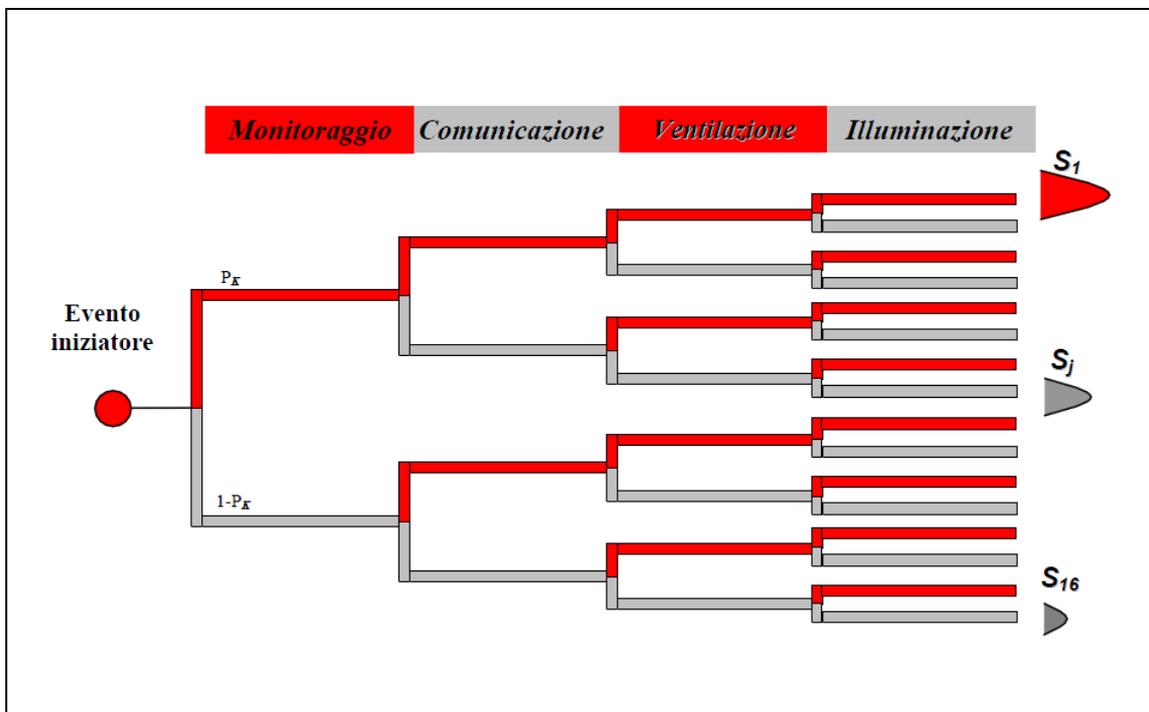


Figura 22: Rappresentazione grafica di uno scenario [ANAS s.p.a.]

Le misure di prevenzione (se adeguate) determinano la traiettoria di successo.

Le misure di protezione e mitigazione hanno lo scopo di modificare le traiettorie di emergenza in favore di sicurezza.

Dal punto di vista del sistema galleria, inteso come sistema di processo, e quindi dal punto di vista della modellizzazione del sistema galleria, il pericolo può essere classificato in:

<p>PERICOLO MECCANICO CINETICO</p>	<p>Dipende dall'energia cinetica di un veicolo e quindi dalla velocità e dalla massa del veicolo e delle merci trasportate</p>	<p>È connesso con gli eventi incidentali di collisione</p>
<p>PERICOLO TERMO CHIMICO</p>	<p>Dipende dall'energia interna e quindi dalle proprietà chimico fisiche dei materiali e delle sostanze di cui sono fatti i veicoli e le merci trasportate</p>	<p>È connesso con gli eventi incidentali di incendio, con gli eventi di collisione con incendio, con gli eventi di rilascio in fase liquida (sversamenti) di sostanze infiammabili dai veicoli, con gli eventi di rilascio in fase gassosa di sostanze tossiche, nocive, infiammabili dai veicoli, con gli eventi di detonazione e deflagrazione (esplosioni).</p>

Tabella 19: Classificazione del pericolo

6.1.10 Albero delle cause

È importante notare che anche ciascun evento iniziatore critico del sistema galleria può essere analizzato costruendo un albero delle cause.

Mentre la tecnica dell'albero degli eventi parte da un evento iniziatore critico ed arriva ad un evento di fine scenario (conseguenza finale di un evento iniziatore), la tecnica dell'albero delle cause, parte da un evento causa⁶⁹, ed arriva a stimarne la conseguenza⁷⁰.

Dunque a differenza dell'albero degli eventi, l'albero delle cause percorre a ritroso l'albero stesso passando per eventi intermedi (cause), che abbiano un grado di precisione via via crescente, fino ad arrivare all'evento radice⁷¹ di cui si vuole stimare la probabilità (frequenza) di accadimento.

Concettualmente è quindi possibile assimilare l'albero delle cause ad un albero rovesciato.

Nel caso del sistema galleria, l'albero delle cause ha quindi lo scopo di analizzare gli eventi che deviano la traiettoria di successo, conducendo all'evento iniziatore critico (che si vorrebbe evitare), stimando quindi la probabilità di accadimento (frequenza) dell'evento iniziatore critico⁷².

⁶⁹ che può ad esempio essere un guasto o anche un malfunzionamento (anche nel senso funzionale del termine).

⁷⁰ che nel caso del sistema galleria può essere un evento incidentale iniziatore critico.

⁷¹ Che nel caso del sistema galleria è l'evento iniziatore critico.

⁷² Questo scopo viene raggiunto effettuando stime di affidabilità sugli eventi di ciascun ramo dell'albero degli eventi, cioè su ogni evento intermedio (e per ciascun ramo) si effettua una stima di malfunzionamento inteso in termini tecnici, o in termini funzionali, o in termini operativi e gestionali. E ciò consente di calcolare la probabilità di accadimento su ciascun ramo.

Quindi con l'albero delle cause si vogliono studiare le traiettorie di insuccesso al fine di quantificare (stimare) la probabilità di accadimento dell'evento critico iniziatore riguardo al sistema galleria.

La **tecnica dell'albero delle cause**, in inglese, viene indicata con l'acronimo **FMA (failure modelling analysis)**, proprio perché deriva da una modellizzazione del sistema galleria⁷³ che si propone di analizzare le **traiettorie di insuccesso** del sistema stesso.

In altri termini l'albero degli eventi ha lo scopo di studiare l'affidabilità del sistema galleria⁷⁴.

Viceversa con l'albero degli eventi si vogliono studiare le traiettorie di emergenza e quindi gli eventi di emergenza⁷⁵ che deviano la traiettoria di esercizio, al fine di calcolarne le probabilità di accadimento e infine di stimare il danno di ciascuno di questi eventi di fine emergenza.

Poiché nella tecnica dell'albero delle cause si procede a ritroso (rispetto alla tecnica che usa l'albero degli eventi), e cioè si parte dal guasto per arrivare all'evento iniziatore critico, si ha che l'analisi degli eventi intermedi (o cause intermedie⁷⁶) sui vari rami dell'albero delle cause si chiama anche **tecnica**

⁷³ O di qualunque altro sistema tecnologico, o funzionale, o operativo/organizzativo, o gestionale.

⁷⁴ Infatti gli alberi delle cause vengono utilizzati per l'analisi dell'affidabilità di un sistema o di un'apparecchiatura o di una procedura funzionale, o di una procedura operativa

⁷⁵ E quindi gli scenari di fine emergenza

⁷⁶ Cioè, a ritroso, rispetto a come visto con l'albero degli eventi, partendo dal guasto finale, si specificano sempre meglio le sue cause (eventi intermedi) fino ad arrivare all'evento iniziatore critico che è la causa di partenza del guasto finale (conseguenza), se si pesa alla logica con cui si è descritto l'albero degli eventi. Quindi in ciascun ramo ci sono dei guasti intermedi (conseguenze, pensando all'albero degli eventi) e delle cause intermedie (eventi, pensando all'albero degli eventi); in questo senso si può pensare l'albero delle cause come un "**albero degli eventi rovesciato**". Questo concetto permette quindi di risalire (calcolare) alla probabilità di accadimento dell'evento iniziatore critico (con un ragionamento analogo al calcolo della probabilità dell'evento di

dell'albero dei guasti che in inglese viene indicata con l'acronimo FTA (Fault Tree Analysis).

Alla luce di tutte queste considerazioni, possiamo dire che la tecnica dell'albero delle cause è una **procedura induttiva** complessa, proprio perché analizza una serie di eventi intermedi lungo rami che concorrono a determinare un evento iniziatore incidentale critico, mentre la tecnica dell'albero degli eventi è una **procedura deduttiva**⁷⁷.

6.2 L'analisi di rischio

Accorpando le considerazioni riguardo all'albero delle cause e quelle riguardo all'albero degli eventi si ottiene la tecnica utilizzata nelle prime fasi e nella fase intermedia dell'analisi di rischio, (contemplata nel metodo di progettazione della sicurezza secondo le Linee guida), per:

fine scenario visto per l'albero degli eventi), utilizzando le probabilità di guasto intermedie. D'altro canto, le probabilità degli stati di successo intermedio (contrapposti agli stati di guasto intermedi) esprimeranno l'**affidabilità** del sistema galleria (o dei suoi equipaggiamenti, o delle sue procedure operative o organizzative) negli stati intermedi. Infatti nel caso dell'albero delle cause si parla di stime di affidabilità più che di stime di probabilità di accadimento degli eventi intermedi.

⁷⁷ Perché analizza una serie di eventi intermedi che, lungo rami (scenari), conducono a diversi eventi di fine scenario.

- CALCOLARE LE PROBABILITA' DI ACCADIMENTO DEI SINGOLI EVENTI INIZIATORI CRITICI, AVENDO PRIMA EFFETTUATO UNA ANALISI DI VULNERABILITA'⁷⁸ DEL SISTEMA GALLERIA
- ASSEGNARE LE PROBABILITA' DI ACCADIMENTO DI CIASCUN EVENTO DI FINE SCENARIO (e quindi di ciascuno scenario), STIMARE IL DANNO AD ESSI CONNESSO

Tale tecnica viene schematizzata nella seguente figura in cui si vede come l'evento critico iniziatore del sistema galleria rappresenti il punto di congiunzione fra l'albero delle cause e l'albero degli eventi.

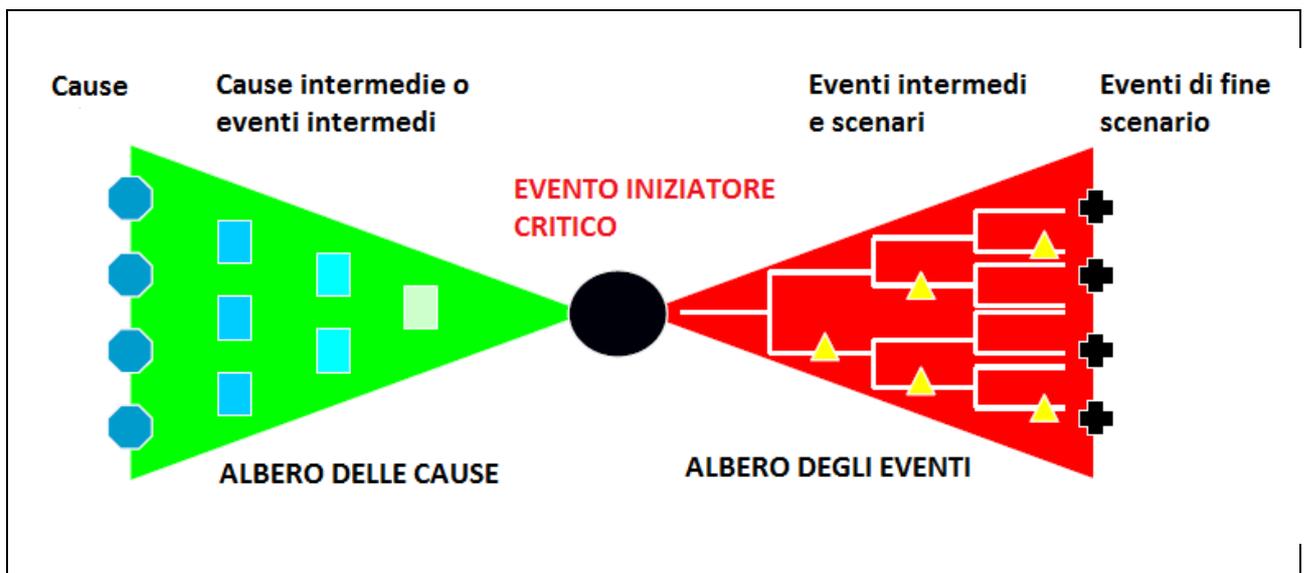


Figura 23 Analisi di rischio nelle prime fasi [ANAS s.p.a.]

⁷⁸ E cioè avendo individuato i tipi (categorie) di pericoli (cioè le fonti di danno), connessi con i parametri di sicurezza come si visto nel paragrafo 6.1.8. Tali pericoli attraverso l'albero delle cause, conducono alle'evento iniziatore critico e, attraverso l'albero degli eventi conducono al danno (o ai danni).

La figura seguente invece evidenzia come le misure di prevenzione influenzino la traiettoria di successo sull'albero delle cause (del sistema galleria), e come le misure di protezione influenzino le traiettorie di emergenza sull'albero degli eventi (del sistema galleria).

In pratica si rappresenta un modello del sistema galleria che tramite l'albero delle cause permette di studiare le misure di prevenzione, e un modello che attraverso l'albero degli eventi permette di studiare le misure di protezione.

Le misure di prevenzione devono determinare la traiettoria di successo degli stati del sistema galleria affinché l'evento critico⁷⁹ iniziatore non si verifichi, e quindi anche la traiettoria sull'albero degli eventi possa essere di successo (e non di emergenza).

Le misure di protezione e mitigazione invece devono limitare i danni di ciascun evento di fine scenario cioè di ciascuno scenario possibile e devono quindi permettere di individuare la traiettoria di emergenza (e quindi lo scenario di emergenza) che conduce all'evento di fine scenario che ha il valore della stima di danno più alto.

In definitiva le misure di protezione, mitigazione, facilitazione dell'esodo degli utenti, devono essere adeguate alla traiettoria critica in modo da poter limitare l'entità del danno.

⁷⁹ O gli eventi critici iniziatori non si verifichino

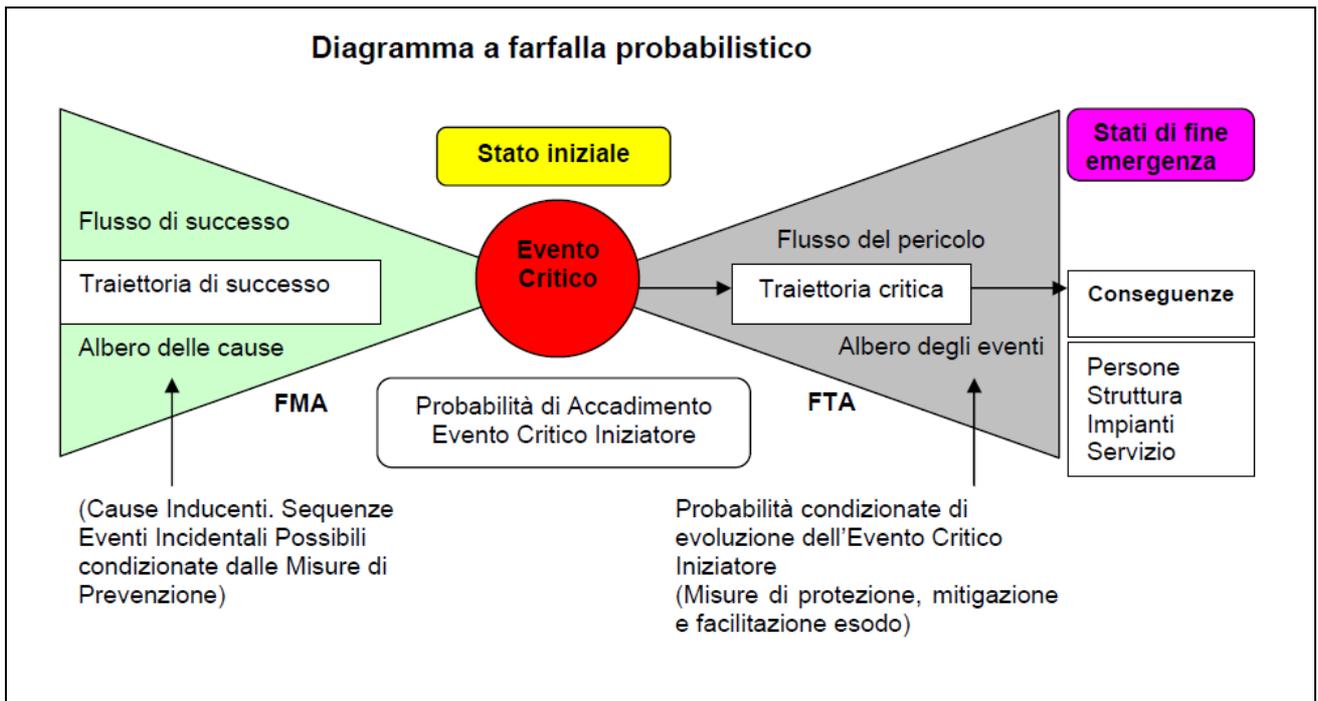


Figura 24: [ANAS s.p.a.]

I due schemi descritti prendono il nome di **diagrammi a farfalla**.

Dunque il diagramma a farfalla descrive l'analisi di rischio nella fase di analisi di vulnerabilità del sistema galleria, nella fase di individuazione degli eventi iniziatori critici che comprende anche la stima della probabilità di accadimento degli stessi, e nella fase di stima delle probabilità di accadimento degli eventi di fine scenario di ciascuno scenario possibile e di stima del danno connesso a ciascuno di questi eventi.

Per quanto detto riguardo alla traiettoria di successo dell'albero delle cause e alla traiettoria critica dell'albero degli eventi e riguardo agli aspetti affidabilistici dell'albero delle cause e probabilistici dell'albero degli eventi, si può osservare che l'albero delle cause caratterizza il sistema galleria in termini di **affidabilità** (reliability) o efficienza, mentre l'albero degli eventi lo caratterizza in termini di **disponibilità** (availability) o efficacia.

Infatti il le fasi di analisi di rischio che interessa il diagramma a farfalla ha lo scopo di impedire gli eventi iniziatori critici (traiettoria di successo) e di garantire l'esercizio della galleria nel caso di traiettoria critica.

Del resto in queste fasi sia gli equipaggiamenti, sia le procedure operative ed organizzative devono avere caratteristiche di affidabilità, disponibilità ed **efficienza** (efficiency).

Queste considerazioni, di riflesso, condizioneranno in modo incisivo, le decisioni da prendere sulle **misure di prevenzione, di protezione e mitigazione**.

Infatti, ad esempio, volendo studiare degli aspetti organizzati o operativi, con la tecnica dell'albero degli eventi, considerando la traiettoria critica e quindi lo scenario critico⁸⁰, sarà possibile (avvalendosi della modellizzazione del sistema galleria) studiare la disposizione dei veicoli coinvolti e quindi della popolazione esposta e quindi studiare le vie di esodo della popolazione, le vie di accesso delle squadre di intervento e la misure di protezione e mitigazione.

Avendo individuato, per ciascun evento iniziatore critico, i vari scenari possibili, e avendo assegnato (calcolato) per ciascuno scenario, la probabilità di accadimento (frequenza), è possibile calcolare il rischio connesso a ciascuno scenario⁸¹.

⁸⁰ Cioè lo scenario con le conseguenze peggiori, cioè lo scenario con evento di fine scenario che presenta il valore più alto della stima del danno.

⁸¹ Cioè anche, il rischio connesso a ciascun evento di fine scenario o a ciascuno stato di fine emergenza.

Tale rischio sarà dato alla probabilità di accadimento (frequenza) dell'evento di fine scenario (fine emergenza) per la **magnitudo**⁸² delle conseguenze di tale evento, vale adire per la magnitudo dello scenario stesso.

L'analisi di ciascuno scenario, quindi, comporta anche la stima della magnitudo, o meglio la stima del parametro della magnitudo in relazione al tipo di danno occorso. In questo modo l'analisi dello scenario risulta completata.

L'analisi dello scenario viene condotta, nel modo in cui si è descritto fin qui, per fasi successive, scandite dagli eventi intermedi nei nodi dei rami dell'albero degli eventi, focalizzando l'attenzione sugli aspetti chimico fisico e sulle relative grandezze fisiche che caratterizzano lo scenario stesso.

In altri termini se ad esempio lo scenario è caratterizzato dal pericolo termochimico, in quanto l'evento iniziatore critico è ad esempio il rilascio in fase liquida di sostanze infiammabili, nell'analisi dello scenario si considera ad esempio la grandezza fisica potenza termica.

E, man mano che lo scenario evolve, anche il tipo di pericolo (sorgente di danno) evolve e con esso anche la grandezza chimico fisica che caratterizza il pericolo evolve (nel senso che la grandezza che via via considero può cambiare) fino a giungere all'evento di fine scenario dove sarà possibile quantificare tale grandezza, in tal modo sarà anche possibile quantificare la

⁸² La magnitudo **esprime** (quantifica) in termini di perdita di vite umane o di numero di feriti o in termini economici e sociali, il danno derivante dalle conseguenze di un evento incidentale. Quindi, **a seconda del tipo di danno** (numero atteso di perdita di vite umane , numero atteso di feriti o danni sociali, come ad esempio l'interruzione dell'esercizio della galleria, o danni economici, o danni ambientali o danni tecnici nel caso di analisi di scenario di tipo tecnico, tipico dell'utilizzo della tecnica dell'albero degli eventi, o danni di altro tipo) **alla magnitudo, viene associato un parametro numerico al fine di stimare il danno stesso**. Tale parametro in alcuni casi viene anche chiamato parametro o indicatore di magnitudo o di danno.

risposta umana, ambientale, sociale e materiale che esprime il danno atteso mediante la sua stima quantitativa (numerica).

Queste considerazioni⁸³, che conducono alla quantificazione⁸⁴ (stima) del danno dell'evento di fine scenario e al calcolo della sua probabilità di accadimento, passando dall'assegnazione delle probabilità agli eventi intermedi nella fase dell'analisi dello scenario (metodo probabilistico e quantitativo con valutazione dell'incertezza), proseguono con altre considerazioni⁸⁵ di tipo matematico probabilistico.

Queste ultime, a loro volta conducono alla valutazione (stima) quantitativa del rischio e in fine alla verifica dell'accettabilità del rischio attraverso i criteri di accettabilità del rischio.

In questo concetto risiede la spiegazione della locuzione **analisi di rischio probabilistica e quantitativa** in antitesi con **analisi deterministica e qualitativa**.

l'analisi di rischio come strumento analitico del metodo di progettazione della sicurezza secondo i dettami delle Linee guida della Direttiva Europea prevede di stimare la frequenza (probabilità) di accadimento di ciascun evento iniziatore critico.

Per fare ciò, l'analisi di rischio secondo i dettami della Direttiva Europea prevede l'utilizzo della tecnica dell'albero delle cause.

⁸³ Che discendono dalla modellizzazione termodinamica o fluidodinamica del sistema galleria

⁸⁴ Con metodi statistico/probabilistici

⁸⁵ Esposte nelle pagine seguenti

Per utilizzare la tecnica dell'albero delle cause occorre avvalersi di dati statistici generali e ai dati disponibili per il sistema galleria che si sta considerando.

Inoltre nell'utilizzo della tecnica dell'albero delle cause occorre considerare i dati relativi al traffico del sistema galleria in studio.

In particolare tali dati inerenti il traffico del sistema galleria in esame devono tener conto della composizione del traffico.

Quindi bisognerà considerare sia i dati del flusso di traffico totale (orario) che comprende cioè tutti i tipi di veicoli, sia i dati relativi al flusso di traffico suddiviso fra mezzi pesanti, auto e moto.

inoltre il flusso di traffico dei mezzi pesanti dovrà ancora essere analizzato in base al tipo di mezzo pesante, in base al tipo di carico trasportato, sia in base al tipo di merce (o sostanza) pericolosa trasportata.

Occorrerà quindi distinguere il flusso di mezzi pesanti con carico di sostanze in fase liquida infiammabili, in fase gassosa, tossiche, nocive, infiammabili e di sostanze esplosive.

Questo perché il **pericolo** (fonte di danno dovuto ad un evento incidentale) connesso al trasporto di tali sostanze (**pericolose**) influenza fortemente la probabilità di accadimento degli eventi iniziatori.

Del resto, (facendo un gioco di parole intrinseco nella definizione di rischio e di pericolo) è scontato che la considerazione del trasporto delle merci pericolose influenza fortemente l'entità dei danni derivante da un evento incidentale che coinvolga tali merci.

È importante osservare che i dati statistici inerenti il trasporto di merci pericolose spesso, per la loro scarsità non sono idonei a garantire una

estrema precisione dell'analisi di rischio, e per sopperire a questo limite, quando necessario occorre reperire dati più affidabili disponendo apposite ricerche e misurazioni in loco.

Gli eventi di fine scenario [61], e quindi gli scenari che scaturiscono dall'albero degli eventi, devono essere ordinati (in ordine crescente di danno) rispetto all'entità del danno che per ciascuno di essi è stata stimata.

Per ogni evento iniziatore critico, l'albero degli eventi restituisce un valore di probabilità di accadimento dell'evento di fine scenario⁸⁶, e un valore (stima) di danno⁸⁷ per ciascun evento di fine scenario, quindi l'entità di danno dovuto a ciascun evento iniziatore critico, matematicamente, può essere rappresentato con la seguente n-pla:

$$(D_r, P_r) \quad \text{con } r = 1, \dots, n$$

Cioè:

$$((D_1, P_1), \dots, (D_n, P_n))$$

⁸⁶ E cioè un valore di probabilità di accadimento per ogni scenario possibile

⁸⁷ O meglio un valore di entità del danno, ad esempio in termini di numero di morti o di numero di feriti o entità (numero, parametro di danno) di danno economici, o entità di danno sociali, o entità di danno ambientale.

Dunque [62] questo significa che l'entità di danno (Dr,Pr) di ciascun evento iniziatore critico⁸⁸ è una **variabile aleatoria discreta** (variabile aleatoria danno), proprio perché alla variabile (Dr,Pr) può essere assegnata una probabilità perché essa è una n-pla.

Ora il **valor medio della variabile** (Dr,Pr) è dato dall'espressione:

$$\sum (Dr,Pr) \quad (\text{con } r \text{ che va da } 1 \text{ ad } n)$$

(n= numero di eventi di fine scenario⁸⁹)

che viene detto **valore atteso (expete value)** del danno connesso a ciascun evento iniziatore critico e si indica con:

$$ED = \sum (Dr,Pr) = \text{VALORE ATTESO}$$

Dunque ED rappresenta un **indicatore del rischio (stima del danno⁹⁰)** connesso a ciascun evento iniziatore critico.

In altri termini il valore atteso ED rappresenta il rischio connesso ad un particolare evento iniziatore critico.

In questo modo sarà possibile distinguere il livello di sicurezza di ciascun evento iniziatore critico.

⁸⁸ O indicatore, o indice di danno, di ciascun evento iniziatore

⁸⁹ O numero di scenari possibili per ogni evento iniziatore critico

⁹⁰ Come più volte precisato, il termine rischio (risk) è associato alle conseguenze (in termini di danno) e quindi al danno di un certo evento incidentale, mentre il termine pericolo (hazard) è associato all'origine del danno, quindi all'evento stesso.

Quindi se gli eventi iniziatori critici sono più di uno, si ha che il valore **atteso del danno connesso a tutti i possibili eventi iniziatori critici del sistema galleria** e quindi il **“rischio connesso al sistema galleria”**, sarà dato dalla somma dei prodotti della probabilità di accadimento di ciascun evento iniziatore critico per il valore atteso del danno ED di ciascun evento iniziatore critico.

Quindi in questo modo l'analisi di rischio ha permesso di definire il livello di sicurezza del sistema galleria.

A questo punto la fase di **quantificazione del rischio (sociale⁹¹)** può ritenersi conclusa.

Considerando la variabile aleatoria danno, che come visto, rappresenta la distribuzione delle probabilità degli eventi incidentali in esame⁹², è possibile parlare di rischio cumulato (e quindi di curve cumulate di rischio) che scaturisce dal fatto che il danno considerato per ogni evento incidentale sia inferiore o al limite uguale di un certo valore di danno ammissibile.

Queste considerazioni di tipo matematico probabilistico, unite alle considerazioni sulla modellizzazione termodinamica o fluido dinamica del sistema galleria, e alle considerazioni sul pericolo meccanico/cinetico e termochimico del sistema galleria, concorrono a definire il **modello di rischio** fin qui descritto per il **sistema galleria**, che prende il nome di **modello di rischio Bayesiano⁹³ classico con analisi delle incertezze⁹⁴**.

⁹¹ Il metodo di progettazione della sicurezza secondo i dettami delle linee guida prevede la quantificazione del rischio sociale, e la trattazione matematico probabilistica descritta nelle pagine precedenti si presta proprio alla quantificazione del rischio sociale.

⁹² E cioè gli eventi di fine scenario o gli eventi iniziatori critici

⁹³ Che come detto nelle pagine precedenti è il modello di rischio previsto per la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali secondo i dettami delle linee guida.

Ai modelli termodinamici e fluidodinamici del sistema galleria che appunto permettono di analizzare il suo flusso di pericolo o di esercizio, vengono abbinati modelli per l'analisi del **flusso dell'esodo** degli utenti ed altri modelli per lo studio aspetti operativi ed organizzativi.

In questo modo si possono quindi adottare le misure di sicurezza preventive e protettive e di mitigazione necessarie per raggiungere il livello di sicurezza accettabile, e si possono adeguare tali misure qualora queste non risultassero idonee a garantire un livello di sicurezza accettabile.

La procedura (o principio) che si utilizza per la valutazione di accettabilità del rischio del sistema galleria prende il nome di principio ALARP.

Tale principio prevede la rappresentazione su un diagramma bilogarithmico delle curve cumulate del rischio che definiscono sullo stesso diagramma una zona di accettabilità del rischio⁹⁵.

È possibile rappresentare il rischio connesso al sistema galleria con la cosiddetta curva di rischio che viene analizzata in relazione alla sua posizione nella fascia di accettabilità del rischio prevista dal principio ALARP di accettabilità del rischio.

La curva di rischio connesso al sistema galleria in studio è in realtà una curva di distribuzione cumulata complementare.

Sull'asse delle ascisse (logarithmico) viene riportato l'entità del danno atteso, nello specifico il numero di morti N atteso (in quanto come detto con il metodo

⁹⁴ Tali incertezze sono quelle connesse alla stima delle probabilità di accadimento degli eventi di fine scenario, e alla stima del danno ad essi connesso. Inoltre sono le incertezze connesse alla stima delle probabilità di accadimento effettuata con la tecnica dell'albero delle cause .

⁹⁵ La normativa prevede che per la definizione della zona di accettabilità del rischio si consideri il rischio sociale.

della progettazione secondo i dettami delle linee guida analizziamo il rischio sociale).

Sull'asse delle ordinate (logaritmico) viene riportata la frequenza degli eventi a cui corrisponde un numero di morti uguale o maggiore del corrispondente numero riportato sull'asse delle ascisse.

Per le considerazioni fatte in relazione alla quantificazione del rischio si ha al sistema galleria è rappresentato dall'area sottesa della curva di rischio stessa.

Dunque la curva di rischio costituisce anche un modo per rappresentare graficamente il rischio.

La posizione della curva di rischio rispetto alla zona di accettabilità del rischio permette di stabilire se il rischio connesso al sistema galleria, (valore atteso del danno connesso al sistema galleria⁹⁶), possa essere considerato accettabile oppure no.

Tale rischio sarà accettabile se la curva di rischio del sistema galleria giace sotto la curva cumulata di rischio inaccettabile (curva rossa), e sarà inaccettabile se essa oltrepassa la curva cumulata di rischio inaccettabile.

Questa procedura è schematizzata nelle figure seguenti:

⁹⁶ scaturito dalla sommatoria delle probabilità di accadimento dei singoli eventi iniziatori critici per il danno atteso da ogni evento iniziatore critico connesso ad ogni singolo evento iniziatore critico

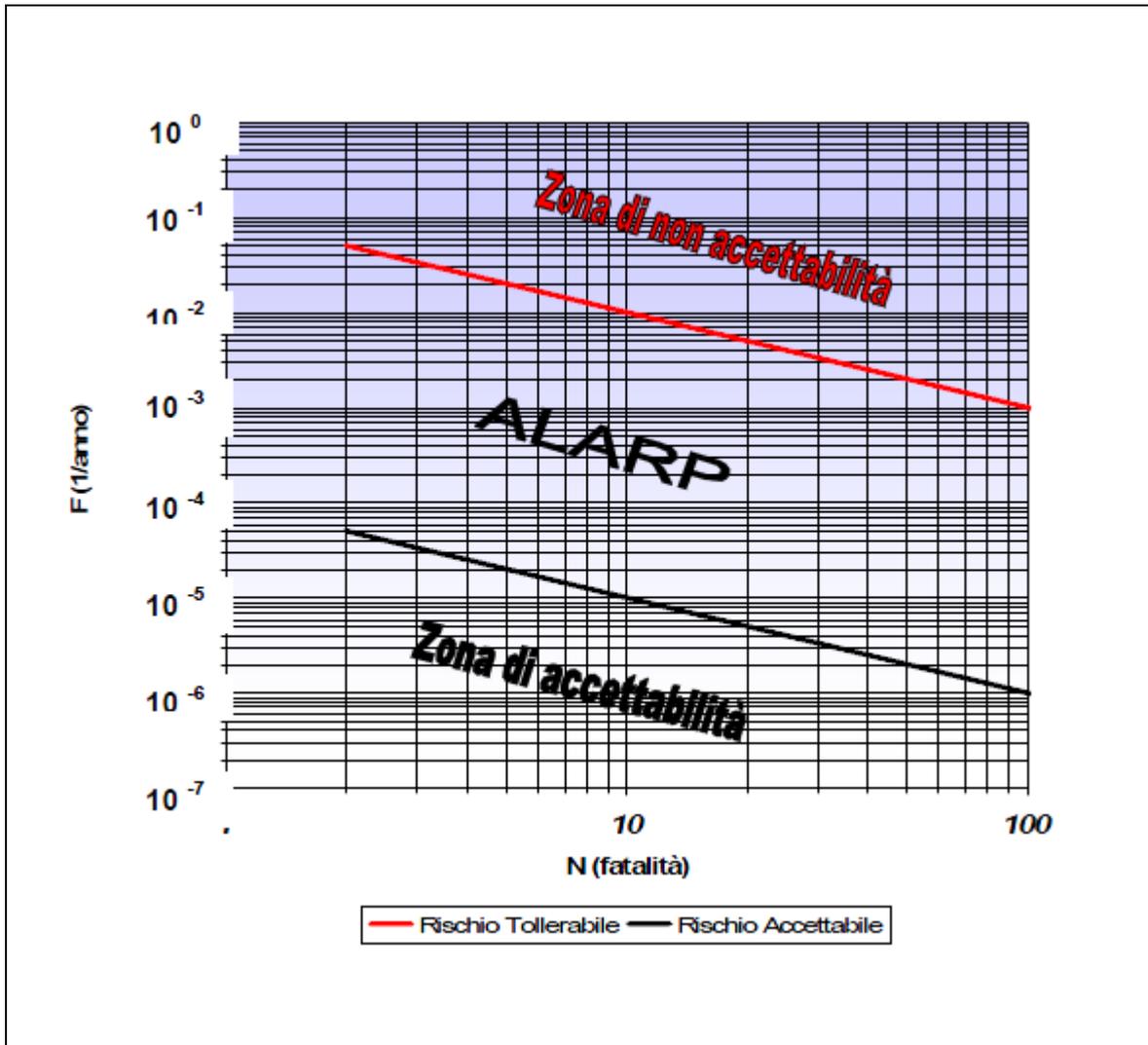


Figura 25: Zone di accettabilità del rischio e zona [ANAS s.p.a.]

Nella figura seguente si vede rappresentato il confronto di esempi di curve di rischio con i limiti di accettabilità e di inaccettabilità del rischio.

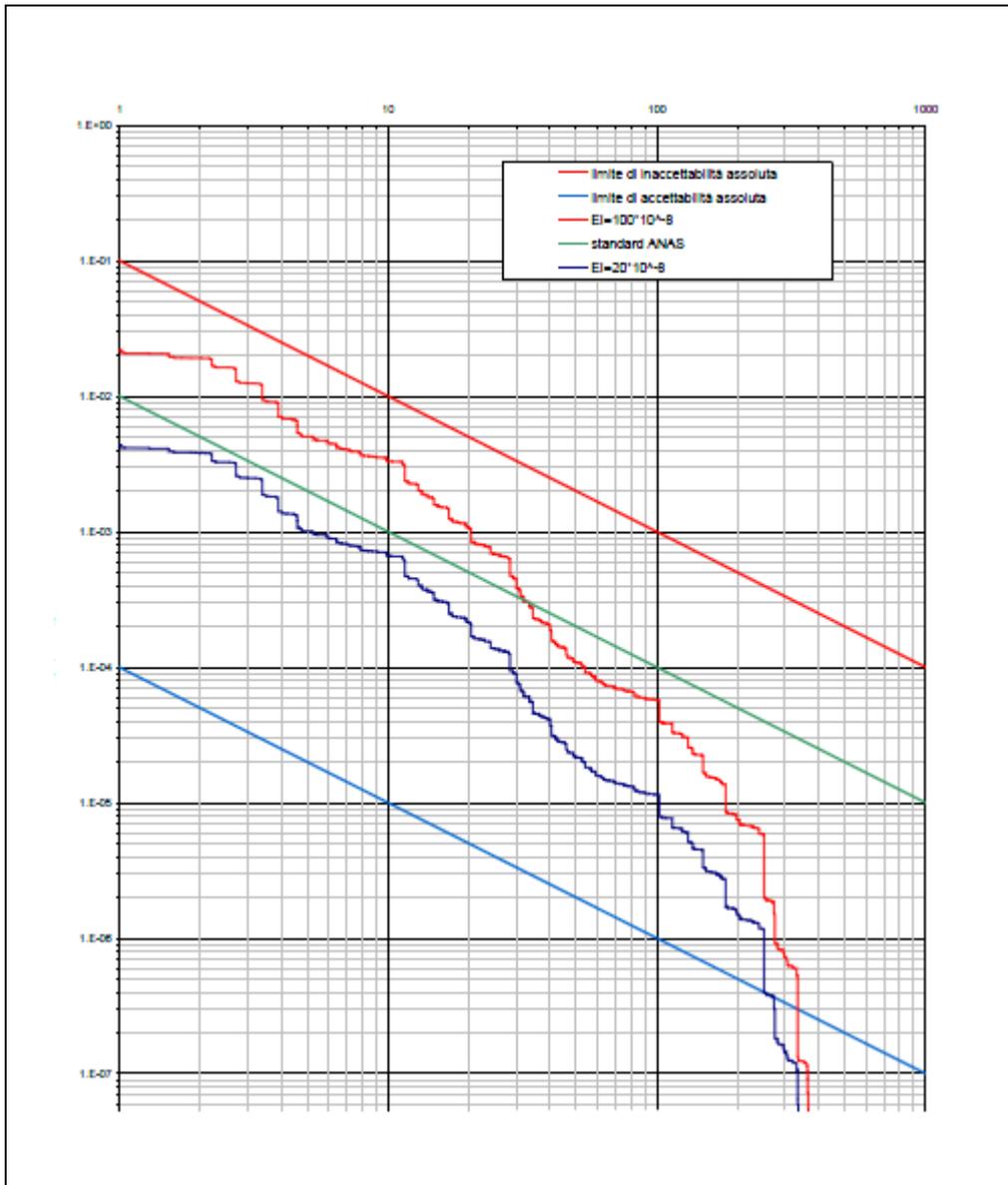


Figura 26: [Convegno “SICUREZZA NEI SISTEMI COMPLESSI” Bari, 14-15-16 Ottobre 2009]

Qualora la curva di rischio dovesse cadere nella zona ALARP, come si vede in figura 14, lo stesso principio ALARP prevede che si debbano adottare delle misure di sicurezza di prevenzione, protezione e mitigazione suppletive perché il valore atteso del danno associato a tale curva di rischio del sistema galleria possa essere considerato accettabile.

E in accordo con il principio ALARP di accettazione del rischio occorre che tali misure suppletive siano stringenti abbastanza, compatibilmente con un

ragionevole bilanciamento fra il loro costo e il loro beneficio⁹⁷ in termini di innalzamento del livello di sicurezza.

6.2.1 La galleria virtuale

La metodologia, indicata dalle linee guida, per valutare l'accettabilità del rischio è quello della galleria virtuale.

Si definisce "galleria virtuale⁹⁸": il sistema galleria che possiede tutte le misure di sicurezza corrispondenti ai requisiti minimi obbligatori operanti in condizioni ideali.

Per condizioni ideali si intendono quelle condizioni che non prevedono malfunzionamenti delle apparecchiature della infrastruttura di sicurezza ma anche delle procedure operative ed organizzative.

Questa metodologia consente di sviluppare una procedura che permetta di confrontare il sistema galleria in esame (progettazione) con la galleria virtuale in modo da tale confronto si possa determinare un livello di sicurezza accettabile per il sistema galleria.

Per fare ciò le linee guida prevedono la **definizione di gruppi omogenei di requisiti minimi di sicurezza per diversi gruppi di gallerie.**

In altri termini i diversi gruppi di gallerie vengono classificati in base alla loro tipologia (unidirezionali, bidirezionali), al volume di traffico (giornaliero, orario per corsia) e in base alla lunghezza.

Questa classificazione permette di definire quindi 10 classi di gallerie come si vede nella figura seguente:

⁹⁷ ALARP, infatti è l'acronimo della locuzione "as low as reasonably practicable"

⁹⁸ Definizione indicata nel glossario delle linee guida

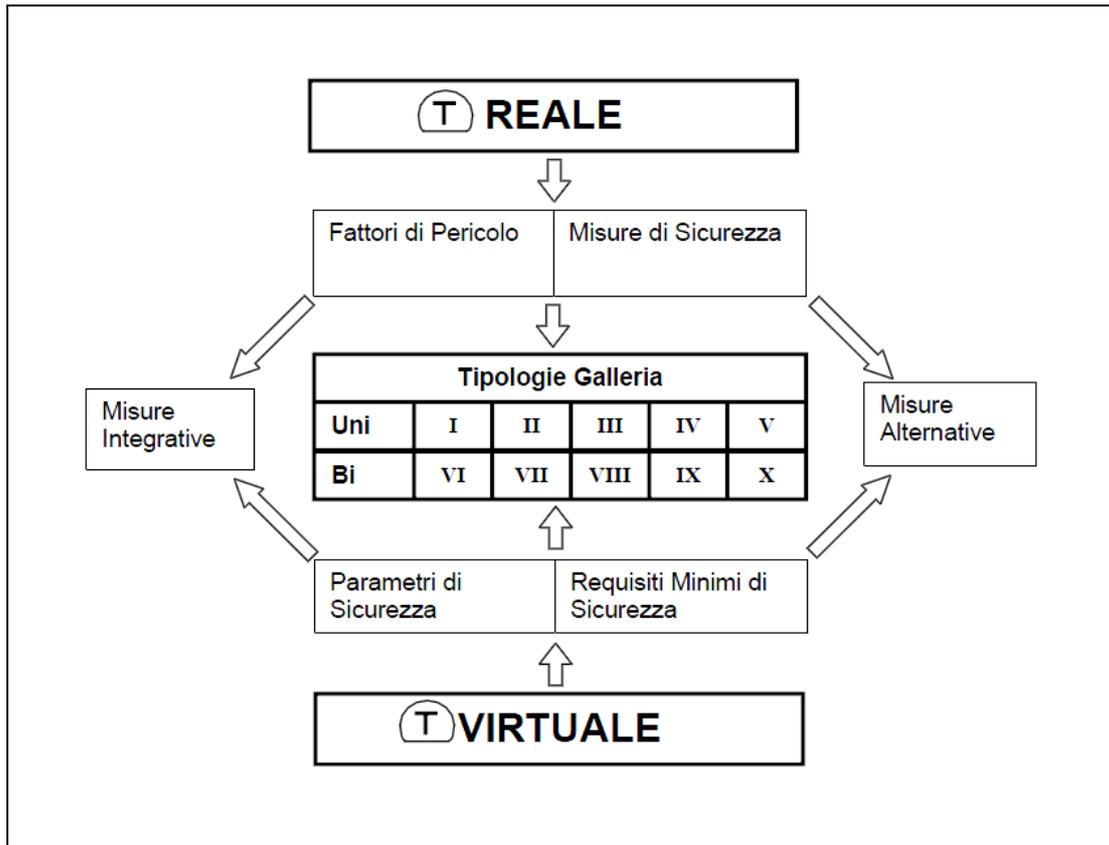


Figura 27: Galleria virtuale da linee guida [ANAS s.p.a.]

in questo modo la comparazione del sistema galleria in esame con la galleria virtuale facilita l'individuazione delle sue carenze caratteristiche in materia di sicurezza e quindi anche la fase di analisi di vulnerabilità risulta agevolata. Chiaramente dalla valutazione dell'accettazione de rischio, il livello di sicurezza del sistema galleria in esame deve risultare maggiore o uguale rispetto a quello della galleria virtuale.

Tale metodologia prevede l'utilizzo del valore atteso di danno connesso con il sistema galleria in esame (la cui descrizione è stata data nelle pagine precedenti) come termine di paragone fra le due gallerie.

Dunque tale metodologia di accettazione del rischio che prende come termine di paragone la galleria virtuale, prevede l'adozione di misure di prevenzione, protezione e mitigazione suppletive nel caso in cui il valore

atteso del danno del sistema galleria in esame sia maggiore o al limite uguale al valore atteso del danno della galleria virtuale.

6.2.2 Livelli di analisi di rischio e metodi di analisi di rischio

Quanto detto nel paragrafo 6.2, sull'aspetto probabilistico e quantitativo dell'analisi dello scenario, deve tenere anche conto dell'aspetto deterministico e qualitativo dell'analisi dello scenario insito nella tecnica dell'albero degli eventi.

In definitiva i metodi dell'analisi di rischio, secondo le linee guida, integrano i metodi probabilistici e quantitativi con i metodi deterministici e qualitativi mettendo a disposizione del progettista della sicurezza del sistema galleria una vasta gamma di metodi di analisi di rischio.

Quindi all'interno di questa gamma di metodi si parla quindi anche di metodi semi-probabilistici.

Inoltre anche a livello internazionale, come per i criteri di accettazione del rischio, anche per i livelli (tipologie) di analisi di rischio le organizzazioni mondiali e gruppi di studiosi, hanno operato delle classificazioni riguardo ai metodi che da essi scaturiscono.

In questo modo la precedente classificazione data dei metodi di analisi (valutazione) di rischio in probabilistici e deterministici, risulta notevolmente affinata e differenziata in quanto esistono diversi metodi di analisi di rischio che combinano sia l'aspetto probabilistico (quantitativo) sia l'aspetto deterministico (qualitativo) dando luogo ai metodi semi-quantitativi.

Quindi per l'analisi (valutazione) di rischio possiamo distinguere i seguenti metodi:

- METODI QUANTITATIVI (PROBABILISTICI)
- METODI SEMIQUANTITATIVI (matrice di criticità, analisi delle conseguenze o analisi degli scenari)
- METODI QUALITATIVI

Il seguente schema riassume le precedenti considerazioni evidenziando anche il processo di quantificazione, classificazione e valutazione del rischio e di valutazione delle misure di sicurezza.



Figura 28: [ANAS s.p.a.]

7 Elementi e impianti oggi attuabili per ridurre il rischio nelle gallerie stradali

7.1 l'infrastruttura di sicurezza e misure di sicurezza

In conformità cogli scopi della legislazione in materia di sicurezza delle gallerie stradali, il metodo della progettazione della sicurezza delle gallerie secondo le linee guida, deve analizzare le più idonee misure di sicurezza da prevedere nelle varie fasi della analisi di rischio.

Tali misure, come specificato parlando, della fase di valutazione e gestione del rischio devono essere riviste ed adeguate, agendo in maniera più restrittiva sui requisiti di sicurezza, qualora il livello di rischio scaturito dalla fase di quantificazione del rischio non dovesse soddisfare i criteri di accettazione del rischio.

Dunque le misure di sicurezza devono avere caratteristiche di prevenzione e protezione, e cioè devono essere tali da permettere di raggiungere i seguenti scopi:

- **PROTEGGERE GLI UTENTI ED I SOCCORRITORI**
- **PROTEGGERE LA STRUTTURA GALLERIA E LA STESSA INFRASTRUTTURA DI SICUREZZA, E GARANTIRE LA LORO CONTINUIOTA' DI ESRCIZIO**
- **SUPPORTARE LE OPERAZIONI DI SOCCORSO**
- **PROTEGGERE LAMBIENTE**

In particolare per quanto riguarda la protezione degli utenti, la misure di sicurezza devono essere tali da permettere l'**autosalvamento** degli utenti studiando il flusso del pericolo ed analizzando gli scenari di esodo possibili e

la popolazione esposta al pericolo utilizzando **modelli di formazione delle code**.

Tali modelli permettono infatti di determinare il numero degli utenti interessati dal processo di esodo.

Oltre alla suddivisione delle misure o barriere di sicurezza in misure preventive⁹⁹ e di protezione¹⁰⁰ o mitigazione, occorre tener presente che esse non sono solo di tipo strutturale e tecnologico ma anche di tipo comportamentale oltre che di tipo procedurale¹⁰¹ o organizzativo¹⁰² o gestionale¹⁰³.

Una ulteriore classificazione è quella che suddivide le barriere o misure di sicurezza in:

- MISURE DI SICUREZZA PASSIVE
- MISURE DI SICUREZZA ATTIVE

- Le barriere di sicurezza passive sono costituite da sistemi fisici che non richiedono l'intervento del personale della galleria e per cui non è necessario una sorgente energetica o di informazione per garantirne il funzionamento.

Queste barriere o misure di sicurezza influiscono sulle cause di eventi particolari.

⁹⁹ Che hanno lo scopo di ridurre la probabilità di accadimento degli eventi iniziatori critici possibili.

¹⁰⁰ Che hanno lo scopo di mitigare le conseguenze derivanti dagli eventi iniziatori critici e cioè di limitare i danni associati agli eventi di fine scenario.

¹⁰¹ Ad esempio procedure di controllo atte verificare situazioni di pericolo, o procedure progettuali ed amministrative che impediscano situazioni di pericolo.

¹⁰² Ad esempio organizzazione delle squadre di soccorso

¹⁰³ Ad esempio gestione del flusso del traffico, o gestione dei sistemi di ventilazione in condizioni di pericolo o di emergenza.

Ad esempio la realizzazione di un sistema di drenaggio adeguato può avere molta influenza sulla formazione (e sulle dimensioni) di una pozza di combustibile liquido o di una sostanza tossica che potrebbe formarsi a causa della perdita da un serbatoio o da una cisterna.

Oppure una piazzola di sosta o una corsia di emergenza, può avere grande influenza sulla formazione di un ingorgo provocato dal blocco di un veicolo in fiamme.

- Le barriere o misure di sicurezza attive, per il loro funzionamento, prevedono la loro attivazione manuale o automatica.

Tali barriere necessitano quindi sorgenti energetiche e di sorgenti di informazione per poter realizzare la loro funzione di sicurezza.

Queste misure influiscono sugli eventi che potrebbero derivare da un certo evento particolare e che ne aggravano le conseguenze.

La figura seguente schematizza la relazione fra le misure di prevenzione e protezione con gli eventi iniziatori critici, ed elenca alcune delle principali misure di sicurezza passive ed attive.

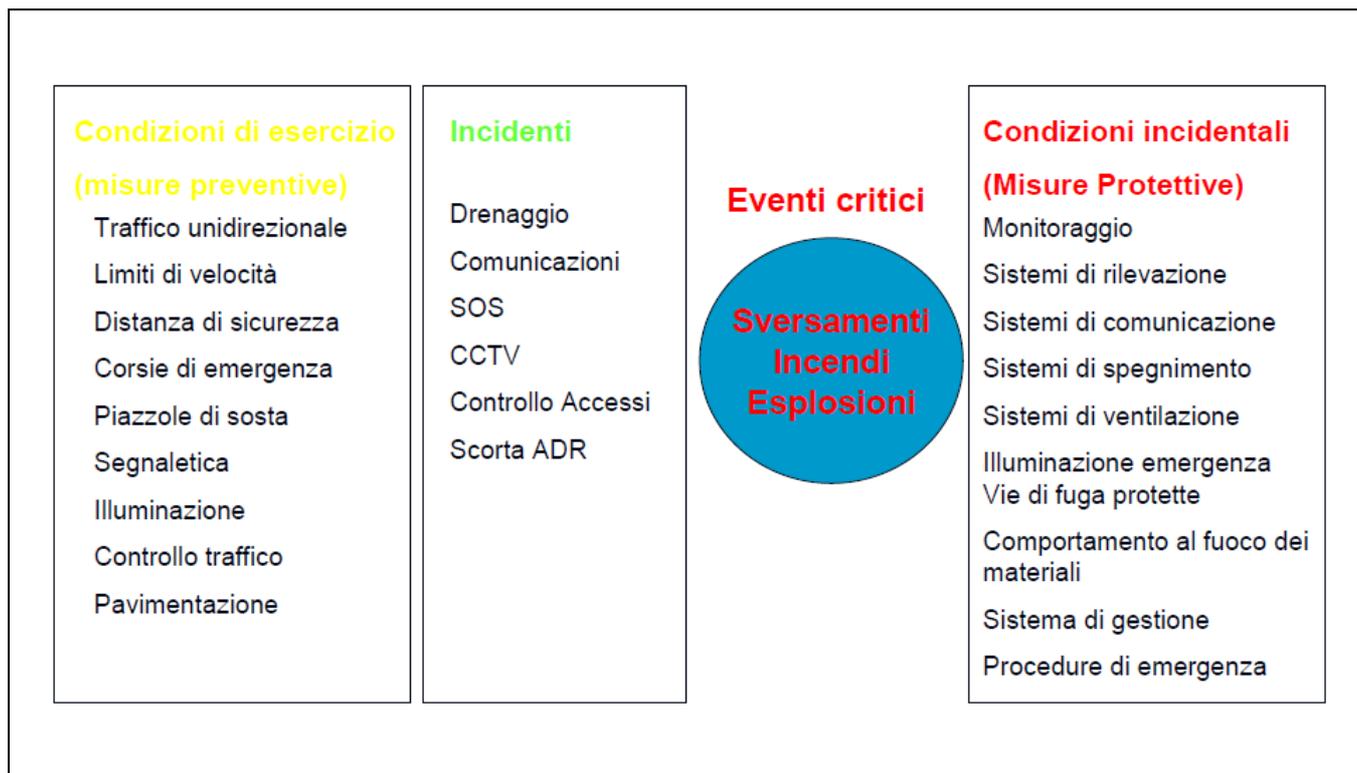


Figura 29: Relazione tra misure di sicurezza preventive – protettive ed eventi iniziatori critici [63]

Con riferimento alla nomenclatura e alla classificazione delle misure di sicurezza utilizzata nel metodo della progettazione della sicurezza secondo le linee guida, è possibile parlare anche di:

- MISURE DI SICUREZZA ALTERNATIVE
- MISURE DI SICUREZZA INTEGRATIVE
- MISURE DI SICUREZZA (E SOLUZIONI PROGETTUALI) INNOVATIVE

Queste misure devono essere adottate quando i parametri di sicurezza presentano anomalie o quando ci siano deficit nei requisiti minimi di sicurezza previsti dalla normativa (Direttiva Europea e Decreto n.264).

7.2 Misure di sicurezza antincendio

Gli impianti che realizzano le misure antincendio devono essere in grado di:

- Rilevare con rapidità l'incendio
- Estinguere con rapidità l'incendio

La rapidità di queste due fasi influenza enormemente le conseguenze che possono derivare da un incendio come è stato detto nel capitolo 2.

Gli impianti antincendio possono essere di due tipi:

- Impianti manuali
- Impianti automatici

Gli impianti antincendio manuali comprendono:

- Vasca per l'acqua che consentano una operatività alle squadre di intervento di 2 ore
- Tubazione in pressione (con intervallo di pressione 6-15 bar)
- Serie di idranti disposti lungo la galleria secondo una spaziatura costante e collocati in appositi alloggiamenti

Gli idranti [64] possono essere del tipo naspi o idranti a muro.

I **naspi** sono degli erogatori costituiti da una lancia di erogazione, collegata a una tubazione semirigida, avvolta su una bobina mobile metallica, e da una valvola di intercettazione manuale.

A differenza degli idranti a muro, i naspi non richiedono addestramento per il loro utilizzo e sono impiegati per operazioni di minor rischio rispetto agli idranti a muro.

I naspi vengono alloggiati in apposite nicchie o cassette disposte in modo da essere ben visibili e facilmente raggiungibili.

Gli **idranti a muro** sono degli erogatori costituiti da una lancia di erogazione, da un tubo flessibile con raccordi, e da una valvola di intercettazione manuale, e sono alloggiati in una cassetta o sono incassati nel muro e protetti da un portello di protezione.

Per quanto riguarda gli **estintori portatili**, questi devono essere installati con spaziatura regolare in modo da poter essere utilizzati dagli utenti e dal personale operativo della galleria per estinguere piccoli incendi prima dell'arrivo delle squadre antincendio.

Il livello costante dell'acqua nelle vasche viene garantito da sensori di livello, mentre la pressione della tubazione viene garantita da delle motopompe o da un serbatoio collocato in quota.

La tubazione può essere dotata di un sistema di riscaldamento disposto lungo il suo tracciato.

In riferimento all'erogazione idrica, il decreto legislativo n. 264, al paragrafo 2.11 prevede che: “deve essere prevista l'erogazione idrica per tutte le gallerie, inoltre vicino ai portali e all'interno delle gallerie devono essere disponibili idranti a intervalli non superiori a 250m.”

In più, nello stesso paragrafo si precisa che: “se l'erogazione idrica non è disponibile è obbligatorio verificare che sia assicurato in altro modo un approvvigionamento idrico sufficiente”.

Gli impianti antincendio automatici o semiautomatici possono essere classificati nel seguente modo:

- Impianti con sprinkler
 - Impianti a diluvio
 - Impianti a schiuma
- Gli impianti di spegnimento con sprinkler sono costituiti da una rete di tubazioni terminanti su degli ugelli denominati sprinkler montati sulla volta della galleria in modo da poter agire su tutta la larghezza della galleria.

I particolari di uno sprinkler comprendono: un corpo (a cui viene collegata la tubazione), un ugello, un deflettore e un sistema termosensibile.

Tale sistema termosensibile¹⁰⁴ si rompe (facendo cadere il tappo) al raggiungimento di una determinata temperatura, incrementata dalla risalita dei fumi verso la volta della galleria, permettendo quindi l'erogazione di acqua e l'estinzione dell'incendio.

Gli sprinkler funzionano in un intervallo di temperatura compreso fra 57°C e 77°C.

In commercio si possono trovare diversi modelli di sprinkler differenziati per il tipo di getto e per la direzione del getto rispetto alla loro collocazione nell'impianto.

Dunque negli impianti con sprinkler l'erogazione dell'acqua non avviene contemporaneamente da tutti gli sprinkler ma dai singoli sprinkler attivati.

La continuità dell'erogazione dell'acqua viene garantita dall'azionamento delle motopompe determinato dalla depressione provocata dalla rottura del sistema termosensibile.

¹⁰⁴ Costituito da un bulbo di vetro, o da un elemento metallico fusibile.

Gli impianti [65] con sprinkler possono funzionare anche a secco e in questo caso l'impianto viene pressurizzato con acqua o con gas inerti; in caso di incendio l'impianto viene riempito di acqua a seguito dell'intervento di apposite valvole.

Quest'ultima soluzione permette di ovviare al problema del congelamento dell'acqua, inoltre è possibile alternare il funzionamento a umido con quello a secco a seconda delle esigenze climatiche e a seconda della collocazione geografica della galleria.

Questi impianti possono anche prevedere un sistema di azionamento a consenso dell'operatore e quindi possono essere dotati di un sistema di preallarme che consente di evitare l'azionamento degli sprinkler in caso di falso allarme.

Il funzionamento dell'impianto a sprinkler è selettivo in quanto interessa solo l'area dell'incendio agevolando l'intervento delle squadre antincendio.

Il limite di questo impianto è la sua scarsa efficacia nel caso di incendi originati in presenza di liquidi infiammabili.

Nella figura seguente vengono mostrati i dettagli costruttivi di uno sprinkler.

Questo tipo di impianto non ha avuto grande applicazione nelle gallerie italiane ed è stato osteggiato in molte nazioni a causa dei problemi connessi con la destratificazione dei fumi.

Poiché la maggior parte degli incendi in galleria si originano nel vano motore, e quindi gli sprinkler si attivano solo dopo che l'incendio si è sviluppato, molti paesi preferiscono non usarli nelle gallerie.

Inoltre il vapore che si genera a seguito dell'azionamento degli sprinkler può ferire gli utenti, in più l'acqua (in assenza di additivi estinguenti) e in presenza di benzina e di altre sostanze infiammabili può provocare

esplosioni, come anche i gas che un incendio produce, se pur l'incendio viene spento dagli sprinkler, possono provocare esplosioni.

Per altro verso, gli impianti ad acqua ostacolano la propagazione del calore per irraggiamento in quanto il vapore prodotto dal riscaldamento dell'acqua si frappone fra l'incendio e l'ambiente circostante.

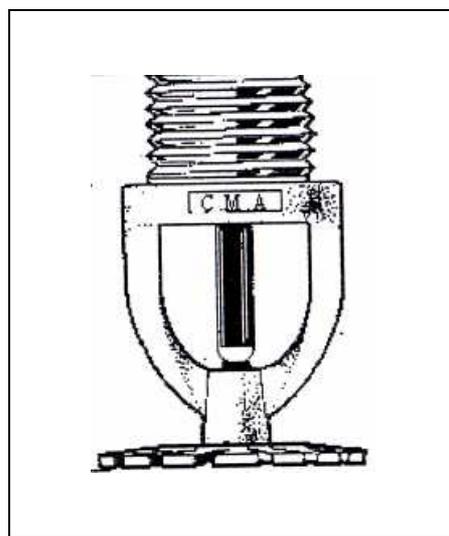


Figura 30: Dettagli costruttivi di uno sprinkler [66]

- Gli impianti di **spegnimento a diluvio** a differenza di quelli con sprinkler, generalmente devono prevedere anche un sistema di rilevamento dell'incendio e tale sistema serve per allertare la sala controllo che a sua volta decide di azionare l'impianto antincendio.

Con questo impianto l'acqua viene scaricata contemporaneamente da tutti gli ugelli.

In questa categoria di impianti rientrano anche gli **impianti a nebulizzazione** (water mist) che innalzando la pressione in un intervallo compreso fra 60 bar e 150 bar permettono la riduzione dell'acqua in gocce di diametro inferiore a 100 μm .

La formazione di goccioline di dimensioni molto fini permette l'estinzione sia per raffreddamento (sottrazione di calore) sia per soffocamento¹⁰⁵ in quanto la nebulizzazione consente una atmosfera molto rarefatta.

Questo sistema ostacola la trasmissione del calore per irraggiamento [67].

La caratteristica di pervasività di questo tipo di impianto lo rende molto efficace anche con incendi difficilmente raggiungibili richiedendo un limitato apporto di acqua.

L'efficacia degli impianti di spegnimento fin qui descritti può essere dedotta da apposite prove di incendio in scala oppure mediante studi di modellizzazione fluidodinamica avvalendosi anche di specifici programmi di simulazione numerica.

Nella figura seguente si può vedere il funzionamento di un impianto di spegnimento a diluvio in una prova di incendio in galleria:

¹⁰⁵L'estinzione di un incendio per soffocamento avviene mediante un processo di separazione del combustibile dal comburente (ossigeno).



Figura 31: Esempio di impianto di spegnimento a diluvio [68]

La figura seguente invece mostra l'efficacia di un impianto di spegnimento **water - mist** in relazione ad uno studio di modellizzazione numerica condotto sul comportamento degli incendi nella galleria del Monte Bianco.

Il grafico evidenzia come la curva che rappresenta il tasso di rilascio termico (HRR^{106}) di un incendio in funzione del tempo di sviluppo dell'incendio stesso risulti notevolmente più basso nel caso in cui sia presente un impianto di spegnimento water-mist che entri tempestivamente in funzione rispetto al caso in cui questo entri tardivamente in funzione o rispetto al caso in cui questo non entri in funzione o non sia presente.

¹⁰⁶ HRR è l'acronimo di heat release rate, cioè tasso di rilascio termico di un incendio e si misura in MW, in letteratura può anche essere indicato come RHR cioè rate of heat released.

Il tasso di rilascio termico è uno dei parametri utilizzati per descrivere un incendio.

L'abbassamento della curva rappresentata in figura, che si riferisce ad un incendio di 100 MW di potenza termica si traduce dunque in una riduzione notevole del rilascio termico in presenza di un impianto di spegnimento water-mist e questo comporta una mitigazione delle conseguenze prodotte dall'incendio in termini di danni alle persone e al sistema galleria.

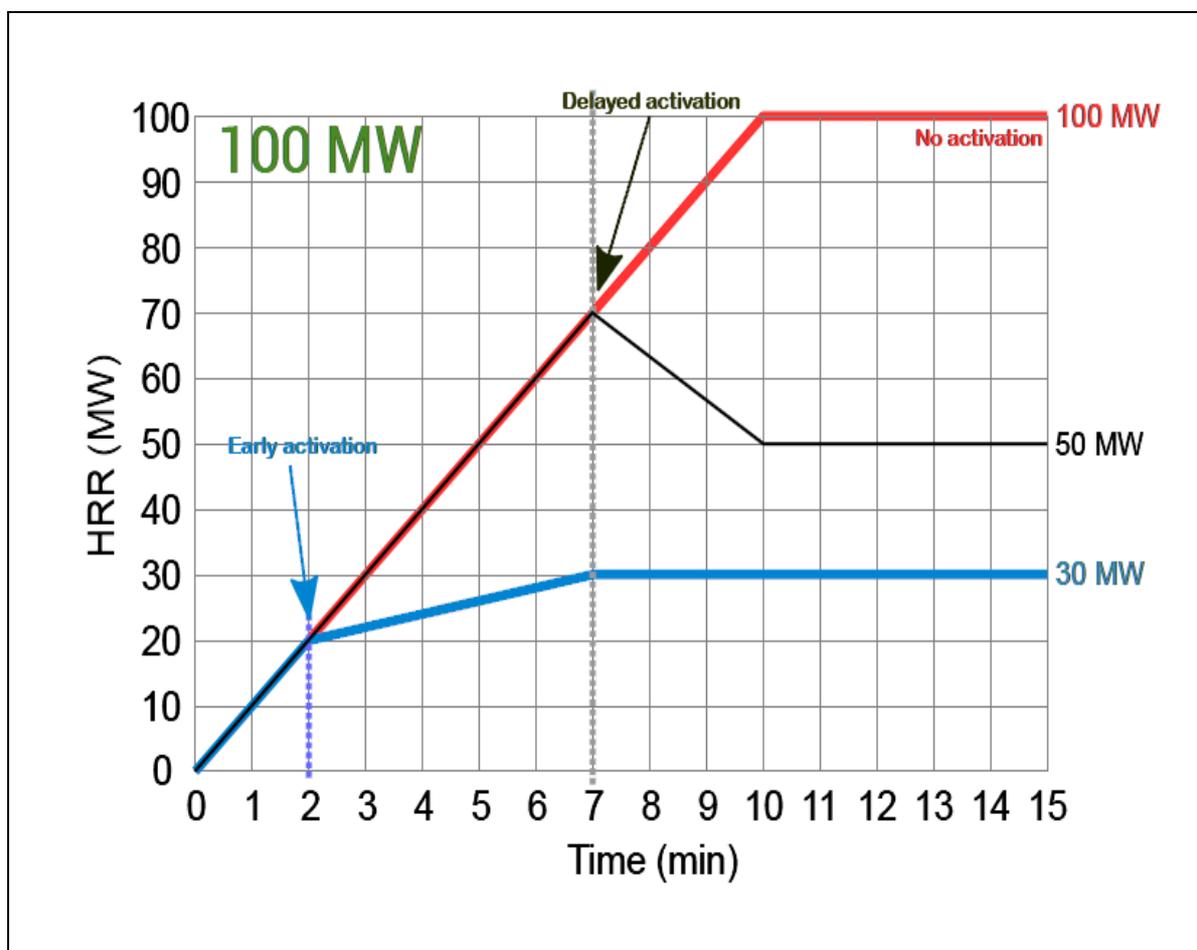


Figura 32: Influenza di un impianto Water-mist su un incendio simulato con modellazione numerica

[69]

- Gli impianti a schiuma¹⁰⁷ utilizzano una miscela di acqua e schiuma che rappresenta una sostanza estinguente che garantisce l'estinzione dell'incendio per soffocamento e raffreddamento senza possibilità di reinnesco e la riduzione della temperatura molto velocemente.

Inoltre la schiuma, che fuoriesce dagli ugelli dell'impianto a bassa pressione, montati sulla volta della galleria, permette una estinzione dell'incendio più rapida rispetto all'acqua.

Questo impianto permette di mitigare velocemente le conseguenze dell'incendio in modo da favorire l'esodo degli utenti e in modo da permettere un successivo intervento rapido delle squadre di antincendi.

La dislocazione degli ugelli sulla superficie della galleria è tale da indirizzare il flusso della schiuma sui veicoli ma anche sul manto stradale.

Il flusso di schiuma sul manto stradale arriva sia dagli ugelli posti in alto sulla volta della galleria in direzione verticale e in direzione leggermente inclinata rispetto alla verticale, sia in direzione orizzontale dagli ugelli posti poco sopra il livello stradale.

Gli ugelli posti in alto, indirizzano la schiuma sui veicoli con un getto più inclinato rispetto alla verticale.

L'erogazione della schiuma è garantito da un sistema di elettropompe, collocate in una stazione di pompaggio, che tramite una rete di tubazioni resistenti alla corrosione, alimentano gli ugelli.

L'impianto è dotato di un sistema di rilevazione automatica e di un sistema di rilevazione manuale.

Quest'ultimo permette l'azionamento dell'impianto antincendio a schiuma a seguito di una richiesta manuale tramite un pulsante di allarme.

¹⁰⁷ Una schiuma è un agente estinguente costituito da una soluzione di un liquido estinguente in acqua. Tale liquido estinguente a contatto con l'aria forma una schiuma.

Gli svantaggi che invece possono derivare dall'impiego di impianti di spegnimento a schiuma o a diluvio consistono nel fatto che l'erogazione dell'acqua e della schiuma possono ostacolare l'esodo degli utenti e nel fatto che tali impianti, analogamente agli impianti con sprinkler determinano la destratificazione dei fumi.

- Sono disponibili anche dei **sistemi di estinzione incendi ad impulso** che sono caratterizzati dall'elevatissima velocità (oltre 400 km/h) con cui l'acqua raggiunge l'incendio.

L'elevatissima velocità dell'acqua determina una sua elevata energia cinetica che permette la penetrazione in profondità dell'incendio e quindi una sua rapidissima estinzione.

Questo sistema è costituito da:

- Una lancia per l'estinzione ad aria compressa
- Un serbatoio contenente acqua pressurizzata a 6 bar
- Un serbatoio contenente aria compressa a 25 bar

Una valvola ad altissimo contenuto tecnologico permette all'aria compressa di imprimere la spinta all'acqua che, per l'elevatissima pressione viene ridotta in goccioline di dimensioni micrometriche¹⁰⁸ e raggiunge in profondità le fiamme su una superficie di ben 60 m², con un crollo della temperatura che può scendere da 1000°C a 40°C.

Appositi veicoli (moto, pick-up, ecc), possono essere equipaggiati con tale sistema ad impulso realizzando quindi degli impianti di spegnimento mobili ad impulso in grado di raggiungere velocemente i tronchi di galleria interessati dall'incendio.

¹⁰⁸ Le goccioline hanno un diametro di circa 100 micron

È importante osservare che gli impianti antincendio automatici sono molto costosi e richiedono molta manutenzione, altrettanto costosa, in quanto essi devono essere estremamente affidabili ed efficaci, dal momento che il loro funzionamento in caso di falso allarme potrebbe causare gravi incidenti.

Per questi motivi spesso si opta per sistemi antincendio semiautomatici che prevedono l'azionamento previo consenso degli addetti alla sorveglianza della galleria.

Recentemente è stato proposto un sistema robotizzato di estinzione di incendio in galleria [70] altamente innovativo costituito da un erogatore di una miscela di acqua e di schiuma estinguente montato su un carrello che tramite una rotaia scorre lungo la galleria permettendo l'estinzione rapida dell'incendio.

Questo sistema si basa sugli studi del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Padova.

Il sistema è dotato di una termo camera, oltre che di una telecamera normale e di un rilevatore di fumo in grado di rilevare un incendio ed anche di verificare la presenza di persone e può raggiungere una velocità di 40 km/h.

La miscela di acqua e schiumogeno viene indirizzata contro l'incendio con una notevole pressione.

Poiché il carrello erogatore si muove su una rotaia disposta lungo tutta la lunghezza della volta della galleria, è possibile raggiungere rapidamente l'incendio in presenza di traffico superando tale limite fisico che rappresenta una delle principali difficoltà per le squadre di soccorso in caso di incendio.

Il rifornimento dell'agente estinguente avviene in apposite stazioni di attracco disposte lungo il tracciato della rotaia con una spaziatura di 42 m.

La versatilità del sistema gli permette di aggiungere carrelli erogatori a seconda della lunghezza della galleria.

Inoltre il sistema può essere gestito sia automaticamente sia manualmente.

Essendo il sistema dotato di telecamera, può anche svolgere una funzione di videosorveglianza.

Un altro sistema innovativo prevede la formazione di muri d'acqua in corrispondenza dell'incendio e quindi dei fumi, in grado di creare una via di fuga.

Tale sistema consiste in una tubazione flessibile dotata di ugelli che erogano verticalmente l'acqua proveniente da appositi serbatoi, realizzando delle barriere d'acqua.

Le barriere d'acqua isolano il fumo in un tronco di galleria consentendo l'evacuazione della galleria, ed agevolando l'intervento delle squadre antincendio.

Esistono anche delle varianti dei sistemi a muro d'acqua che prevedono l'utilizzo di particolari erogatori in grado di generare getti radiali di acqua (muri d'acqua) permettendo di isolare tronchi di galleria interessati da incendio agevolando la fuga degli utenti.

È possibile usare più erogatori e con diversa disposizione, potendo quindi creare sia barriere verticali che orizzontali.

7.3 Influenza del design (progettazione) sul rischio di esplosioni e sul rischio di incendio

Per ridurre il rischio di esplosione nelle gallerie stradali, è possibile prendere molti spunti dalla progettazione delle gallerie ferroviarie in quanto nella progettazione di queste ultime, i progettisti cercano di risolvere i problemi connessi con la propagazione delle onde di pressione derivanti dall'alta velocità con cui i treni attraversano tali gallerie.

Avvalendosi di questa analogia, si è potuto constatare che con la realizzazione di **camini¹⁰⁹ di sfiatamento** è possibile ridurre il rischio connesso con le esplosioni nelle gallerie stradali in quanto la loro realizzazione permette appunto l'espulsione dei gas derivanti dall'esplosione e quindi permette l'attenuazione degli effetti dell'onda esplosiva che altrimenti sarebbe amplificata in un ambiente confinato quale è la galleria.

In particolare, i camini che evidenziano questi vantaggi sono i **camini di sfiatamento corti** che negli ultimi anni sono stati in particolare realizzati per le gallerie della metropolitana e da cui si è preso spunto per la progettazione delle gallerie stradali.

Gli studi in merito a questo tipo di design delle gallerie hanno evidenziato che i veicoli vicini alla zona di esplosione aumentano la turbolenza e quindi riducono la DDT distance.

Inoltre si è visto che, per una galleria a due fornici, e con **due camini corti**, come quella che si vede nella figura seguente, l'esplosione danneggia e

¹⁰⁹ I camini, laddove presenti, hanno anche lo scopo di agevolare l'espulsione dei fumi e dei gas tossici prodotti nel caso dovessero verificarsi incendi, e di agevolare l'espulsione dei gas di scarico dei veicoli migliorando le condizioni dell'aria in galleria.

Infatti, la presenza di camini lungo il tracciato della galleria, accorcia il percorso di espulsione dei fumi (o di parte di essi) che, in loro assenza, dovrebbero percorrere distanze lunghe per arrivare alle sole vie di uscite rappresentate dai portali.

impedisce l'utilizzo delle porte di comunicazione fra i due forni ed anche le porte di collegamento dei due forni con i cunicoli di emergenza. Questo aspetto dunque deve essere tenuto in grande considerazione durante la fase di progettazione di una galleria relativamente ai rischi di esplosione.

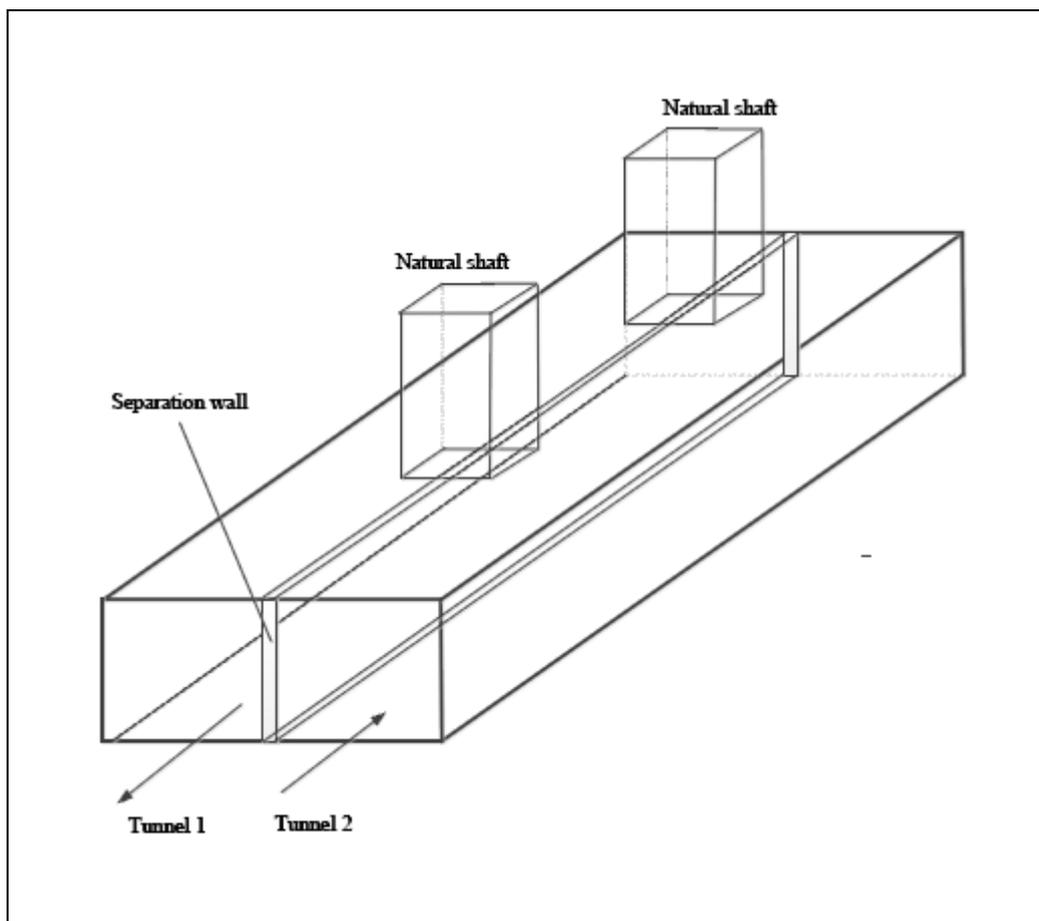


Figura 33: Esempio di design di galleria a due forni con camini corti di sfiatamento [Brandforsk 2018]

7.4 Influenza del drenaggio e del design sul rischio di incendio e sul rischio di sversamento di sostanze tossiche in fase liquida

Per quanto riguarda in generale il rischio di incendio connesso al pool fire¹¹⁰, questo, può essere ridotto con una adeguata progettazione della pendenza longitudinale e della pendenza trasversale della galleria e con un corretto studio del drenaggio dei liquidi, prevedendo una adeguata spaziatura dei pozzetti di drenaggio.

Il sistema di drenaggio e la pendenza dalla galleria hanno anche grande influenza sul rischio di sversamento (rilascio in fase liquida) di sostanze tossiche.

A sua volta il drenaggio dei liquidi è influenzato dalla curvatura della galleria. La regolamentazione di questo aspetto della progettazione della sicurezza è prevista dal Decreto Legislativo n. 264 nell'allegato¹¹¹ 2, al paragrafo 2.6.1, dove si dice che: "se il trasporto di merci pericolose è autorizzato, il drenaggio di liquidi infiammabili e tossici è effettuato tramite canali di scolo appositamente realizzati o altri dispositivi all'interno delle sezioni trasversali delle gallerie."

Inoltre in questo paragrafo si precisa che il drenaggio deve essere tale da impedire gli incendi e la propagazione di liquidi infiammabili e tossici all'interno di un fornice e tra i fornici.

Nel paragrafo 2.6.2 dell'allegato 2 si legge anche che: "se nelle gallerie esistenti non è possibile soddisfare i requisiti previsti dal paragrafo 2.6.1, o è possibile soddisfarli solo a un costo sproporzionato si potrà decidere se

¹¹⁰ Invece il rischio connesso al jet fire può essere ridotto con un adeguato studio sulle dimensioni e sul numero delle valvole di emergenza dei serbatoi (valvole o dispositivi PRD).

¹¹¹ L'allegato 2 del decreto legislativo n. 264 infatti regola le misure di sicurezza e definisce ed elenca i requisiti minimi di sicurezza delle gallerie stradali appartenenti alla rete stradale dei trasporti transeuropea.

autorizzare il trasporto di merci pericolose sulla base di un'analisi dei pertinenti rischi”.

In generale i moderni impianti [71], [72] di drenaggio sono costituito da un collettore¹¹² (disposto sotto il calcestruzzo e in pendenza, al margine della carreggiata) che raccoglie i liquidi infiammabili e tossici mediante appositi pozzetti o caditoie e li convoglia in una vasca o serbatoio di raccolta.

Il liquido infiammabile e tossico che arriva nel serbatoio di raccolta viene separato dalle acque di infiltrazione della galleria e smaltito in sicurezza.

Il collettore è realizzato in polietilene ad alta densità (che viene indicato con l'acronimo PEAD) e l'evacuazione dei liquidi infiammabili e tossici avviene mediante l'azionamento di una pompa e la spaziatura dei pozzetti di raccolta è connessa con il livello di rischio derivante dallo sversamento dei liquidi pericolosi.

Un maggior numero di pozzetti (che possono essere anche essi in polietilene) infatti riduce l'estensione della superficie di sversamento del liquido pericoloso e quindi i pericoli ad essa connessi.

Oggigiorno i moderni impianti di drenaggio sono completamente automatici e il loro azionamento avviene a seguito dell'incremento di pressione dell'aria all'interno del collettore di raccolta dovuto alla presenza dei liquidi pericolosi.

¹¹² O condotto di raccolta o canale di scolo.

7.5 Aspetti strutturali (design) su cui operare in fase di progettazione e di adeguamento per aumentare la sicurezza

In relazione all'influenza del design della galleria, bisogna tener presente che la larghezza della fascia spartitraffico delle gallerie bidirezionali ha molta influenza sulla sicurezza in galleria stessa in quanto è collegata all'aumento della frequenza di incidenti in galleria.

Laddove è possibile le gallerie dovrebbero prevedere¹¹³ un fornice per ogni senso di marcia in modo da eliminare il rischio di collisioni frontali fra i veicoli che hanno una grande influenza sugli ingorghi che derivano da esse, anche in relazione alla possibilità del blocco¹¹⁴ improvviso di un veicolo in fiamme in assenza di corsie di emergenza (o nell'impossibilità di un veicolo in fiamme di raggiungere una piazzole¹¹⁵ di sosta).

La realizzazione di tali barriere spartitraffico può contribuire a ridurre rischi di questo tipo.

Tuttavia la realizzazione di barriere fisse spartitraffico o di barriere fisse fra le corsie e i marciapiedi ostacolano l'intervento delle squadre di soccorso.

La realizzazione di tali barriere deve essere compatibile con le dimensioni trasversali della galleria.

Oggigiorno sono allo studio misure di sicurezza che prevedono la realizzazione di barriere spartitraffico mobili selettive da impiegare nelle gallerie bidirezionali.

¹¹³ I dati inerenti agli incidenti in galleria evidenziano che la percentuale degli incidenti nelle gallerie bidirezionali a singolo fornice supera di circa il 40% la percentuale di incidenti nelle gallerie unidirezionali a doppio fornice.

¹¹⁴ Il blocco di un veicolo, crea ingorghi pericolosi ed induce gli utenti ad azzardare manovre pericolose sia in conseguenza del blocco, e maggior ragione, in presenza di un evento incidentale o di un evento di incendio connesso con tale blocco come è stato dimostrato da numerosi incidenti occorsi in galleria.

¹¹⁵ Le piazzole di sosta a loro volta riducono il rischio di collisione qualora, a causa di un guasto improvviso un veicolo avesse la necessità di fermarsi.

Lo scopo di tali barriere spartitraffico vuole essere quello di impedire le collisioni frontali nelle gallerie bidirezionali.

La curvatura della galleria in fluisce visuale e sulla possibilità di adeguamento della velocità da parte dall'utente, e questo scopo la segnaletica, l'illuminazione e i colori possono contribuire a ridurre i rischi che derivano da questi elementi.

Riguardo alla pendenza longitudinale della galleria occorre anche tener presente che la frequenza dei guasti dei veicoli in gallerie che hanno pendenza longitudinale superiore al 2,5%, è di ben 5 volte superiore alla frequenza dei guasti di veicoli in gallerie con pendenze molto basse.

7.6 La ventilazione meccanica

A differenza della ventilazione spontanea (o naturale), che si instaura in galleria a causa della differenza di pressione fra i portali¹¹⁶ della stessa galleria a causa delle diverse condizioni termodinamiche nelle zone limitrofe ai due portali, la ventilazione meccanica (o forzata) costituisce una misura di sicurezza attiva.

Tale misura è adottabile per **migliorare le condizioni dell'aria all'interno della galleria**¹¹⁷ (abbattere l'inquinamento atmosferico) durante l'esercizio della galleria, oppure **in caso di emergenza**, per migliorare le condizioni di visibilità

¹¹⁶ La ventilazione spontanea e la ventilazione meccanica permettono quindi di distinguere il portale di afflusso dal portale di deflusso della corrente d'aria.

¹¹⁷ In questo caso si parla anche di **ventilazione sanitaria**.

ridotta e per favorire l'espulsione dei fumi e dei gas tossici, a causa del verificarsi di un incendio.

Questa misura di sicurezza si attua allestendo un impianto che prevede l'installazione di ventilatori¹¹⁸ assiali (jet fans) in corrispondenza della volta della galleria, il cui scopo è quello di incrementare o ridurre la velocità del flusso d'aria in galleria e quindi favorire l'espulsione dell'aria inquinata¹¹⁹ (a causa dei gas di scarico) o dei fumi e dei gas tossici in caso di incendio.

La figura seguente mostra la disposizione in galleria dei jet fans.

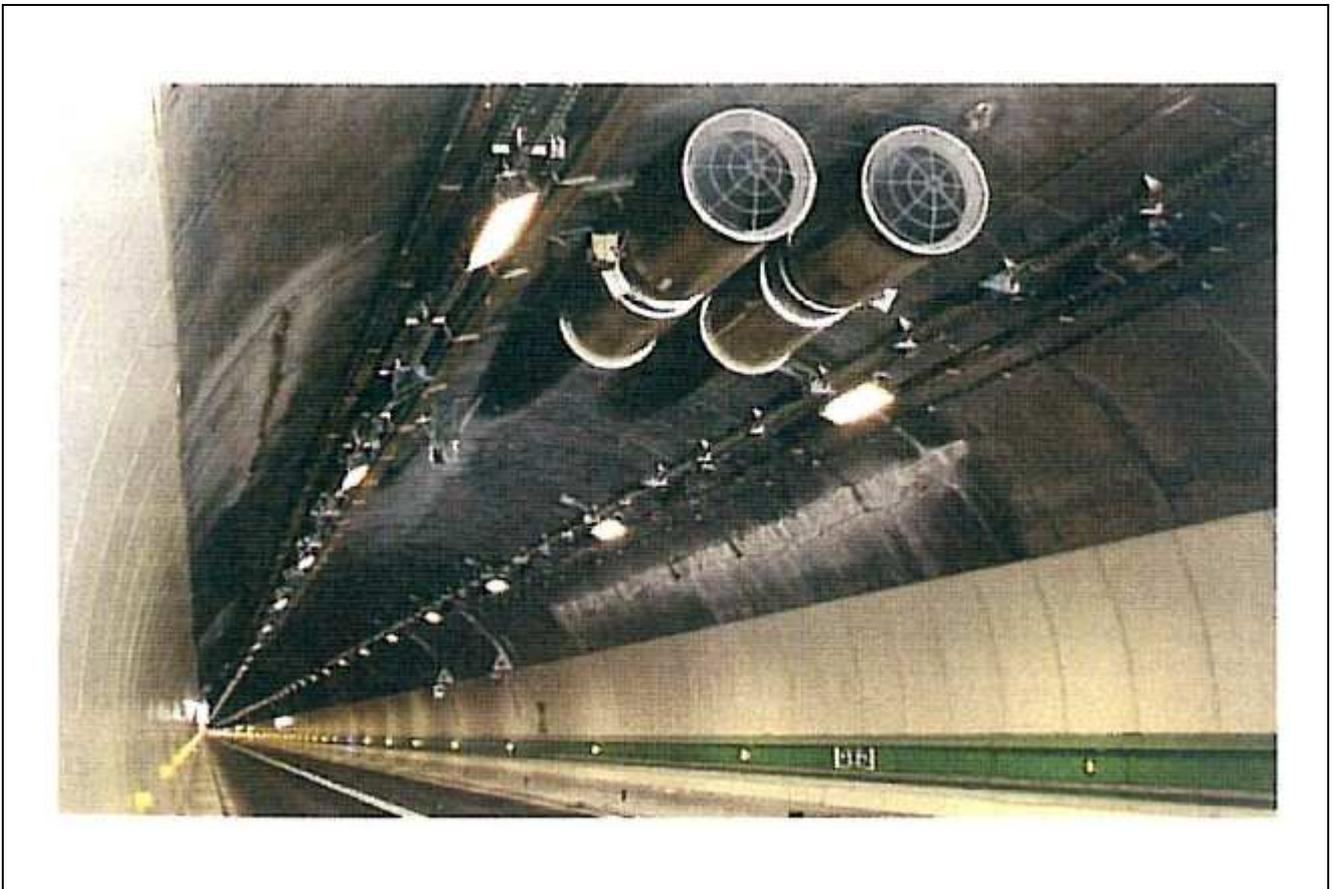


Figura 34: Jet fans della Galleria del Monte Bianco [73]

¹¹⁸ O acceleratori

¹¹⁹ Qualora le condizioni di eccessivo traffico, o di una eccessiva concentrazione di veicoli pesanti fossero tali da non consentire al flusso spontaneo dell'aria di assolvere a questo compito.

L'allegato 2 del Decreto Legislativo del 5 ottobre 2006, n264, al paragrafo 2.9.2 prevede l'obbligo di installazione di un impianto di ventilazione meccanica in tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia.

Inoltre al paragrafo 2.9.3 si precisa che per le gallerie con traffico bidirezionale e/o unidirezionale **congestionato**¹²⁰, con le caratteristiche elencate, è ammissibile l'installazione di un impianto di ventilazione longitudinale solo nel caso in cui l'analisi di rischio lo giustificasse altrimenti devono essere adottate misure di sicurezza specifiche come:

- Un'adeguata gestione del traffico
- Minori distanze fra le uscite di emergenza
- Estrazioni intermedie dei fumi

La distribuzione ed il numero dei ventilatori assiali varia a seconda delle portate d'aria necessarie e della lunghezza della galleria.

Tale impianto permette anche di ridurre il rischio connesso al rilascio di sostanze tossiche in fase gassosa favorendone la diluizione e l'espulsione.

¹²⁰ In relazione ai calcoli da effettuare per il dimensionamento degli impianti di ventilazione da usare in condizioni di esercizio ordinario per la diluizione o per l'estrazione degli inquinanti presenti in galleria, quando si parla di traffico congestionato o bloccato o fluido, occorre attribuire a tali tipologie di traffico dei valori di velocità di riferimento dei veicoli.

Quindi ad esempio si parlerà di traffico congestionato con una velocità di riferimento dei veicoli di 20km/h o ad esempio di traffico fluido con velocità di riferimento di 100km/h, o ad esempio si parlerà di traffico bloccato associando una densità di veicoli per chilometro di galleria.

In relazione a ciascuna delle tipologie di traffico elencate l'impianto di ventilazione dovrà essere in grado di generare (adattare) la portata d'aria necessaria per diluire o estrarre gli inquinanti presenti in galleria.

Ai fini dell'espulsione dei gas di scarico e quindi del ricambio di aria in galleria, l'impianto di ventilazione deve quindi instaurare un flusso regolare della corrente d'aria.

Inoltre il ricambio d'aria viene agevolato dalla presenza di condotti (o cunicoli) che mediante bocchette disposte lungo la galleria, con una opportuna spaziatura permettono un afflusso di aria pulita in galleria.

La presenza di un altro condotto o cunicolo, mediante bocchette di espulsione disposte in corrispondenza della volta può permettere l'agevolazione dell'espulsione dell'aria inquinata dai gas di scarico.

Generalmente, in caso di incendio, i ventilatori hanno la funzione di ridurre la velocità della corrente d'aria in modo da impedire la desertificazione dei fumi. In alcuni casi è necessario passare dalla gestione automatica dei ventilatori alla gestione manuale proprio per garantire la stratificazione dei fumi.

Se la velocità dell'aria determinata dal funzionamento dei ventilatori, supera la velocità critica, i fumi si propagano solo nel verso della corrente d'aria.

Tuttavia se la velocità della corrente d'aria è troppo alta rispetto alla velocità critica si verificano processi di turbolenza che favoriscono la de stratificazione dei fumi.

La velocità ideale della corrente d'aria perché l'impianto di ventilazione possa assolvere correttamente alla sua funzione, cioè nel modo appena descritto, deve essere nell'intervallo compreso fra 1m/s e 1,5 m/s.

Dunque l'allestimento dell'impianto di ventilazione longitudinale è più indicato per le gallerie con traffico unidirezionale e di elevata lunghezza e per le gallerie per le quali non si preveda un elevato congestionamento del traffico.

Per queste gallerie i ventilatori assiali infatti permettono, in caso di incendio, di indirizzare il flusso dei fumi in direzione opposta al flusso del traffico, invece

in una galleria bidirezionale a singolo fornice i veicoli che procedono concordemente al verso dei fumi non ricevono vantaggio dalla ventilazione meccanica assiale.

Tuttavia è anche possibile trovare gli impianti di ventilazione assiale in gallerie a singolo fornice con traffico bidirezionale; in questo caso occorre prevedere installare più ventilatori, o prevedere ventilatori più potenti, per vincere il flusso d'aria contrario (a quello generato dai ventilatori), generato dai veicoli che procedono sull'altra corsia.

A seconda del campo di velocità richiesto, i ventilatori assiali possono essere monostadio o multistadio; i ventilatori multistadio aumentano la velocità dell'aria al passaggio di questa da ogni serie di palettature.

La modalità automatica dell'impianto di ventilazione, generalmente prevista solo per l'espulsione dei gas di scarico e non per le emergenze di incendio, deve essere impostata in modo da conciliarsi con i tempi di usura dei ventilatori e con i periodi di maggior congestionamento del traffico.

Il surriscaldamento dei ventilatori deve essere evitato proprio per garantire l'affidabilità e la disponibilità degli stessi soprattutto nei casi di emergenza cioè quando in caso di incendio devono essere usati per ridurre la velocità della corrente d'aria.

Inoltre i ventilatori devono possedere buone caratteristiche di resistenza al fuoco che ne consentano l'utilizzo in presenza di incendio per molto tempo.

Inoltre i ventilatori più tecnologicamente innovativi possono anche essere di tipo reversibile, possono cioè invertire il senso di rotazione della girante e quindi possono invertire il verso della corrente d'aria da essi generata.

In più, i ventilatori possono anche disporre di un sistema silenziatore.

È possibile inoltre prevedere per i jet-fans il montaggio di trasduttori sismici che permettono, con l'ausilio di appositi sensori, il controllo delle vibrazioni al fine di prevenire il loro distacco dalla volta della galleria.

Una ulteriore misura adottata per impedire l'eventuale distacco dei jet-fans consiste nella applicazione di ancoraggi supplementari alla volta.

La grandezza fondamentale che deve essere considerata nella fase della progettazione dell'impianto di ventilazione è la spinta generata dai ventilatori che scaturisce dalla movimentazione dell'aria determinata dagli stessi ventilatori stessi.

La ventilazione longitudinale, sia per il ricambio d'aria¹²¹ (diluizione o estrazione degli inquinanti), sia per l'estrazione dei fumi in caso di esercizio di emergenza può avvenire in presenza di camini intermedi dei quali si è già detto nelle pagine precedenti.

I camini intermedi possono quindi sia agevolare l'estrazione degli inquinanti in galleria durante l'esercizio normale della galleria sia agevolare l'estrazione dei fumi e dei gas tossici durante l'esercizio in emergenza.

La figura seguente mostra l'estrazione dei fumi mediante un camino intermedio durante una prova di incendio in galleria.

¹²¹ Quindi in condizioni di esercizio ordinario.

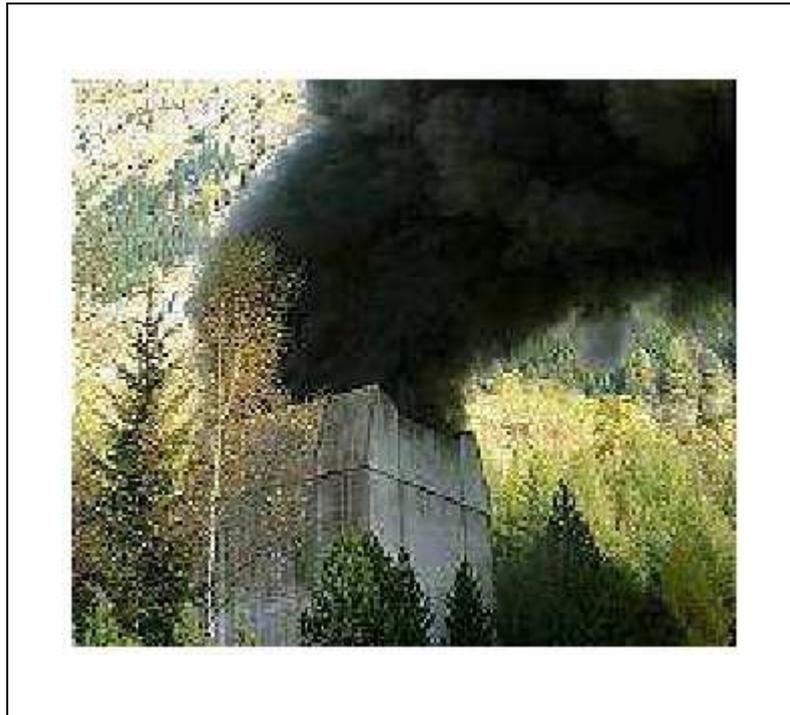


Figura 35: Camino intermedio utilizzato in una per l'estrazione dei fumi durante l'esercizio in emergenza della galleria [74]

Anche all'interno dei camini intermedi è possibile installare dei ventilatori (jet-fans) per facilitare ulteriormente l'estrazione degli inquinanti o dei fumi (a seconda che si operi in esercizio ordinario o in esercizio di emergenza) e l'ingresso dell'aria.

Generalmente però, per le gallerie a singolo fornice con traffico bidirezionale, e per le quali si prevede un elevato congestionamento del traffico, si usano impianti di ventilazione semitrasversale o trasversale.

Questo tipo di ventilazione sfrutta il fatto che, i gas di scarico o i fumi o i gas tossici tendono naturalmente a portarsi in corrispondenza della volta della galleria.

Dunque questo tipo di ventilazione prevede la realizzazione di condotti che permettono all'aria di affluire da bocchette (con opportuna spaziatura) generalmente poste in basso.

D'altro canto questo tipo di ventilazione prevede la realizzazione di bocchette di deflusso dei gas di scarico o dei fumi, poste in corrispondenza della volta da dove vengono convogliati in altri condotti e quindi all'esterno della galleria. Generalmente la ventilazione trasversale è prevista per le gallerie di elevata lunghezza a singolo fornice bidirezionali per evitare o ridurre i problemi connessi alla propagazione dei fumi.

È anche possibile trovare sistemi di ventilazione semitrasversale che combinano entrambe le tecniche descritte.

Generalmente gli impianti di ventilazione trasversale in condizioni di esercizio servono per agevolare l'espulsione dei gas di scarico, mentre in caso di incendio vengono usati per ridurre la velocità della corrente d'aria e quindi per favorire la stratificazione dei fumi appunto immettendo aria più fredda (rispetto ai fumi caldi) e pulita dal basso.

Nel caso in cui, in caso di incendio, gli impianti di ventilazione trasversale dovessero essere utilizzati anche per estrarre i fumi, si opera lasciando aperte le bocchette (o serrande) nella zona della galleria interessata dall'incendio, per una lunghezza di circa 500 m, e si chiudono tutte le altre serrande; questa procedura è illustrata nella figura seguente.

Questa procedura permette di convogliare i fumi e quindi di facilitarne l'estrazione.

Per le gallerie più trafficate, in cui si prevedono più ingorghi questa lunghezza di manovra è di circa 300 m.

In particolare gli impianti di ventilazione semitrasversali [75] in genere prevedono o solo il condotto in mandata o solo il condotto in ripresa, e quest'ultima soluzione è quella più diffusa.

Con il primo impianto l'aria entra dal condotto di mandata ed esce dai portali mentre con il secondo impianto l'aria entra dai portali ed esce dai condotti di ripresa.

È anche possibile parlare di sistemi **semitrasversali reversibili**, ormai in disuso¹²², per quali lo stesso condotto svolge sia la funzione di immissione di aria in esercizio ordinario sia la funzione di espulsione dei fumi in esercizio di emergenza.

Sia gli impianti di ventilazione trasversali sia quelli semitrasversali possono operare in concomitanza con un impianto di ventilazione longitudinale con jet-fans.

La seguente figura schematizza l'operazione di estrazione dei fumi con un impianto di ventilazione semitrasversale con condotto in ripresa.

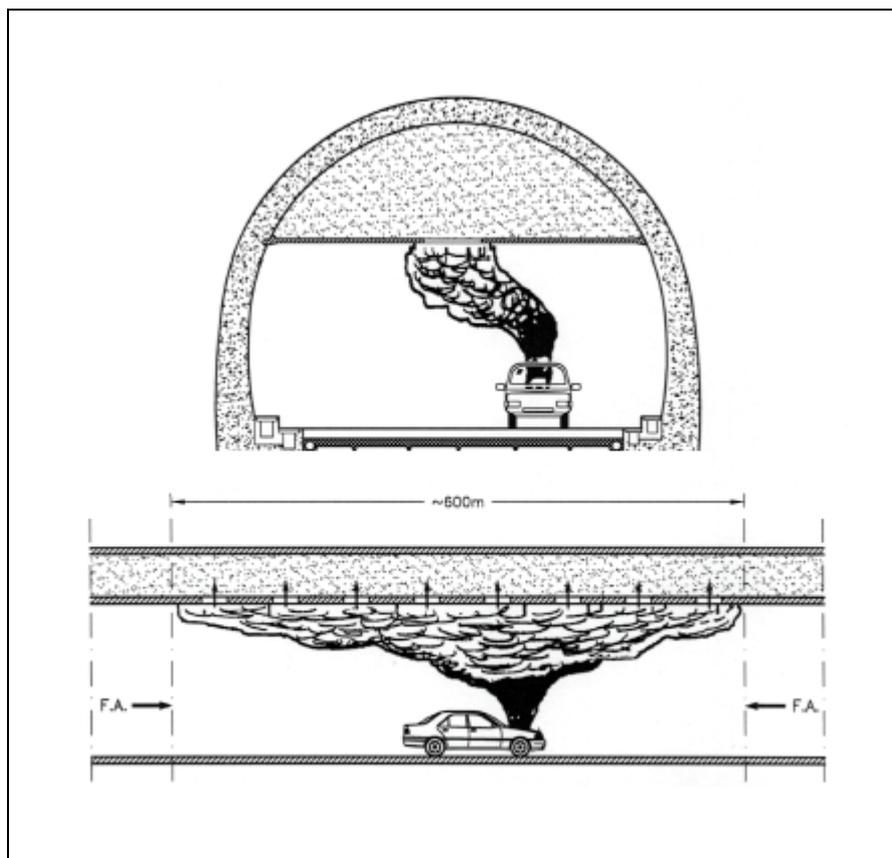


Figura 36: Operazione di estrazione dei fumi con impianto di ventilazione semitrasversale [76]

¹²² A causa dell'inerzia che questo impianto presenta per l'inversione del flusso all'interno del condotto in caso di esercizio in emergenza.

La figura seguente mostra in particolare lo schema di ventilazione trasversale del Monte Bianco la cui descrizione è stata anticipata nel paragrafo 3.1.1. Il disegno della sezione trasversale in corrispondenza di una piazzola di sosta mostra il percorso dell'aria e dei gas di scarico.

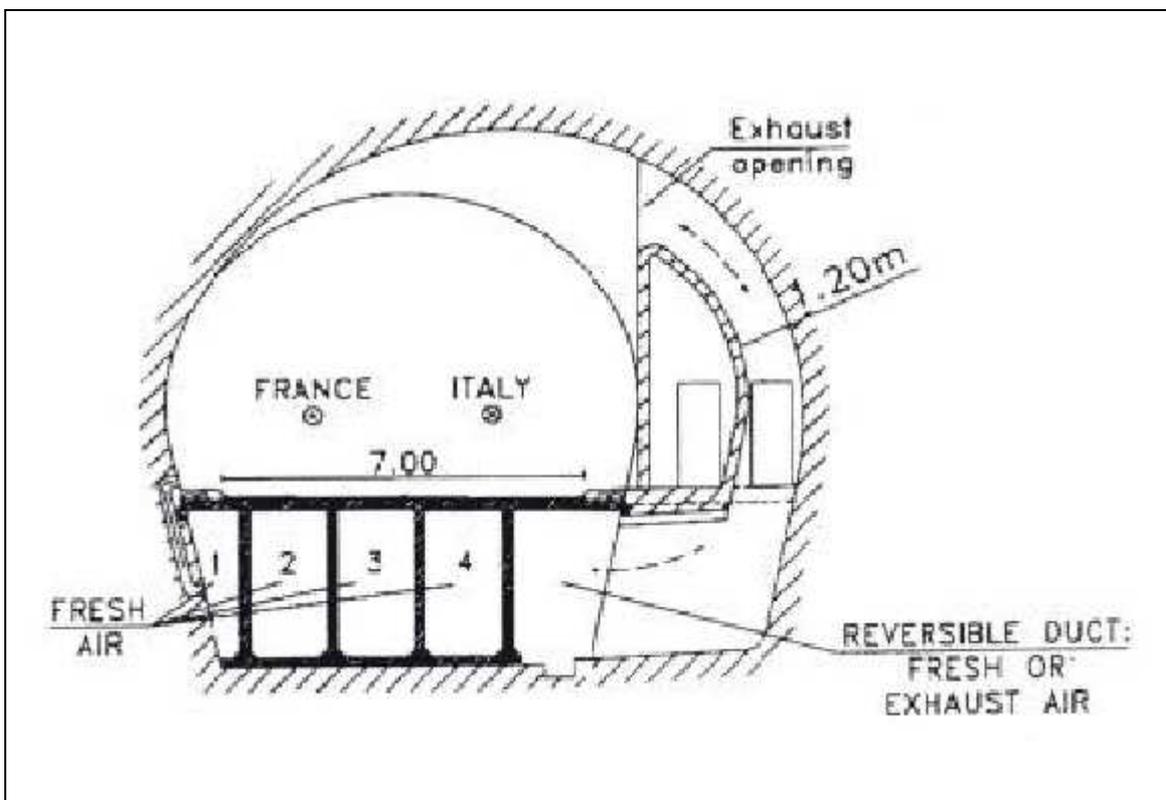


Figura 37: Condotti di afflusso dell'aria e di deflusso dei gas di scarico della galleria del Monte Bianco [77]

7.7 L'illuminazione in galleria

La progettazione [78] degli impianti di illuminazione in galleria deve considerare in particolare gli effetti prodotti sugli utenti dall'attraversamento della galleria nella fase di ingresso, nel percorso intermedio compreso fra i portali, e nella fase di uscita dalla galleria.

In galleria, e specialmente nella zona di ingresso, il campo visivo dell'utente risulta molto limitato se paragonato con quello nei tratti di strada a cielo aperto.

Questa situazione, a cui si aggiunge la variazione di illuminazione, genera nell'utente maggiore difficoltà nella valutazione delle distanze¹²³ e delle velocità, e nel riconoscimento degli ostacoli durante l'attraversamento della galleria.

Dunque l'illuminazione adeguata in ciascun tratto di galleria (in relazione anche alle fasce orarie) contribuisce a ridurre queste difficoltà.

Gli studi [79] in materia mostrano come il tasso di incidentalità (frequenza degli incidenti) in galleria abbia una forma collinare in corrispondenza dei due portali e presenti un avvallamento in corrispondenza della zona intermedia della galleria.

Tale andamento viene riportato nella figura seguente:

¹²³ Ad esempio le distanze di sicurezza o le distanze dei veicoli che procedono in senso opposto.

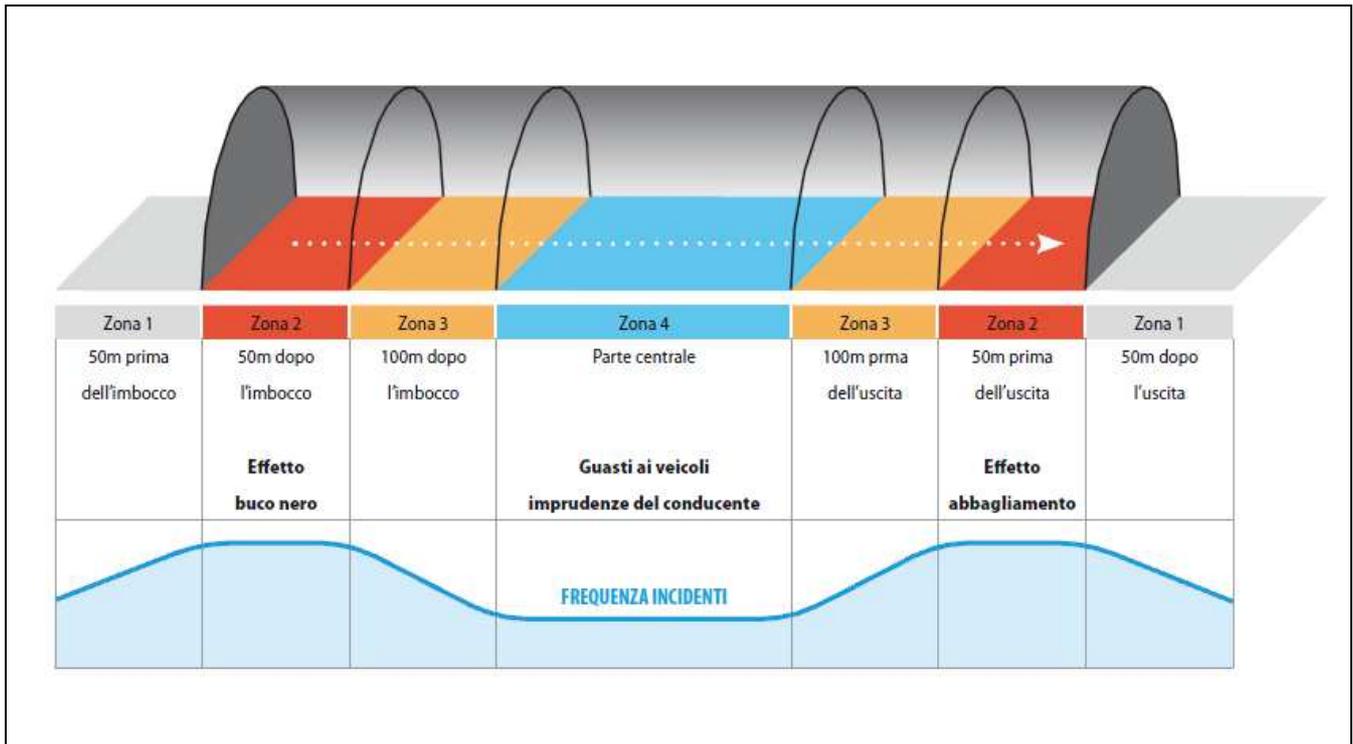


Figura 38: Frequenza degli incidenti nei diversi tronchi di galleria [80]

Tali studi dunque mostrano che gli incidenti che occorrono nella fase di ingresso in galleria sono influenzati dal cosiddetto “effetto buco nero” e cioè dal brusco passaggio da un ambiente aperto ad uno estremamente confinato e dall’andamento unidirezionale e in alcuni casi curvilineo proprio della galleria.

D’altro canto, gli incidenti che occorrono nella fase di uscita dalla galleria, sono influenzati “dall’effetto abbagliamento”.

Nella fase di attraversamento intermedio della galleria gli incidenti invece sono maggiormente influenzati dai guasti dei veicoli ed al comportamento degli utenti.

Si tenga però presente che anche la curvatura della galleria, nei tratti intermedi della galleria, incide sulla visuale e sulla capacità di reazione da parte degli utenti alle situazioni di pericolo.

La grandezza che deve essere considerata in fase di progettazione e in fase di analisi di rischio è la luminanza che è la quantità di luce che percepisce l'occhio dell'utente riflessa dalle superfici della galleria.

“La luminanza è definita come il rapporto fra l'intensità luminosa emessa da una sorgente luminosa nella direzione dell'osservatore e l'area apparente della superficie emittente”, e si misura in cd/m^2 , dove cd è la candela che è l'unità di misura dell'intensità luminosa [81].

La riduzione della luminanza in galleria può essere causata dalla polvere (e dalle particelle solide contenute nei gas di scarico) che si deposita sui proiettori e sulle pareti della volta della galleria.

Dunque la progettazione dell'illuminazione in galleria dovrà prevedere un incremento della luminanza in corrispondenza dei tronchi di galleria in ingresso e in uscita.

Questo aspetto della sicurezza in galleria può essere notevolmente migliorato adottando le moderne tecnologie che prevedono l'allestimento di impianti con **proiettori a led** che impediscono la formazione delle zone d'ombra sulle pareti della volta della galleria e quindi migliorando “l'uniformità longitudinale¹²⁴ [82]” dell'illuminazione in galleria, oltre a garantire un notevole risparmio energetico.

Il flusso luminoso¹²⁵ emesso dai led rispetto ai sistemi di illuminazione tradizionali è maggiore, con gli impianti a led si possono installare potenze inferiori rispetto agli impianti tradizionali ed ottenere gli stessi effetti in termini di luminanza, inoltre i led sono caratterizzati anche da un elevato tempo di durata e ciò influisce notevolmente sui costi di gestione degli impianti a parità di risultati [83].

¹²⁴ “Che è data dal rapporto fra la luminanza minima e la luminanza massima misurate lungo l'asse della carreggiata.”

¹²⁵ Il flusso luminoso è la quantità di luce prodotta da una sorgente luminosa.

Gli impianti di illuminazione a led hanno anche il vantaggio di poter essere regolati in relazione al volume di traffico e alla composizione del traffico presente.

Questi impianti sono dotati di una centralina di controllo dei proiettori che permette il loro controllo da remoto tramite un software che può regolare la luminanza in galleria avvalendosi dei dati sui flussi di traffico nelle varie fasce orarie.

Altri sistemi altamente innovativi di illuminazione in galleria prevedono l'utilizzo di **sistemi di controllo di luminanza wireless**.

Tali sistemi permettono il rilevamento della luminanza esterna mediante appositi sensori di luminanza, che viene trasmessa al primo proiettore di uno dei due portali e successivamente agli altri proiettori determinando un adeguamento di illuminazione in tutti i proiettori della galleria.

La figura seguente illustra il principio di funzionamento di questo impianto wireless:

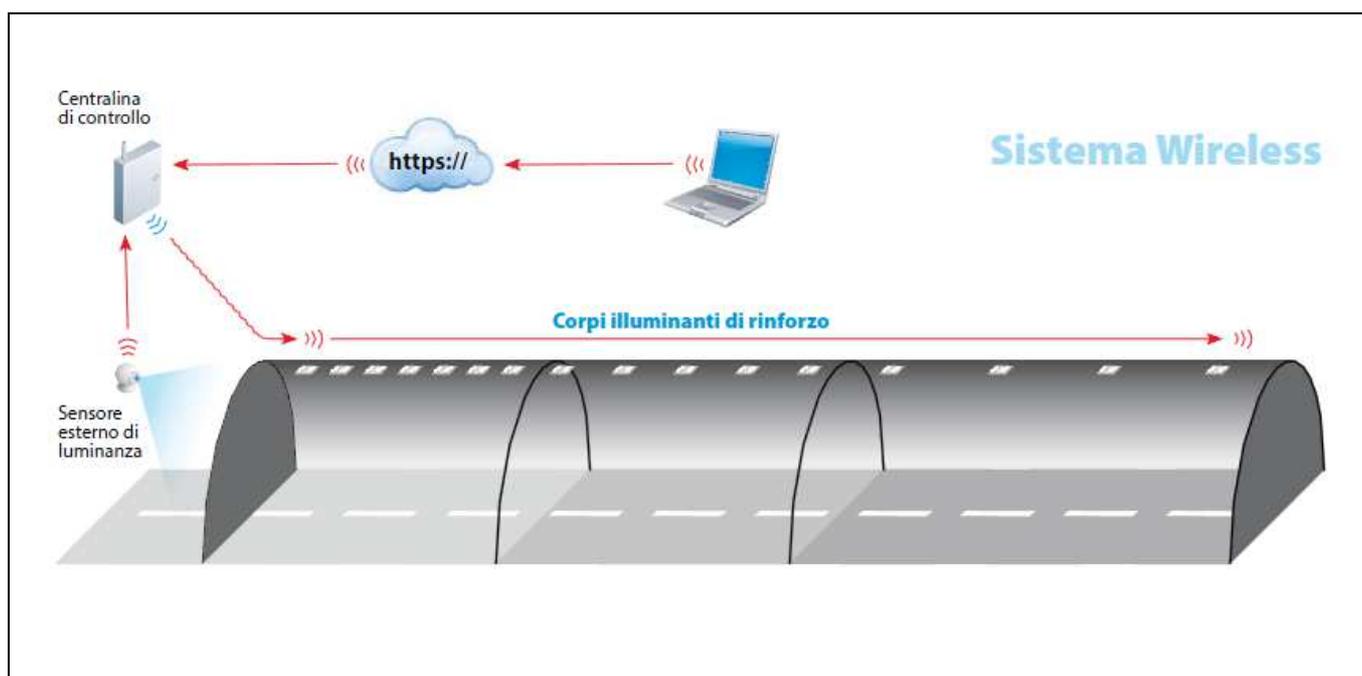


Figura 39: Impianto di illuminazione wireless con proiettori a led [84]

Si può osservare che il colore della vernice utilizzata per la volta e per le pareti della galleria influenza le condizioni di visibilità in galleria, infatti le colorazioni chiare delle vernici permettono una diffusione della luce più uniforme.

Per questo motivo, e per motivi di risparmio sui costi di illuminazione, generalmente per la verniciatura delle pareti e della volta delle gallerie è preferibile optare per una scelta che ricade sulle vernici bianche.

Infatti, la colorazione bianca per un verso determina condizioni di miglior visibilità per gli utenti e per altro verso determina un efficientamento energetico dell'impianto di illuminazione.

La ripetizione nel tempo delle operazioni di verniciatura può determinare dei distacchi della vernice stessa dalle pareti della galleria.

In questo caso, prima dell'operazione di riverniciatura è possibile effettuare la rimozione della vernice esistente avvalendosi dell'utilizzo di una apposita attrezzatura che permette la cosiddetta "idroscarifica delle pareti della galleria" che fa parte delle operazioni periodiche di manutenzione della galleria.

Il lavori di manutenzione e di costruzione in galleria sono regolati dal paragrafo 3.3 dell'allegato 2 del decreto legislativo n. 264 in materia di **misure riguardanti l'esercizio** della galleria.

Per tali lavori questo paragrafo prevede "la chiusura completa o parziale di corsie a partire dall'esterno della galleria utilizzando pannelli a messaggio variabile, semafori e barriere meccaniche".

Si può osservare che durante la fase verniciatura delle pareti è possibile individuare su di esse delle infiltrazioni d'acqua, provenienti dalla roccia circostante, e che è opportuno canalizzare lungo il margine della carreggiata.

Per quanto riguarda la normativa sull'illuminazione delle gallerie, le Linee guida per la progettazione della sicurezza delle gallerie fanno riferimento ad **decreto ministeriale D.M. 14 settembre 2005 intitolato Norme di illuminazione delle gallerie stradali**.

Inoltre le linee guida ANAS distinguono l'illuminazione della galleria in [85]:

- ILLUMINAZIONE ORDINARIA
- ILLUMINAZIONE DI EMERGENZA

L'illuminazione ordinaria include l'**illuminazione permanente** e l'**illuminazione di rinforzo**, quest'ultima rappresenta l'incremento di illuminazione che deve essere previsto in corrispondenza delle zone di ingresso e di uscita della galleria e che appunto permette l'adattamento visivo dalle condizioni di luminanza esterna a quelle interne.

L'**illuminazione di emergenza** invece include:

- L'**illuminazione di riserva** dovuta all'interruzione dell'erogazione dell'energia elettrica
- L'**illuminazione di sicurezza** che attiene alle vie di fuga

7.8 Le barriere ridirettive a Led

In relazione all'introduzione della tecnologia a led si può osservare che essa può essere utilizzata nell'adozione di misure di sicurezza innovative che appunto fanno uso di tale tecnologia.

La tecnologia dei led infatti permette di realizzare le cosiddette “**barriere ridirettive**” [86] che consentono una facile individuazione delle vie di fuga da parte degli utenti della galleria in caso di incidente.

Questo sistema permette di simulare una “velocità apparente” lungo le barriere stesse allo scopo di facilitare l’individuazione del percorso di fuga da parte degli utenti.

Tali barriere ridirettive rientrano quindi in quella che le linee guida classifica come illuminazione di sicurezza.

Nella figura seguente viene riportato un esempio di barriera ridirettiva:



Figura 40: Esempio di barriera ridirettiva [87]

7.9 La via di fuga sospesa

La via di fuga sospesa [88] rappresenta una misura di sicurezza innovativa rispetto alle tradizionali metodologie di realizzazione delle vie di fuga nelle gallerie.

Questa misura consiste nella realizzazione di un cunicolo o camminamento ancorato alla volta della galleria mediante tiranti, piastre e bulloni.

Per la sua realizzazione si utilizza il calcestruzzo o l'acciaio e può avere forma rettangolare o trapezoidale.

L'accesso al camminamento, avviene attraverso apposite scalinate realizzate in corrispondenza le piazzole di sosta o di apposite camere laterali della galleria.

Il camminamento si estende lungo tutta la lunghezza della galleria e conduce quindi ai portali.

La figura seguente permette di visualizzare, in sezione trasversale, l'accesso alla scalinata che conduce al camminamento sospeso alla galleria:

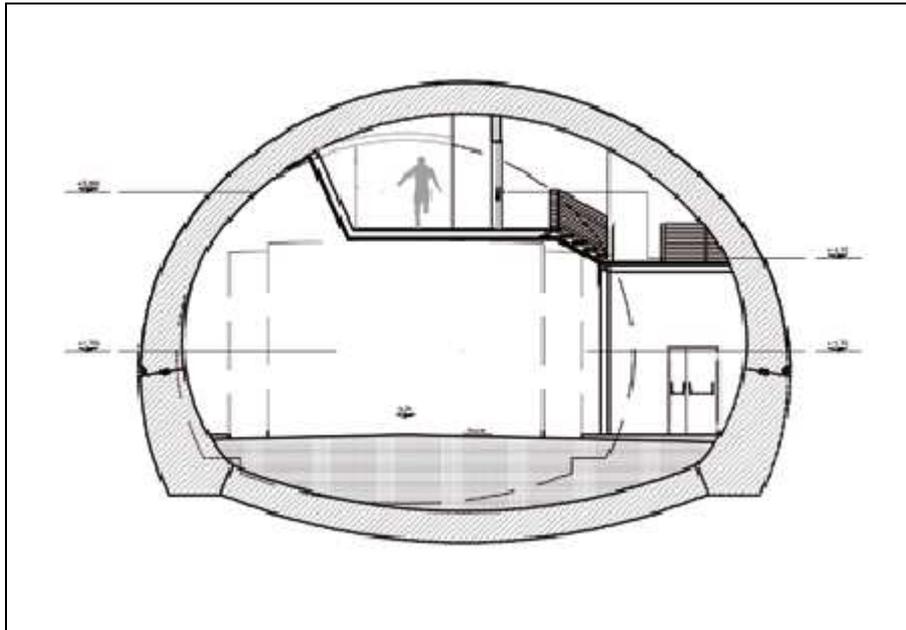


Figura 41: Schema della via di fuga sospesa con relativo accesso alla scalinata [89]

Il camminamento inoltre viene progettato in modo che il calore dell'incendio non ne alteri le caratteristiche di resistenza meccanica per 120 minuti, di tenuta alle fiamme e al passaggio dei fumi e dei gas, e di isolamento termico. Questa soluzione di realizzazione di una via di fuga ha il vantaggio di essere molto economica in quanto, a differenza delle soluzioni tradizionali non comporta operazioni di scavo.

Inoltre questa soluzione è molto rapida da realizzare in quanto si avvale dell'utilizzo di elementi prefabbricati di costruzione, e soprattutto è una soluzione e facilmente adattabile alle gallerie esistenti qualora queste richiedano una riduzione del loro livello di rischio.

7.10 Il by-pass

Il by-pass [90] rappresenta un'altra misura di sicurezza passiva attuabile nel caso in cui esistano due fornici che appunto possono essere collegati tramite

un bay-pass (o galleria di collegamento) permettendo in questo modo di utilizzare ciascun fornice come via di fuga in caso di incidente.

Tali collegamenti possono essere realizzati con elementi prefabbricati e possono essere tali da consentire anche il passaggio dei mezzi di soccorso.

In effetti tali by-pass costituiscono delle vere e proprie gallerie trasversali.

Esse devono avere caratteristiche di compartimentazione e cioè di resistenza meccanica, di tenuta (alle fiamme e ai fumi e ai gas), e di isolamento termico.

Dunque il by-pass oltre a proteggere gli utenti dalle conseguenze di un incendio deve anche fare in modo che il fornice non interessato dall'incidente deve poter essere mantenuto in esercizio in caso di incidente nell'altro fornice.

Tale struttura costituisce quindi anche un luogo sicuro (rifugio) per gli utenti in caso di incidente.

7.11 Impianti o sistemi di rivelazione e allarme incendi

Questi impianti possono essere [91] suddivisi in:

- IMPIANTI MANUALI
- IMPIANTI AUTOMATICI

Gli impianti manuali a differenza di quelli automatici prevedono il loro azionamento da parte di un operatore.

Per quanto riguarda i rivelatori manuali di incendio, essi possono essere installati in corrispondenza delle stazioni SOS o dei rifugi (luoghi sicuri) o disposti in apposite nicchie realizzate ad intervalli regolari in corrispondenza

dei marciapiedi, da dove appunto possono essere azionati manualmente inviando un segnale di allarme alla centrale di controllo.

Dunque, entrambi i tipi di impianti, manuali ed automatici, comunicano con una centrale di controllo che riceve l'allarme della presenza dell'incendio acusticamente o con segnalatori luminosi.

Gli impianti di rivelamento di incendi possono essere dotati di:

- Rivelatori puntiformi di fumo
- Rivelatori lineari di fumo
- Rivelatori puntiformi di calore
- Rivelatori lineari di calore
- Rivelatori di fiamma
- Rivelatori puntiformi combinati

I rivelatori di fiamma vengono impiegati se c'è il rischio di sviluppo improvviso di fiamme e sono più sensibili rispetto ai rivelatori di fumo e di calore.

I rivelatori puntiformi combinati utilizzano **tecnologie ottiche** e permettono rivelare sia la presenza di fumo, sia la presenza di fonti calore, sia la presenza di **monossido di carbonio (CO)**.

Anche i rilevatori lineari di fumo sono basati su tecnologie ottiche e cioè sfruttano il fatto che "i raggi di luce vengono attenuati se il mezzo in cui essa si propagano viene perturbato".

I rivelatori lineari di fumo riescono ad interessare un'area di 1600m² con una larghezza di 15m.

I principali **parametri** da considerare per la scelta dei punti in cui installare i **rivelatori di fumo lineari** sono:

- Vibrazioni delle superfici di installazione
- Escursioni climatiche
- Considerazioni sulle tipologie di incendi possibili
- Ventilazione e polveri

Per quanto riguarda la centrale di controllo di tali impianti, essa deve essere facilmente accessibile dagli operatori e deve trovarsi in luoghi protetti dagli incendi in modo da poter garantire la sua funzionalità.

In particolare essa non deve trovarsi in ambienti con atmosfera corrosiva e deve trovarsi in ambienti dotati di **illuminazione di emergenza automatica**.

I sistemi di rivelazione degli incendi e i sistemi di allarme acustici ed ottici devono essere alimentati indipendentemente e deve essere presente un'alimentazione di riserva in grado di attivarsi entro 15 secondi dalla interruzione dell'alimentazione primaria.

7.12 Sistemi per il rivelamento del surriscaldamento dei veicoli pesanti

Uno strumento innovativo per il rivelamento del surriscaldamento dei veicoli pesanti è rappresentato dal **portale termografico** installato in corrispondenza dei portali della galleria che si vede rappresentato nella figura seguente.

Questo sistema rappresenta quindi una misura di sicurezza attiva di prevenzione degli incendi in galleria che può essere adottata per le gallerie di elevata pendenza.

I portali termografici utilizzano delle telecamere termiche che appunto consentono il rivelamento del surriscaldamento dei motori dei veicoli.



Figura 42: Esempio di portale termografico [92]

7.13 Sistemi di rilevazione del traffico

Oggigiorno [93] sono disponibili sistemi innovativi per la rilevazione e per il monitoraggio del traffico in galleria, e che sono anche in grado di fornire informazioni sulla velocità dei veicoli in galleria.

Tali sistemi, che vanno sotto il nome di “loop detection system” sono costituiti da fili metallici installati in apposite scanalature realizzate sul manto stradale con una spaziatura regolare.

Il principio di funzionamento di tali sistemi è basato sulla variazione di induttanza dei fili metallici disposti sul manto stradale al passaggio dei veicoli sopra di essi.

Questi dispositivi possono essere montati sul manto stradale con una spaziatura che può andare dai 100 metri ai 500 metri.

Essi sono in grado dunque di inviare dati inerenti il flusso del traffico e dati inerenti la velocità dei veicoli alla centrale di controllo permettendo di gestire il traffico della galleria soprattutto nelle situazioni di picchi di traffico evitando quindi situazioni di pericolo.

I dati forniti da questi dispositivi possono essere analizzati per fare previsioni sugli incidenti in galleria.

Tuttavia questi sistemi richiedono manutenzione periodica che comporta la chiusura della galleria ed inoltre essi rilevano difficilmente i rallentamenti del traffico.

Sono anche disponibili **sistemi radar** di rilevamento del traffico e di rilevamento della distanza fra i veicoli circolanti.

Tali sistemi prevedono l'installazione di dispositivi in corrispondenza della volta della galleria (sopra la linea spartitraffico) o in corrispondenza del marciapiede.

Essi emettono un raggio che viene riflesso al passaggio dei veicoli.

In questo modo è quindi possibile effettuare la rilevazione dei dati necessari per il calcolo delle distanze fra i veicoli e per i calcoli inerenti il numero di veicoli presenti in galleria o inerenti alla velocità dei veicoli.

Sono anche disponibili sistemi di rivelazione del traffico ad ultrasuoni che appunto sfruttano l'energia delle onde sonore connessa al passaggio dei veicoli per inviare segnali alla centrale di controllo.

Tuttavia questi ultimi sistemi sono meno affidabili a causa del rumore di fondo che caratterizza l'ambiente della galleria.

7.14 Sistemi di videosorveglianza

I sistemi di videosorveglianza possono essere classificati in [94] :

- Sistemi video a circuito chiuso (CCTV¹²⁶)
- Equipaggiamenti con sistemi video a circuito chiuso (CCVE¹²⁷)
- Sistemi automatici di rivelamento degli incidenti (AID¹²⁸)

Questi sistemi, a loro volta utilizzano sistemi di registrazione (VCR¹²⁹) e software a loro dedicati che permettono le comunicazioni fra le **telecamere** e i **monitor e permettono** l'invio delle registrazioni ad una centrale operativa.

Le recenti innovazioni tecnologiche permettono di disporre di sistemi di dimensioni sempre più ridotte e che possono essere utilizzati sia per le gallerie unidirezionali sia per quelle bidirezionali.

I sistemi più moderni permettono di ridurre i problemi delle telecamere connessi con l'abbagliamento prodotto dai fanali dei veicoli.

I sistemi più moderni permettono di contare i veicoli in transito e di fornire dati relativi alla velocità dei veicoli stessi che vengono poi elaborati allo scopo di evitare gli incidenti.

I sistemi (AID) più moderni permettono di rivelare il blocco di veicoli, gli ingorghi, le variazioni del volume di traffico e la densità del traffico.

Inoltre è anche possibile ottenere informazioni sui picchi di traffico e sui minimi di volumi di traffico e questo consente anche di elaborare informazioni inerenti la gestione del traffico.

Alcuni sistemi sono dotati di **termo camere** che permettono di rivelare gli incendi oppure di telecamere che in relazione ai dati sulla **visibilità** consentono di rivelare la **presenza di fumo**.

¹²⁶ CCTV è l'acronimo di closed circuit television.

¹²⁷ CCVE è l'acronimo di closed circuit video equipment

¹²⁸ AID è l'acronimo di automatic incident detection

¹²⁹ VCR è l'acronimo di video recording equipment

Altri sistemi più avanzati di rilevamento degli incendi prevedono il rilevamento della riflessione della luce prodotta dalle fiamme.

7.15 Sistemi di monitoraggio della qualità dell'aria in galleria

Sono disponibili i seguenti dispositivi per il controllo della qualità dell'aria in galleria [95]:

- Rivelatori di monossido di carbonio
 - Rivelatori degli ossidi di azoto
 - Rilevatori di visibilità (opacimetri)
- I **rivelatori di monossido di carbonio** vengono utilizzati nelle gallerie che utilizzano il sistema di ventilazione trasversale o semitrasversale e tali dispositivi vengono installati lungo tutta la galleria.
- L'installazione dei rivelatori di monossido di carbonio viene valutata in relazione all'altitudine a cui si colloca la galleria.
- I **rivelatori degli ossidi di azoto** vengono utilizzati nelle gallerie in cui si prede un elevato volume di traffico di **veicoli diesel**.
- Anche i **rivelatori di visibilità** vengono installati nelle gallerie che prevedono un elevato volume di traffico di veicoli diesel. Questi rivelatori prevedono l'installazione di emettitori e ricevitori di luce disposti su entrambi i lati della galleria. Se la visibilità in galleria diminuisce a causa dell'eccessiva concentrazione di gas di scarico si ha che il raggio di luce emesso dall'emettitore di luce arriva con

un'intensità più bassa sul ricevitore rispetto alle condizioni di visibilità accettabile e questo determina l'emissione di un segnale di allarme che giunge alla centrale operativa.

7.16 Sistemi di comunicazione per gli utenti

Sono rappresentati dagli impianti telefonici SOS la cui installazione oggi rappresenta una questione controversa dal momento che alcuni progettisti la ritengono una misura impiantistica superata ed onerosa in relazione ai vantaggi derivanti dalla sua adozione.

Si ritiene in infatti che gli impianti telefonici SOS possano essere sostituiti con apparecchiature di comunicazione che permettano l'utilizzo delle moderne tecnologie dei telefoni cellulari.

Sono allo studio applicazioni telefoniche dedicate alle situazioni di emergenza in galleria e che consentono un elevato grado di interazione con il personale e con le apparecchiature della centrale di controllo.

Tuttavia altri progettisti della sicurezza ritengono che un vantaggio irrinunciabile dei telefoni SOS sia quello di permettere la determinazione della posizione esatta dell'utente che dovesse trovarsi in una situazione di emergenza in quanto la tecnologia GPS¹³⁰ in galleria perde la sua efficacia che ha all'aperto.

Questo inconveniente potrebbe essere superato mediante l'adozione di impianti che si avvalgono della tecnologia IPS¹³¹ (Indoor position System).

¹³⁰ Global position system.

¹³¹ Questa tecnologia è oggi utilizzata anche nelle gallerie di coltivazione di giacimenti minerari in alcune realtà estrattive italiane per la localizzazione precisa degli operatori nelle stesse miniere.

L'interazione degli utenti con gli operatori della galleria e con i sistemi informatizzati della galleria può oggi avvalersi della tecnologia basata sul riconoscimento dei codici grafici.

Nella figura seguente si vede una delle possibili applicazioni della tecnologia di riconoscimento dei codici grafici.

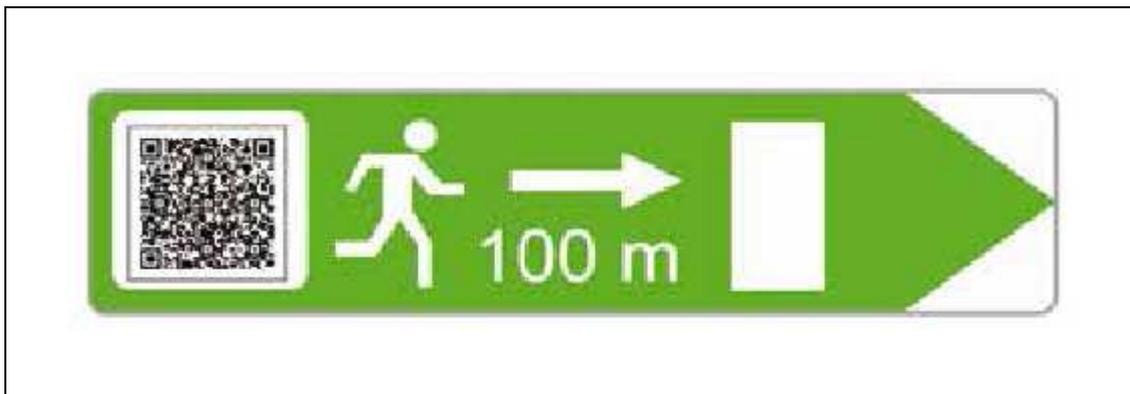


Figura 43: Possibile applicazione della tecnologia di riconoscimento dei codici grafici [96]

Si deve però capire se queste tipologie di avanzate tecnologiche siano effettivamente compatibili con i fattori comportamentali propri delle situazioni di emergenza.

In ogni caso si deve tener presente che il decreto legislativo n. 264 al paragrafo 2.10.2 dell'allegato 2, **prescrive** che in ogni armadio delle stazioni di emergenza sia presente un telefono di emergenza.

Inoltre al paragrafo 2.10.3 dello stesso allegato si prescrive che: “devono esserci stazioni di emergenza vicino ai portali e all'interno della galleria, a intervalli non superiori a 150m per le gallerie nuove e non superiori a 250m per le gallerie esistenti”.

Questi due paragrafi dell'allegato 2 evidenziano l'**importanza** che il legislatore attribuisce alla presenza di **telefoni fissi in galleria**.

7.17 Il manto stradale in calcestruzzo

Per quanto riguarda il rischio di incendio in galleria è molto importante il ruolo che riveste il materiale di cui è costituito il manto stradale [97] della galleria stessa durante lo sviluppo di un incendio.

L'importanza di questo aspetto è stata evidenziata dagli incidenti del Monte Bianco del 24 Marzo 1999, dei Monti Tauern del 29 Maggio del 1999 e del San Gottardo del 2001.

Gli incendi che si sono verificati in queste tre occasioni hanno determinato un notevole innalzamento della temperatura che ha consentito la propagazione dell'incendio dai veicoli al manto stradale agevolando la propagazione dell'incendio ad altri veicoli e ad altri tratti di manto stradali.

Dunque in condizioni di incendio con temperatura molto alta come nei casi citati, il conglomerato bituminoso rientra fra i materiali che concorrono a determinare il carico di incendio.

Dunque il conglomerato bituminoso incendiandosi concorre alla produzione di calore, di fumi e di gas tossici amplificando le conseguenze dell'incendio in galleria.

Per evitare questo tipo di scenario in caso di incendio è possibile realizzare la pavimentazione stradale delle gallerie in calcestruzzo.

Degli studi sperimentali condotti in Francia hanno dimostrato che il comportamento del conglomerato bituminoso in presenza di un incendio la cui temperatura sia di circa 530°C, è tale da determinare la produzione di fumo e di gas tossici nei primi cinque minuti di esposizione a tale incendio e l'innescò dell'incendio del conglomerato stesso nei primi otto minuti di esposizione all'incendio.

Questi studi hanno anche evidenziato che la reazione di combustione del conglomerato bituminoso produce molto calore e determina fiamme persistenti.

I prodotti solidi rimanenti di tale combustione si presentano sotto forma di materiali sciolti e inconsistenti.

Inoltre l'analisi di rischio quantitativa di cui si è detto in questa tesi, dimostra che la realizzazione del manto stradale in conglomerato bituminoso, contribuisce ad innalzare il livello del rischio dell'incendio in galleria rispetto alla realizzazione del manto stradale in calcestruzzo.

Questo tipo di analisi del rischio permette anche di evidenziare come tale livello di rischio vari significativamente solo nel caso di incendi che presentano una elevata potenza termica e quindi con presenza di veicoli pesanti e con propagazione non eccessivamente rapido dell'incendio.

Si è dunque visto che in questi casi, realizzando la pavimentazione in calcestruzzo, gli scenari incidentali derivanti dal tipo di incendio descritto non determinano la presenza di morti.

Dagli studi condotti si può dedurre che l'incremento del livello di sicurezza derivante della realizzazione della pavimentazione in calcestruzzo deve essere valutato volta per volta per ciascuna galleria in esame nello stesso modo in cui si opera quando si considerano le altre misure di sicurezza che incidono sul livello di sicurezza di una galleria.

Un altro vantaggio che la pavimentazione in calcestruzzo offre è che essa, messa in opera presenta una colorazione chiara e non scura come il conglomerato bituminoso, questo migliora quindi le condizioni di luminanza in galleria riducendo quindi la possibilità di incidenti connessa con questo aspetto della sicurezza in galleria.

Dunque per le ragioni esposte la pavimentazione in calcestruzzo può essere considerata una misura di sicurezza di **protezione** passiva ma può anche essere considerata una misura di sicurezza di **prevenzione** passiva.

Si può inoltre osservare che la pavimentazione in calcestruzzo richiede un minore manutenzione dunque questo fattore incide favorevolmente sia sui costi di gestione della galleria sia sui rischi della galleria connessi con i lavori

di manutenzione a seguito delle inevitabili limitazioni all'esercizio della galleria che tali lavori comportano.

La realizzazione di un esempio di manto in calcestruzzo comporta:

- La preliminare realizzazione di una soletta di base di 25 cm
- La stesura di una membrana impermeabile
- La stesura di un sottile strato (4 cm) di conglomerato bituminoso
- La realizzazione dello strato in calcestruzzo armato¹³² di uno spessore di 18cm.

In relazione alla composizione e al volume di traffico lo spessore dello strato in calcestruzzo armato può variare fino ad arrivare a 27 cm, e in alcuni casi si può prevedere la realizzazione di un doppio strato di calcestruzzo.

Lo spessore della soletta di base dipende dalle condizioni della roccia sottostante.

La messa in opera dello strato di calcestruzzo richiede la realizzazione di lastre¹³³ collegate da giunti di contrazione (trasversali, longitudinali e laterali) e da ancoraggi in corrispondenza della linea di collegamento delle corsie, realizzando una corsia alla volta.

I giunti trasversali [98] possono essere ricoperti con gomma al fine di ridurre le vibrazioni ed il rumore durante il loro attraversamento da parte dei veicoli.

Si può osservare che non essendoci in Italia prescrizioni in merito alla realizzazione di pavimentazioni stradali in calcestruzzo in galleria, questa tecnica è stata scarsamente adottata preferendo continuare a realizzare pavimentazioni in conglomerato bituminoso.

¹³² Con armatura longitudinale e trasversale che impediscono la formazione di fessurazioni nelle lastre di calcestruzzo.

¹³³ Realizzate con cassature scorrevoli.

La prima applicazione in Italia della pavimentazione in calcestruzzo è stata quella della galleria Laives nei comuni di Bronzolo, di Laives e di Bolzano.

Si può anche osservare che a fronte di un aumento di costo di realizzazione più che contenuto di questo tipo di pavimentazione, si può stimare una durata della stessa pavimentazione di circa 40 anni ed un risparmio sui costi di illuminazione di circa il 25% derivante dalla colorazione chiara e dall'elevato potere riflettente (albedo¹³⁴) del calcestruzzo rispetto al conglomerato bituminoso, vantaggi da aggiungere alla diminuzione del livello di rischio connesso con gli incendi.

7.18 Il rivestimento della volta e i danni strutturali

A seguito degli incendi in galleria di veicoli pesanti che sviluppano una grande potenza termica e quindi elevate temperature, il rivestimento [99], [100] in calcestruzzo della volta della galleria può essere interessato dal fenomeno della **frantumazione esplosiva del calcestruzzo** che oltre a provocare danni alla struttura potrebbe provocarne anche agli utenti e ai soccorritori.

Questo fenomeno, che nel gergo tecnico viene chiamato **spalling** è dovuto alla bassa permeabilità dei calcestruzzi ad alta resistenza meccanica.

Dunque le alte temperature dell'incendio determinano la generazione di vapore che per la sua scarsa porosità, il calcestruzzo non riesce ad espellere fino che l'incremento della pressione di tale vapore determina sulla volta dei carichi che conducono alla frantumazione esplosiva del calcestruzzo.

¹³⁴ L'albedo è il rapporto fra la quantità di energia riflessa o diffusa da una superficie e la quantità di energia che investe la superficie stessa.

Inoltre le elevate temperature determinano la perdita delle caratteristiche meccaniche dell'armatura e quindi del calcestruzzo stesso e in queste condizioni la volta può collassare a causa dei carichi che su di essa vengono a determinarsi a causa degli incendi stessi.

Il fenomeno della frantumazione del calcestruzzo avviene a temperature che dipendono dal tipo di calcestruzzo impiegato, e per alcuni calcestruzzi può avvenire già a 200°C.

Quindi la scelta del cemento e del calcestruzzo da utilizzare per la volta della galleria è di fondamentale importanza per la resistenza stessa al fuoco della volta.

Per limitare gli effetti del fenomeno della frantumazione esplosiva del calcestruzzo, soprattutto per i calcestruzzi ad alta resistenza meccanica, si possono impiegare le fibre propileniche nella realizzazione di tali calcestruzzi. Queste fibre essendo poche resistenti al fuoco si sciolgono facilmente permettendo la formazione di pori all'interno della matrice del calcestruzzo che permettono quindi di ridurre la pressione causata dall'evaporazione dell'acqua e quindi di attenuare il fenomeno dello spalling.

Inoltre è possibile ridurre anche la fessurazione del calcestruzzo di rivestimento della volta della galleria utilizzando delle fibre in acciaio che venendo disperse nel cemento determinano un incremento della resistenza a trazione del calcestruzzo e quindi anche la riduzione del suo grado di fessurazione.

Inoltre le tecnologie che permettono di impedire o limitare lo spalling ed anche la perdita delle caratteristiche meccaniche delle armature del calcestruzzo e quindi in definitiva di migliorare la resistenza al fuoco della volta della galleria prevedono l'isolamento termico della volta stessa.

Tali tecnologie di isolamento termico della volta si avvalgono dell'utilizzo di **malte** di protezione della volta che vengono applicate a **spruzzo** o di pannelli termici che vengono applicati sulla superficie della volta stessa della galleria.

Queste malte termiche e questi pannelli termici possono anche essere usati come rivestimento esterno di protezione del vie di fuga di cui si è detto nelle pagine precedenti.

Dunque tutte le tipologie tecnologiche di intervento sul rivestimento della volta della galleria e delle vie di fuga sospese fin qui descritte permettono di realizzare delle misure passive di protezione degli utenti e della struttura.

Il controllo del rivestimento [101] della volta può essere effettuato con le seguenti apparecchiature di sicurezza:

- ACCELEROMETRI
- SENSORI DI TEMPERATURA
- ESTENSIMETRI E FESSURIMETRI
- CELLE DI PRESSIONE

Gli accelerometri permettono di controllare le vibrazioni e gli eventuali cedimenti del rivestimento della volta.

I sensori di temperatura consentono invece il controllo della temperatura del rivestimento della volta, mentre con i fessurimetri e con gli estensimetri si controllano gli sia gli spostamenti orizzontali che quelli verticali del rivestimento.

In fine le celle di pressione consentono il controllo delle spinte e delle pressioni all'interfaccia fra rivestimento e roccia circostante.

L'installazione di queste apparecchiature rappresentano l'adozione di misure di prevenzione e protezione attiva infatti tali apparecchiature prevedono la presenza di dispositivi di allarme in grado di segnalare situazioni di pericolo alla centrale di controllo.

7.19 La galleria dinamica e lo smart tunnel

La grande mole di apparecchiature di sicurezza e di impianti di sicurezza di cui, nelle pagine precedenti, si è voluta dare una descrizione senza la pretesa di esaurire la vastità dell'argomento, unita alle possibili misure di sicurezza gestionali ed operative che è possibile adottare per innalzare il livello di sicurezza di un sistema galleria, permettono di superare il concetto di rischio statico¹³⁵ ed considerare il concetto di rischio dinamico e quindi considerare il concetto di analisi di rischio dinamica¹³⁶.

Gli strumenti tecnologici a disposizione infatti permettono di ridefinire il concetto di rischio su un periodo di tempo medio (anni o mesi) o addirittura un periodo di tempo breve (settimane, giorni o ore).

In questo senso il concetto di rischio e di analisi di rischio analizzato nel capitolo 6 non ha più solo una valenza statica ma viene messo in relazione con il tempo [102], assumendo quindi anche una valenza dinamica e diventando più aderente alla realtà del sistema galleria che è appunto caratterizzata dalla presenza un flusso temporale variabile di veicoli (che può essere considerato su base annuale ma anche mensile o addirittura oraria).

In questo modo il livello di rischio che si ottiene per la galleria in studio permette di tenere in considerazione anche il grado di obsolescenza che naturalmente caratterizza le infrastrutture di sicurezza e le misure gestionali adottate di ciascuna galleria, e dove possibile modificarle in favore di un miglioramento del livello di rischio.

L'analisi di rischio dinamica deriva quindi dal fatto di considerare un approccio integrato fra tutte le misure di sicurezza impiantistiche disponibili in sinergia con le misure di sicurezza gestionali ed operative che hanno una connotazione di maggiore flessibilità ed adattabilità al sistema galleria.

¹³⁵ E quindi di analisi di rischio statica

¹³⁶ Che il letteratura viene anche indicata con la locuzione analisi di rischio in tempo reale in quanto diventa possibile attuare una gestione del rischio in tempo reale.

Questo tipo di approccio alla sicurezza della galleria consente quindi arrivare alla definizione di quella che oggi viene indicata come galleria intelligente o smart tunnel.

La realizzazione pratica dello smart tunnel è oggi possibile realizzarla anche integrando le funzionalità delle modernissime apparecchiature (ed impianti) tecnologici avvalendosi di sofisticate piattaforme di software informatiche.

In questo modo è ad esempio possibile, anche con il coordinamento della centrale di controllo, in determinati periodi di tempo (giorni o addirittura ore), determinare il livello di rischio connesso ad una particolare situazione di traffico congestionato o ad esempio alla presenza di un veicolo pesante adibito al trasporto di merci pericolose (e si potrebbe pensare a svariate altre situazioni di pericolo).

Il software in questione quindi determinerà il livello di rischio connesso alla situazione contingente permettendo la disposizione (anche in tempo reale) delle misure di sicurezza adeguate.

Questo avanzatissimo approccio alla sicurezza delle gallerie permette anche di ottimizzare le misure gestionali di protezione degli utenti nella fase di esercizio in emergenza della galleria grazie all'utilizzo di software di simulazione del flusso in emergenza del sistema galleria, e all'utilizzo di software per la simulazione della formazione di code in galleria.

A tal proposito, oggi è anche possibile avvalersi della simulazione della formazione delle code attraverso studi condotti con la tecnica della **realtà virtuale** che rappresenta anche un validissimo strumento delle squadre di soccorso.

La figura seguente permette di visualizzare come l'adozione di avanzate e moderne misure impiantistiche e gestionali consentano di mettere in relazione il rischio e quindi l'analisi di rischio con il tempo realizzando quindi

un'analisi di rischio dinamica o in tempo reale e permettendo di gestire il rischio già nella fase iniziale della analisi di rischio stessa.

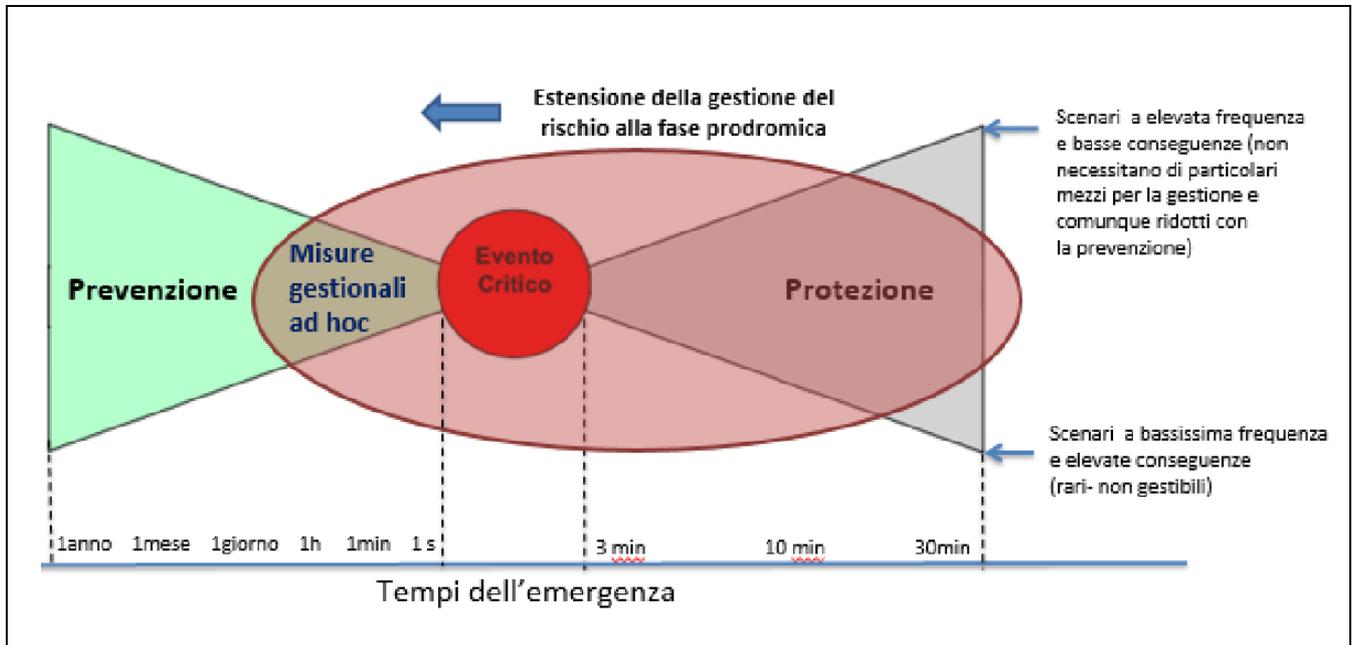


Figura 44: L'analisi di rischio dinamica o in tempo reale [103]

8 Considerazioni conclusive

Dai dati inerenti gli incidenti occorsi in galleria è emerso che gli incidenti che occorrono in galleria non sono superiori rispetto a quelli che occorrono nelle strade a cielo aperto.

Inoltre molti aspetti connessi con gli eventi di incendio e il fatto che l'incendio in galleria sia uno dei rischi più importante da considerare in galleria (in quanto quasi sempre collegato ai rischi di rilascio di sostanze pericolose e alle esplosioni) sono da sempre ben noti ai progettisti della sicurezza delle gallerie anche dalle conoscenze acquisite dagli incidenti in galleria antecedenti alle tre grandi tragedie del 1999 e del 2001.

Tuttavia i tragici incidenti delle gallerie del Monte Bianco, dei Monti Tauren e del San Gottardo hanno determinato una forte sensibilizzazione dell'opinione pubblica in materia di sicurezza che ha avuto come risultato una notevole produzione legislativa che garantisce un'attenzione continua alla materia della sicurezza nelle gallerie ed un costante adeguamento della stessa agli standard tecnologici moderni.

Dal capitolo sui dati disponibili in materia di sicurezza emerge quanto questi siano importanti per la progettazione della sicurezza stessa.

Allo stesso modo emerge che in molti casi i dati disponibili per poter effettuare una analisi di vulnerabilità adeguata sono molto scarsi e che è necessario integrarli prevedendo degli accurati studi preliminari in ordine a ciascuna galleria che si analizza.

Si è potuto appurare quanto sia utile la sperimentazione su larga scala per approfondire la conoscenza di determinati aspetti e fenomeni scientifici che influenzano la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali.

L'importanza della catalogazione, della diffusione e della condivisione dei dati dovrebbe avere più peso in sede di aggiornamento della legislazione.

Studiando le normative vigenti ed in particolare la Direttiva Europea 2004/54/CE ed il Decreto Legislativo n. 264 e conseguentemente analizzando le Linee Guida per la Progettazione della sicurezza delle gallerie stradali si è potuto appurare che esse prevedono che all'aspetto prescrittivo si affianchi l'aspetto prestazionale e cioè si prevede la verifica della effettiva rispondenza dei risultati progettuali (in termini di sicurezza) e quindi delle misure di sicurezza adottate alle esigenze di sicurezza della galleria in studio. Dunque le normative e le conoscenze scientifiche, progettuali e tecnologiche realizzano una metodologia integrata di progettazione della sicurezza che permette il raggiungimento di un livello ideale di sicurezza delle gallerie mediante l'adozione delle opportune misure di sicurezza per la particolare galleria in esame.

In questo senso le analisi che si conducono nella fase progettuale della sicurezza non sono solo basate sulle verifiche tipiche dell'ingegneria ma sono soprattutto delle analisi dinamiche che tengono quindi conto della possibile evoluzione dei parametri progettuali di sicurezza.

Queste analisi sono finalizzate al raggiungimento della compatibilità fra le misure di sicurezza strutturali e le misure di sicurezza gestionali ed operative. Questo modo di operare parte quindi dalla considerazione della galleria in quanto struttura e durante il progetto tiene sempre presente la sicurezza della galleria stessa; in altri termini si considera sempre il sistema galleria.

Le considerazioni inerenti l'analisi di rischio e i relativi criteri di accettabilità pur sottolineando l'impossibilità di azzerare il rischio derivante dall'esercizio di una galleria mostrano come sia possibile ridurlo sensibilmente fino ad un livello di tollerabilità adottando le adeguate misure di sicurezza.

L'adozione delle misure di sicurezza di protezione elencate nel precedente capitolo hanno infatti l'effetto di spostare a sinistra la curva del rischio

all'interno della zona ALARP di accettabilità del rischio riducendo quindi le conseguenze connesse al rischio proprio del sistema galleria.

D'altro canto le misure di prevenzione hanno l'effetto di spostare in basso la curva del rischio riducendo quindi la frequenza degli eventi incidentali.

Riguardo agli impianti antincendio che utilizzano l'acqua come agente estinguente, si deve tenere presente che ci sono molte opinioni controverse¹³⁷, e quindi il loro impiego deve far riferimento, per quanto possibile, ad esperienze passate in gallerie con caratteristiche equivalenti.

Per quanto riguarda gli incendi, tutte le considerazioni inerenti la stratificazione dei fumi, hanno evidenziato il ruolo centrale dell'impianto di ventilazione, di rilevazione degli incendi e di videosorveglianza, e quanto sia importante l'acquisizione di informazioni estremamente attendibili nell'immediata fase di innesco e sviluppo dell'incendio per le decisioni da prendere in questa fase delicatissima, proprio per gestire al meglio l'impianto stesso.

La progettazione e l'utilizzo degli impianti di ventilazione sono temi molto delicati e quindi devono essere considerati con molta cura ed attenzione perché ad esempio, se è vero che l'immissione di aria fresca in galleria facilita la stratificazione dei fumi, è anche vero che questa può anche alimentare un incendio.

Dunque anche se le considerazioni sulla stratificazione dei fumi hanno una valenza generale, devono tuttavia essere valutate in relazione alla specificità della galleria in studio in quanto gli elementi che la influenzano sono

¹³⁷ infatti in Australia gli impianti a diluvio sono considerati fondamentali nella progettazione della sicurezza delle gallerie.

molteplici e a volte, come ad esempio nel caso delle condizioni meteorologiche, difficilmente prevedibili, e quindi nessuno di essi deve essere sottovalutato.

Gli eventi del Monte Bianco, dei Monti Tauri e del San Gottardo, per le loro conseguenze, hanno rimarcato l'importanza del tema della sicurezza in galleria, tuttavia il tema della sicurezza in galleria non deve essere solo associato alle grandi lunghezze delle gallerie; fra gli incidenti più gravi nel mondo, fra il 1970 e il 1999, figura infatti quello occorso nella galleria siciliana dell'isola delle femmine, lunga appena 148 m.

Inoltre i principi che sono alla base della legislazione, europea¹³⁸ ed italiana¹³⁹, sono indiscutibili, ma è opinione comune che sarebbe auspicabile l'estensione del campo di applicazione di tale legislazione anche alle gallerie non appartenenti alla rete stradale dei trasporti trans europea.

La Direttiva Europea 2004/54/CE, al paragrafo 6 dell'articolo 11 che regola le gallerie in esercizio della rete stradale dei trasporti transeuropea, fissa al 30 Aprile 2014 la data per il termine dei lavori di riadeguamento secondo i requisiti prescritti dalla normativa stessa.

Inoltre il paragrafo 7 dell'articolo 11 della stessa normativa prevede che, " se la lunghezza totale dei fornicelli delle gallerie esistenti divisa per la lunghezza totale della porzione della rete stradale transeuropea appartenente al territorio di ciascuno degli Stati Membri Europei, supera la media europea, tali Stati possono prorogare la data di riadeguamento di 5 anni".

Questo significa che gli Stati Membri che hanno un numero maggiore di gallerie della rete trans europea, rispetto alla media europea del numero di gallerie transeuropee, possono chiedere di fissare al 30 Aprile 2019 la scadenza per il riadeguamento delle gallerie stradali e l'Italia rientra nel

¹³⁸ Direttiva Europea 2004/54/CE

¹³⁹ Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006 n.264

gruppo degli stati Membri che potendo chiedere tale proroga ha deciso di farlo.

Si è potuto constatare [104] che solo una esigua percentuale (circa il 17%) delle gallerie europee per le quali era possibile chiedere la proroga di riadeguamento sono riuscite effettivamente ad adottare le misure di riadeguamento previste dalla Direttiva Europea 2004/54/CE, e i motivi che spiegano questa bassissima percentuale risiede negli **alti costi di riadeguamento, la cui stima varia da 2 a 3 milioni di euro per chilometro di galleria.**

Relativamente al nostro paese i dati disponibili agli atti della Conferenza Internazionale sulla Sicurezza delle gallerie stradali e sulle misure gestionali della Direttiva Europea tenutasi a Roma il 16 Febbraio 2017 evidenziano come in tale data ben l'80% delle gallerie necessitassero ancora di essere adeguate al decreto legislativo n.264, e come a quella data gli aspetti più critici della sicurezza risultassero essere:

- La realizzazione di uscite di sicurezza.
- La realizzazione di impianti di drenaggio dei liquidi infiammabili e tossici.
- La realizzazione di impianti di ventilazione trasversale in supporto alla ventilazione longitudinale.

In fine, da ciascun capitolo di questa tesi emerge chiara la considerazione che lo studio, lo sviluppo e l'applicazione misure di sicurezza innovative (tecnologiche ed organizzative), sono fondamentali per l'innalzamento del livello di sicurezza delle gallerie stradali.

Rispetto agli altri paesi del resto del mondo L'Italia dispone di un ingente patrimonio di gallerie stradali, ben 1200 Km di strade in galleria e un totale di 2560 gallerie, dunque il tema della sicurezza delle gallerie ha un ruolo centrale nel più ampio quadro della sicurezza sulle strade.

Bibliografia

- [1] Nicola Mobilia Luciano Consorti, *Manuale degli impianti antincendio, guida alla progettazione*.: dei, 2017.
- [2] Ing. Mauro Malizia, Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco Ascoli Piceno, *Manuale di prevenzione incendi*.
- [3] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La Sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, Gennaio 2003.
- [4] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La Sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [5] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [6] Kristina Larsson, "Fire in tunnels and their effect on rock," Lulea University of technology, Research report 2006.
- [7] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [8] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [9] Ing. Mauro Malizia, Comando Provinciale dei Vigili del fuoco Ascoli Piceno, *Manuale di prevenzione incendi*.
- [10] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, grandi opere sotterranee," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [11] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [12] "Il trasporto su strada delle merci pericolose, la normativa ADR, guida operativa," Confindustria Udine,.
- [13] "Disposizioni ADR,".
- [14] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [15] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [16] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [17] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [18] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [19] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [20] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [21] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [22] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [23] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.

- [24] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [25] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [26] Ying Zhen Li, *Brandforsk*, 2018.
- [27] Ying Zhen Li, *Brandforsk*, 2018.
- [28] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [29] Ying Zhen Li, *Brandforsk*, 2018.
- [30] Ying Zen Li, , 2018.
- [31] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [32] Colton, Chiba, Sato Groethe, "Hydrogen Deflagrations at Large Scale," World Hydrogen Conference, 2004.
- [33] Colton, Chiba, Sato Groethe, "Hydrogen Deflagrations at Large Scale," World Hydrogen Conference, 2004.
- [34] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [35] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [36] Ying Zhen Li, "Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels," *Brandforsk*, 2018.
- [37] wikipedia.
- [38] wikipedia.
- [39] "Atti Parlamentari," Senato della Repubblica, Camera Dei Deputati 13 Legislatura,.
- [40] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [41] Ing. Pasquale Cialdini, Seminario tecnico, La gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali, 2012.
- [42] Dott. Ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [43] Ing. Pasquale Cialdini, seminario tecnico, La gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali, 2012.
- [44] Direttiva Europea 2004/54/CE.
- [45] Direttiva Europea 2004/54/CE.
- [46] Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006, n. 264.
- [47] Decreto Ministerale del 10 marzo 1998 , 1998.
- [48] Introduzione di Michele Vigne, Ed., *Norme Tecniche Prevenzione Incendi, DM 3 Agosto 2015.*: dei, 2015.
- [49] Ing. Mauro Malizia, Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Ascoli Piceno, Manuale di prevenzione incendi.
- [50] Introduzione di Michele Vigne, Ed., *Norme Tecniche Prevenzione Incendi, DM 3 Agosto 2015.*: dei , 2015.
- [51] Nicola Mobilia Luciano Consorti, *Manuale degli impianti antincendio, Guida alla progettazione.*: dei, 2017.

- [52] Decreto Ministeriale del 10 marzo 1998, Criteri generali di di sicurezza antincendio e per l'emergenza nei luoghi di lavoro.
- [53] Ing. Mauro Malizia, Comando Provinciale dei Vigili del fuoco di Ascoli Piceno, Manuale di prevenzione incendi.
- [54] Ing. Mauro Malizia, Comando Provinciale Vigili del Fuoco di Ascoli Piceno, Manuale di prevenzione incendi.
- [55] Prof. Ing. Pierpaolo Oreste, "Adeguamento Funzionale della galleria del Pino," Politecnico di Torino,.
- [56] Linee Guida ANAS S.p.a. per la progettazione della sicurezza delle gallerie.
- [57] Linee Guida ANAS S.p.a. per la progettazione della sicurezza delle gallerie.
- [58] Linee Guida ANAS S.p.a. per la progettazione della sicurezza delle gallerie.
- [59] Ing. Mara Lombardi, "Gestione della sicurezza in cantieri e infrastrutture," Sapienza, Università di Roma,.
- [60] Ing. Mara Lombardi, "Gestione della sicurezza in cantieri e infrastrutture," Sapienza, Università di Roma, 2007.
- [61] Prof. Lorenzo Domenichini Università Degli Studi di Firenze Dipartimento di Ingegneria Civile, Flavio J. Caputo Studio CSIA Roma, "Analisi Quantitativa di rischio nelle gallerie stradali," *Le strade*, Novembre 2006.
- [62] Prof. Massimo Guarascio, Università di Roma "La Sapienza ", Principi basedi ingegneria della sicurezza.
- [63] Linee Guida ANAS S.p.a. per la progettazione della sicurezza nelle gallerie.
- [64] Nicola Mobilia Luciano Consorti, *Manuale degli impianti antincendio, guida alla progettazione.*: dei.
- [65] Nicola Mobilia Luciano Consorti, *Mnuale degli impianti antincendio, guida alla progettazione.*: dei.
- [66] Prof. Ing Pierpaolo Oreste, "Adeguamento Funzionale della galleria del Pino," Politecnico di Torino,.
- [67] Nicola Mobilia Luciano Consorti, *Manuale degli impianti antincendio, guida alla progettazione.*: dei.
- [68] Todini S.p.a., IGM Engineering impianti Srl, Thermostick Elettronica Srl, , 2013, Febbraio.
- [69] Sylvain Desanghere, Eric Cesmat, David Giuliani. Lombardi Group, GEIE TMB, Studio Sperimentale e numerico per valutare l'interesse di un water smit sistema nel Taforo del Monte Bianco, 2013.
- [70] Strade& Autostrade.
- [71] Zeta Plast S.p.a., ER Impianti elettrici e tecnologie per la viabilità Azienda certificata ISO 9001.
- [72] Ing.Fabio Sassu, Dirigente Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Nuoro, La sicurezza antincendio nelle gallerie.
- [73] Dott. ing. Marco Bettelini, "La sicurezza in galleria, riduzione attiva del rischio," *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 1, Gennaio 2003.
- [74] HBI Hearter. www.hbi.ch.
- [75] Ing. Nicolò Faggioni, Ing. Massimiliano Bringiotti, Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma, ImGEco Engineering, Ciclo di seminari, Controllo e manutenzione strutturale ed impiantistica delle gallerie stadali, La ventilazione in galleria, 2016.
- [76] R. Borchiellini, , 2012.
- [77] Kristina Larsson, "Fires in tunnels and their effect on rock," Lulea University of technology,

Research report 2006.

- [78] S. Vogler, C. Diers, M. Martens, J.Lacroix, M.Steiner, P. Schmitz, M. Serrano B. Martin, "Reccomendation for the enhancement of preventive tunnel safety," Novembre 2005.
- [79] www.dleds.com.
- [80] www.dleds.com.
- [81] wikipedia.
- [82] www.dleds.com.
- [83] www.strade & autostrade.
- [84] www.dleds.com.
- [85] Linee Guida ANAS s.p.a. per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali.
- [86] Alessandro Focaracci, *quarry & construction*, Gennaio 2010.
- [87] Ing. Pasquale Cialdini, La gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali, 2012, settembre.
- [88] Focaracci Alessandro, *quarry & construction*, Gennaio 2010.
- [89] *quarry&construction*, Gennaio 2010.
- [90] Alessandro Focaracci, "Mitigazione del rischio in galleria," *quarry&construction*, Gennaio 2010.
- [91] Nicola Mobilia Luciano consorti, *Manuale degli impianti antincendio, guida alla progettazione.:* dei.
- [92] Ing.Pasquale Cialdini, ""Interventi tecnici e pianificazione binazionale dell'emergenza per trafori stradali transfrontalieri", " in *La sicurezza ela vigilanza nei trafori transalpini:Monte Bianco, Frejus, Gran San Bernardo*, 2014, Dicembre.
- [93] S. Vogler, C. Diers, M. Martens, J.Lacroix, M.Steiner, P. Schmitz, M. Serrano B. Martin, "Recommendations for the enhancement of preventive tunnel safety," 2005.
- [94] S. Vogler, C. Diers, M. Martens, J.Lacroix, M.Steiner, P. Schmitz, M. Serrano B. Martin, "Recommendations for the enhancement of preventive tunnel safety," 2005, Novembre.
- [95] S. Vogler, C. Diers, M. Martens, J.Lacroix, M.Steiner, P. Schmitz, M. Serrano B. Martin, "Recommendation for the enhancement of preventive tunnel safety," 2005, Novembre.
- [96] Flavio J. Caputo, "L'innovazione Tecnologica: La Direttiva Europea 2004/54/CE," *strade & autostrade*, no. 4, 20017.
- [97] Francesca La Torre, Flavio Janeiro Caputo Lorenzo Domenichini, "Impiego delle pavimentazioni in calcestruzzo nelle gallerie strdali," *Strade & Autostrade*, no. 6, 2006.
- [98] Georg Fichnaller, Christian Franchini, studio di ingegneria EUT srl, La Galleria Laives, La prima galleria in Italia con pavimentazione strdale in calcestruzzo, Luglio 14.
- [99] Alessandro Focaracci, "Mitigazione del rischio in galleria," *quarry & construction*, no. 1, Gennaio 2010.
- [100] Dott. Ing. Lamberto Mazziotti, Vigili del Fuoco, Gli incendi in galleria: un probelma anche per le squadre di soccorso, 2002, Aprile.
- [101] Gianni Vittorio Armani, ANAS S.p.a., Smart Book, Smart Road, La strada all'avanguardia che corre con il progresso.
- [102] ENEA Ente per le nuove tecnologie l'energia e l'ambiente, Nicola Pacilio, Attilio Sacripanti, *Tunnel intelligenti, Gallerie dinamiche e analisi di rischio variabile nel tempo*, Prefazione a cura del Professor Carlo Rubbia, Ed., 2001.
- [103] Gianni Vittorio Armani, ANAS S.p.a, Smart Book, Smart Road, La strada all'avanguardia che corre con il progresso.

[104] Flavio J. Caputo, "L'innovazione tecnologica: La Direttiva Europea 2004/54/CE," *strade & autostrade*, no. 4, 2017.