

**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**



## **UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII  
Corso di Laurea in Ingegneria della Sicurezza Civile ed Industriale

### **Tesi di Laurea Magistrale**

# **INCENDI DI AUTOVEICOLI ALIMENTATI DA COMBUSTIBILI NON CONVENZIONALI IN GALLERIA: ANALISI SULL'EFFETTO DEL COMBUSTIBILE E DELL'ALIMENTAZIONE**

**Relatore:** Ing. Chiara Vianello

**Correlatore:** Ing. Paolo Mocellin

**Laureando:** DENIS ZANOTTO

ANNO ACCADEMICO 2024/2025



*E quindi uscimmo a riveder le stelle.*  
*(Divina Commedia, Inferno, Canto XXXIII)*



# Abstract

Questo lavoro di tesi si pone come obiettivo quello di indagare gli scenari d'incendio in galleria stradale di veicoli alimentati a combustibile alternativo. Prima di tutto sono state indagate le diverse tipologie di veicoli a combustibile alternativo: gas compressi, gas liquefatti e batterie.

Nello specifico sono stati analizzati i combustibili tradizionali liquidi (benzina e gasolio) quelli liquefatti (GPL, LNG), quelli compressi (CNG, l'idrogeno compresso), e quelli costituiti da batterie (celle agli ioni di litio).

Individuati i possibili rischi ai quali questi veicoli possono sottoporre gli utenti in caso d'incidente con scenario d'incendio in galleria si è iniziato, mediante l'analisi dell'albero degli eventi a individuare i possibili scenari finali che le diverse tipologie di combustibile potevano determinare.

Prima di passare ad una analisi quantitativa, si è realizzata un'analisi qualitativa riguardante l'attuale stato dell'arte che propone la letteratura, visto l'innovativo terreno d'indagine che offrono questi temi.

Da questa ricerca bibliografica sono emersi innumerevoli limiti e lacune che definiscono un dominio di indagine non ancora ben definito, soprattutto relativamente alla sperimentazione in galleria reale.

Oltre ai rischi che tali carburanti offrono, si è indagato il sistema preventivo e protettivo, per combattere gli scenari d'incendio, messo in campo da parte di chi gestisce l'organo galleria quotidianamente, nello specifico le tecnologie utilizzate (ad esempio la ventilazione meccanica d'emergenza). Infine, mediante stime, sono stati ricavati gli irraggiamenti che i modelli più diffusi d'incendio (pool-fire, Jet-fire, etc) generano sull'ambiente circostante, in particolare nell'auto più prossima, così da poter determinare con un approccio semplificato (NFPA 555), l' $HRR_{min}$  che permette di definire con buona approssimazione i tempi d'ignizione a cui un veicolo è potenzialmente soggetto nelle prime fasi dell'incendio.



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>0</b>
<b>Capitolo 1 Incidenti in galleria</b> .....	<b>2</b>
1.1 Incidentalità in galleria stradale .....	2
1.2 Casistica storica .....	4
1.3 Norme, Regolamenti, Tecnica .....	6
1.4 Fattori che influenzano gli Incidenti in galleria.....	8
1.5 Valutazione dei Rischi in Galleria .....	11
<b>Capitolo 2 Tecnologie dei veicoli</b> .....	<b>15</b>
2.1 Veicoli a GPL.....	15
2.2 Veicoli a gas naturale: LNG-CNG .....	17
2.3 Veicoli ad Idrogeno .....	19
2.4 Veicoli Elettrici .....	21
<b>Capitolo 3 Combustibili convenzionali e non convenzionali</b> .....	<b>24</b>
2.5 Combustibili Convenzionali .....	24
2.5.1 Benzina .....	24
2.5.2 Gasolio.....	26
2.6 Combustibili non Convenzionali .....	27
2.6.1 Combustibili Gassosi .....	28
2.6.2 Gas Naturale: CNG e LNG .....	29
2.6.3 Propano: LPG/GPL .....	35
2.6.4 Idrogeno: H <sub>2</sub> .....	38
2.6.5 Veicoli Elettrici: EV .....	43
2.7 Analisi della letteratura di scenari di incendio di veicoli con combustibili non convenzionali .....	47
2.7.1 Scenari di incendio del LPG/GPL.....	47
2.7.2 Scenari di incendio gas naturale.....	52
2.7.3 Scenari di incendio dell'Idrogeno .....	63
2.7.4 Scenari di incendio delle batterie.....	77
<b>Capitolo 3 Incendi in galleria e sistema di gestione della sicurezza</b> .....	<b>90</b>
3.1 Incendi in galleria .....	90
3.2 Sistemi di Prevenzione in Galleria.....	93
3.2.1 Illuminazione .....	93
3.2.2 Ventilazione.....	97
3.2.3 Vie d'esodo.....	108
3.2.4 Cartelli segnaletici .....	111
3.2.5 Barriere Semoventi e Semafori .....	112
3.3 Sistemi di Protezione.....	113
3.3.1 Sistemi antincendio.....	113
3.4 Sistemi di Gestione.....	118
3.4.1 Telefono di emergenza.....	118
3.4.2 Pulsante di allarme .....	119
3.4.3 Allarme automatico "passivo" .....	119
3.4.4 Rilevazione automatica dell'incendio mediante videosorveglianza.....	120
3.4.5 Rilevamento fumo-calore.....	121
3.4.6 Ritrasmissione radio.....	123

3.4.7 Altoparlanti .....	123
<b>3.5 Sistemi di Soccorso .....</b>	<b>124</b>
3.5.1 Soccorso di un veicolo a gas .....	125
3.5.2 Soccorso di un veicolo elettrico .....	127
<b>Capitolo 4 Analisi Quantitativa .....</b>	<b>129</b>
<b>4.1 HRR - Heat Release Rate .....</b>	<b>129</b>
4.1.1 Stima della Curva HRR-tempo .....	129
4.1.2 Curve HRR-tempo in base al combustibile alternativo.....	134
4.1.3 HRR Veicoli a combustione interna .....	136
4.1.4 HRR Veicoli a gas compresso e liquefatto .....	138
4.1.5 HRR Veicoli ad idrogeno .....	140
4.1.6 HRR Veicoli Elettrici .....	141
<b>4.2 Alberi degli Eventi - ETA .....</b>	<b>145</b>
4.2.1 Albero degli Eventi veicolo a combustibile liquido.....	146
4.2.2 Albero degli Eventi veicolo a combustibile liquefatto.....	147
4.2.3 Albero degli Eventi veicolo a combustibile compresso .....	148
4.2.4 Albero degli Eventi veicolo a batteria .....	149
<b>4.3 Tipologia e scenari d'incendio .....</b>	<b>151</b>
4.3.1 Scenari con veicoli a combustibile liquido.....	152
4.3.2 Scenari con veicoli a combustibile liquefatto .....	159
4.3.3 Scenari con veicoli a combustibile compresso .....	165
4.3.4 Scenari con veicoli elettrici.....	169
<b>Capitolo 5 Conclusioni .....</b>	<b>174</b>
<b>5.1 HRR<sub>min</sub> e Tempo di Ignizione .....</b>	<b>174</b>
<b>Capitolo 6 Riferimenti Bibliografici .....</b>	<b>179</b>
<b>Norme e Regolamenti: .....</b>	<b>179</b>
<b>Bibliografia Tecnica e Scientifica .....</b>	<b>179</b>



# Introduzione

Garantire la sicurezza all'interno delle gallerie stradali è una sfida complessa, poiché ogni tunnel presenta rischi specifici legati alle sue caratteristiche uniche. Questo aspetto è emerso in modo drammatico dopo una serie di gravi incidenti, tra cui incendi devastanti, che hanno scosso l'Europa tra la fine degli anni '90 e l'inizio del 2000. Tali eventi hanno messo in luce i limiti dell'approccio prescrittivo alla gestione del rischio, spingendo il legislatore ad adottare un metodo più moderno, noto come Risk Based Thinking. Questo approccio, più flessibile, consente di adattare la gestione del rischio in modo personalizzato alle peculiarità di ciascun tunnel.

Con la crescente diffusione di combustibili non convenzionali, le autorità che gestiscono le gallerie si trovano oggi ad affrontare nuove sfide. È necessario aggiornare continuamente le misure di prevenzione e mitigazione per tenere conto dei rischi emergenti associati a questi nuovi tipi di carburanti, soprattutto in caso di incidente.

Questo studio si propone di analizzare in modo approfondito tali rischi, partendo da un'analisi qualitativa preliminare per arrivare a una stima quantitativa del potenziale impatto di un rilascio di combustibile, in seguito a un incidente, se questo dovesse innescarsi. Per farlo, si è partiti dall'esplorazione delle diverse tipologie di combustibili alternativi – come gas compressi, gas liquefatti e batterie – sempre più diffusi nella mobilità privata. Tra i combustibili presi in considerazione ci sono sia quelli tradizionali, come benzina e gasolio, che quelli alternativi, tra cui GPL, GNL, idrogeno compresso e batterie agli ioni di litio.

Prima di procedere con un'analisi quantitativa, è stata svolta una valutazione qualitativa dello stato dell'arte, che ha evidenziato notevoli lacune nella letteratura scientifica, in particolare per quanto riguarda la sperimentazione diretta in galleria. In questa fase si sono analizzate le curve HRR (Heat Release Rate) nel tempo, relative alla combustione di veicoli alimentati con carburanti non convenzionali, per stimare l'energia termica coinvolta (in kW) e confrontarla con i valori modellati relativi all'irraggiamento.

Una volta identificati i potenziali rischi che questi veicoli possono rappresentare, ad esempio a seguito della rottura del serbatoio e del rilascio di sostanze infiammabili, sono stati analizzati gli alberi degli eventi (ETA) per delineare i possibili scenari, tra cui incendi localizzati (pool-fire), incendi a getto (jet-fire), esplosioni (BLEVE) e rilascio di sostanze tossiche.

In parallelo, lo studio ha esaminato le strategie di risposta adottate dai gestori delle gallerie per combattere gli incendi, analizzando sistemi di prevenzione e protezione come la ventilazione

meccanica d'emergenza, fondamentale per controllare il movimento dei fumi e facilitare l'evacuazione in sicurezza degli automobilisti.

Infine, mediante stime quantitative, sono stati calcolati i livelli di irraggiamento generati dai principali modelli di incendio, simulando il comportamento delle fiamme derivanti da combustibili come benzina, GPL, idrogeno e batterie elettriche. Si è proceduto a modellare queste fiamme come corpi solidi emittenti, valutando il calore irradiato verso il veicolo più vicino, situato a una distanza di sicurezza stimata di almeno 5 metri. Successivamente, è stato calcolato il tempo necessario affinché l'irraggiamento provochi l'ignizione del veicolo adiacente, utilizzando i parametri stabiliti dalla NFPA 555 per stimare l'HRRmin, ovvero il calore minimo necessario per innescare l'incendio.

Questa analisi rappresenta un passo cruciale per comprendere meglio i rischi legati ai combustibili non convenzionali e migliorare le strategie di gestione della sicurezza nelle gallerie stradali.

# Capitolo 1 Incidenti in galleria

## 1.1 Incidentalità in galleria stradale

Gli incidenti automobilistici in galleria sono al centro di approfondite analisi a partire dalla fine degli anni duemila quando si verificarono alcuni tra gli eventi più catastrofici mai accaduti, come l'incendio nel tunnel del Monte Bianco nel 1999, quello del San Gottardo nel 2001 e quello del Frejus nel 2005. Grazie a questi eventi ha ripreso vigore la discussione, in Europa e nel mondo, sullo stato di sicurezza delle gallerie stradali.

Nel corso degli ultimi 25 anni sono stati pubblicati molti lavori relativi alla sicurezza antincendio riguardo i tunnel, tuttavia gran parte del lavoro a disposizione è relativo ai combustibili tradizionali con scarsa e/o limitata trattazione dei nuovi combustibili che nell'ultimo decennio hanno preso piede. L'obiettivo di gran parte dei lavori è presentare dati statistici sugli incendi in galleria in diversi paesi e altre informazioni che possono essere utili per descrivere le caratteristiche degli incendi in galleria reali in modo che i parametri di rischio degli incendi possano essere meglio stimati e gestiti adeguatamente, ad esempio nelle fasi di analisi dei rischi, di progettazione delle nuove gallerie o di adeguamento delle esistenti e nella fase di esercizio.

Tali lavori hanno inoltre il compito di servire come base per la valutazione del funzionamento delle gallerie, di migliorare l'efficacia dell'azione dei servizi di emergenza e sviluppare la sensibilità degli utenti.

Di seguito viene presentata una caratterizzazione degli incidenti in galleria, seguita da una discussione sui fattori di rischio che influenzano tali fenomeni. In letteratura viene data maggiore attenzione alla frequenza degli incendi, vista la loro rarità, piuttosto che alla discussione delle conseguenze degli incidenti, poiché le conseguenze di uno specifico incendio in una galleria dipendono in larga misura dalle circostanze di un singolo evento.

Esclusi gli eventi più noti per la loro severità, la maggior parte degli incidenti nei tunnel sono eventi relativamente piccoli che, tuttavia possono potenzialmente trasformarsi in eventi più gravi a seconda dei parametri che influenzano l'evento stesso.

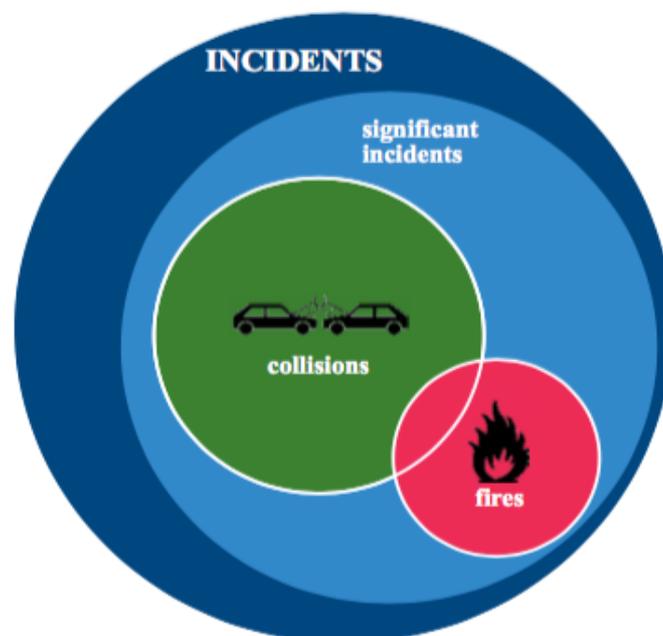
Il confinamento dello spazio in una galleria fornisce un ambiente nel quale possono svilupparsi rapidamente condizioni critiche in caso d'incendio.

Sono state eseguite diverse serie di prove al fuoco nell'ambito di programmi di ricerca nazionali ed internazionali al fine di confermare le ipotesi fatte relative alle dimensioni e al comportamento dell'incendio: in questi test l'attenzione si è concentrata su incendi su larga scala con alti tassi di rilascio termico. Queste prove vengono eseguite in determinate condizioni e i successivi risultati

devono essere verificati dai dati sugli incendi reali in termini di statistiche sugli incidenti. La raccolta di dati per questi fini statistici richiede una definizione più rigorosa di eventi che dovrebbero essere considerati come incendi.

Ad oggi esistono pratiche diverse da paese a paese nel registrare quale evento sia definibile e registrabile come incendio. Per motivi di semplificazione riportiamo la definizione di incendio di PIARC, ossia il Permanent International Association of road Congresses.

Secondo la definizione di PIARC è da considerarsi un incendio: “un evento anormale e non pianificato (inclusi gli incidenti) che influisce negativamente sulle operazioni e sulla sicurezza della galleria”.



*Figura 1: Diagramma che definisce l'insieme incendio nella totalità degli scenari, PIARC.*

Esistono anche pratiche diverse su come vengono rilevati gli incendi e sulla registrazione o meno delle cause. La dimensione del fuoco spesso non viene stimata e neppure registrata, quindi in molti casi la dimensione del fuoco deve essere stimata sulla base di indicatori statistici e/o tabellari.

Le diverse pratiche nella raccolta dei dati possono essere spiegate da diversi fattori, come le diverse ubicazioni delle gallerie (urbane o rurali), la densità del traffico, il livello variabile di monitoraggio dovuto alla lunghezza del tunnel, etc.

Per una migliore comprensione della frequenza e della gravità degli incendi nei tunnel potrebbe e dovrebbe essere necessario analizzare gli eventi che hanno portato all'incendio attraverso il carico d'incendio, la velocità di rilascio del calore, la durata e lo sviluppo dell'incendio ed eventualmente anche le cause scatenanti e le relative conseguenze.

Fattori chiave relativi alla caratterizzazione degli incidenti in galleria:

- Sviluppo del fuoco (Velocità):
- Sviluppo lento con fumo;
- Sviluppo rapido;
- Sviluppo ultra-rapido o esplosivo;

Dimensioni del fuoco:

- Sviluppato;
- Completamente sviluppato;
- Non completamente sviluppato;

Cause dell'incendio:

- Collisione;
- Difetto nel veicolo che causa l'incendio (motore surriscaldato, rotture, etc);

## 1.2 Casistica storica

Nel corso dell'ultimo ventennio, nonostante le accresciute misure di prevenzione e mitigazione negli ambienti confinati figlie dei grandi disastri verificatosi a cavallo del nuovo millennio, si sono comunque consumati diversi incidenti che hanno coinvolto veicoli a propulsione alternativa. La maggior parte degli incidenti segnalati dalle autorità competenti si riferisce a veicoli a metano e a GPL e in misura minore e più recente a veicoli a batteria elettrica. Di seguito andremo ad elencare i 26 incidenti, nel periodo 1999-2016 raccolti dal RI.SE Report 2018:20, distinguendoli in base al tipo di combustibile che i veicoli utilizzavano: CNG, GPL e EV.

Tabella 1: Incidentalità 1999-2016 RI.SE Report 2018:20 Ying Zhen Li.

Anno	Paese	Città	Tipo Veicolo	Luogo Incendio	Accensione	Conseguenze
1999	FRA	Venissieux	GPL		Incendio Doloso	Esplosione; 6 VVF feriti gravemente;
2002	FRA	Seine-et-Marne	GPL Auto	Garage		Esplosione; 1 edificio crolla; 39 case danneggiate;
2002	USA		CNG Car		Incendio	Rottura;
2006	ITA	Collatino	GPL Auto	Accesso ad un Garage	Incendio Doloso	Esplosione; Danni severi alle auto, a 2 garage, ai negozi, incendio propagato agli appartamenti;
2007	ITA	Salerno	GPL Auto	Garage Sotterraneo	Perdita Di Gas	Esplosione;

						3 edifici terziario distrutti; altri 5 edifici danneggiati;
2007	USA	Seattle	CNG Car	Strada	Incendio Doloso	12 auto danneggiate; Rottura (esplosione); Detriti-Schegge fino a 30m;
2007	USA	California	CNG Car(Van)	Stazione di servizio		Autista deceduto;
2008	ITA	Rovigo	GPL Auto	Garage Sottterraneo		Incendio diffuso al garage adiacente;
2008	UK	South Yorksgire	GPL Auto	Strada	Sigaretta	Esplosione;
2008	MYS	Mallacca	GPL	Stazione di Servizio		Esplosione; Passeggeri feriti gravemente;
2008	UK	Sampford	GPL Auto	Strada		Incendio e distruzione auto;
2009	ITA	Marigliano	GPL	Parcheggio		Esplosione; Danneggiamento veicoli ed Edifici;
2011	CHN	Hangzhou	EV Zotye	Strada		Nessun ferito;
2012	USA	California	EV Karma	Parcheggio	Surriscaldamento	Nessun ferito;
2012	CHN	Shenzheng	EV BYD	Strada	Incidente con altra auto	3 persone decedute;
2012	NLD	Wassenaar	CNG Bus	Bordo strada	Motore a fuoco	Nessun ferito; Jet-Fire di 15-20 m
2013	USA	Washington	EV Tesla	Strada	Fuga termica	Incendio;
2013	MEX	Merida	EV Tesla	Strada	Incidente contro un albero	Incendio;
2013	USA	California	EV Tesla	Strada	Fuga termica	Incendio;
2014	CAN	Toronto	EV Tesla	Garage		Incendio;
2015	USA	Indianapolis	CNG Camion Rifiuti	Fuori da un negozio	Fuoco zona posteriore	1 VVF ferito; Finestre rotte; 1 Serbatoi lanciato a 400m;
2016	USA	Hamilton New Jersey	CNG Camion Rifiuti	Strada	Fuoco	Jet-Fire/esplosione; Danni a 4 case;
2016	SWE	Gothenburg	CNG BUS	Fuori da galleria	Fuoco sul tetto	Rottura; 2 VVF feriti;
2016	SWE	Kramfors	CNG Auto		Fuoco	Esplosione; Tetto lanciato a 30m;
2016	SWE	Katrineholm	CNG Camion Rifiuti		Fuoco	Cambio completamente bruciato;
2016	NOR	Gjerstad	EV Tesla	Stazione di Ricarica	Corto Circuito	Incendio di tutto il mezzo;
Totale Incidenti (GPL+CNG+EV)						26

## 1.3 Norme, Regolamenti, Tecnica

Al pari dei ponti, le gallerie costituiscono un elemento di connessione tra due luoghi geograficamente divisi. In quasi la totalità dei paesi sulla terra sono presenti gallerie, in particolare in nazioni ad orografia complessa come è l'Italia.

Sul nostro territorio nazionale insistono circa 2600 chilometri di tunnel stradali, suddivisi in: 907 km nel Nord Ovest, 488 km nel Nord Est, 410 km nel centro, 527 nel Sud e 268 nelle Isole.

La gestione della sicurezza su queste infrastrutture è ricondotta a due principali normative:

- Direttiva EU 2004/54/CE: (Decreto Attuativo D.Lgs 264/2006) la direttiva EU disciplina i requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Trans European Network-Transport (TEN-T), che garantiscono un livello minimo di sicurezza agli utenti della rete mediante la prevenzione di situazioni critiche e la protezione in caso d'incendio;
- D.P.R. n.151/2011: il decreto del presidente della repubblica disciplina i procedimenti relativi ai controlli di prevenzione incendi e la verifica delle condizioni antincendio;

Entrambe le norme sopra citate si applicano a gallerie di lunghezza superiore a 500 metri, escludendo così quelle con lunghezza inferiore a 500 metri.

Le gallerie Italiane con lunghezza inferiore a 500 metri costituiscono il 33% dell'estensione totale, quelle tra i 500 e i 1000 metri il 21%, quelle tra 1000 e 3000 metri il 35% e infine quelle oltre i 3000 metri l'11%.

Per le gallerie con lunghezza oltre i 500 metri si applica il D.P.R. 151/2011, Allegato I, Attività n° 80 e le relative regole tecniche di prevenzione incendi.

Le regole tecniche di prevenzione incendi regolamentano i requisiti di sicurezza degli impianti più importanti: quello di aspirazione e quello di ventilazione meccanica d'emergenza, sia in condizioni ordinarie e non ordinarie.

Gli enti gestori delle gallerie non soggette alla disciplina del D. Lgs. 81/2008, sono tenuti secondo lo stesso decreto, a mantenere in stato di efficienza i sistemi, i dispositivi, le attrezzature e le misure di sicurezza antincendio adottate nonché ad eseguire verifiche ed interventi di manutenzione, secondo le cadenze periodiche nel Certificato di Prevenzione Incendi (CPI).

Gli enti gestori devono garantire un adeguato livello informativo sui rischi d'incendio, sulle relative misure di prevenzione e protezione adottate, sulle precauzioni da osservare e sulle procedure da attuare in caso d'incendio.

Infine l'ente gestore deve tenere e aggiornare un registro dove annotare gli interventi di manutenzione e informazione, e renderlo disponibile in caso di visita ispettiva da parte del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.

Tabella 2: Tabella Attività n°80, Allegato I, D.P.R. 151/2011.

D.P.R. 151/2011, Allegato I, Attività n°80				
N°	Attività	Categoria		
80	Gallerie stradali di lunghezza superiore a 500 me ferroviaria superiore a 2000.	A	B	C
		Tutte		

La gestione della sicurezza delle gallerie stradali della rete TEN-T, con lunghezza superiore a 500 metri, è in capo all'ente gestore dell'infrastruttura. A disciplinarlo è la Direttiva EU 2004/54/CE "Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Rete Stradale Trans-Europea", recepito dall'ordinamento italiano attraverso il D.Lgs. 264/2006. La direttiva stabilisce anche i criteri per la gestione: del traffico, del servizio di pronto intervento, degli incidenti, delle informazioni da comunicare agli utenti relative al comportamento da seguire in galleria e delle modalità di comunicazione tra l'ente gestore della galleria e i servizi di pronto intervento in caso di scenari incidentali.

Tabella 3: Direttiva 2004/54/CE: Requisiti sicurezza gallerie stradali.

Direttiva 2004/54/CE: Requisiti di Sicurezza	
Gallerie	Descrizione
Lunghezza oltre 500 m Qualunque Volume di Traffico	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Punti di attraversamento dello spartitraffico al di fuori di ciascun portale;</li> <li>● Caratteristiche ignifughe delle strutture e degli impianti;</li> <li>● Illuminazione ordinaria, di sicurezza e di evacuazione;</li> <li>● Stazioni d'emergenza almeno ogni 150 m;</li> <li>● Erogazione idrica almeno ogni 250 m;</li> <li>● Segnaletica stradale;</li> <li>● Impianti di sorveglianza a telecamere e di sorveglianza per il rilevamento automatico degli incidenti e/o degli incendi;</li> <li>● Sistemi di comunicazione con messaggi di emergenza via radio destinati agli utenti della galleria;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Sistemi di comunicazione con altoparlanti nei rifugi e presso le uscite;</li> <li>● Alimentazione elettrica;</li> <li>● Dislivelli inferiori o uguali al 5%</li> <li>● Banchine pedonali di emergenza;</li> <li>● Drenaggio dei liquidi infiammabili e tossici;</li> </ul>
Lunghezza oltre i 1000 m	<p>Ai requisiti precedenti si aggiungono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Gallerie trasversali per i servizi di pronto intervento almeno ogni 1500 m e semafori prima degli ingressi;</li> </ul>
Lunghezza oltre i 1000 m Volume di Traffico superiori a 2000 veicoli/corsia	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Piazzole di sosta almeno ogni 1000 m;</li> <li>● Ventilazione meccanica e i servizi di comunicazione con ritrasmissione radio ad uso esclusivo dei servizi di pronto intervento;</li> <li>● Uscite d'emergenza almeno ogni 500 m.</li> </ul>

## 1.4 Fattori che influenzano gli Incidenti in galleria

La maggior parte degli incidenti in galleria avviene a causa di difetti del veicolo, errore umano e condizioni ambientali avverse. Tuttavia, gli incidenti causati da collisioni possono portare a gravi conseguenze in quanto possono sviluppare degli incendi con un tasso di rapidità significativamente maggiore rispetto ad altre tipologie d'incidente. Inoltre, sono spesso coinvolte persone che non sono in grado di fuggire rapidamente e autonomamente dal veicolo in fiamme causandone la dipartita.

Nel determinare la probabilità o la frequenza d'incendio sono rilevanti i seguenti fattori:

- Tasso di collisione;
- Percentuale di traffico da veicoli pesanti (LGV-Large Goods Vehicle): potrebbe esserci una sensibile differenza tra il tasso di crescita di un incendio in un veicolo leggero rispetto ad uno pesante ad uso commerciale.
- Gradienti nel tunnel e lunghezza del gradiente;
- Dislivelli sui percorsi che portano alla galleria;
- Combinazione di lunghezza e pendenza della galleria;
- Composizione, età, standard, livello di manutenzione dei veicoli che compongono il traffico veicolare nella galleria, specie dei veicoli pesanti, etc.

Qualora si verifichi un incidente che causi un incendio in galleria, a seconda che l'evento coinvolga automobili, veicoli leggeri, veicoli pesanti o veicoli cisterna le grandezze in gioco variano in un intervallo molto ampio.

A tal proposito risulta emblematica la tabella sottostante che rapporta in maniera qualitativa il tipo di veicolo all'intensità potenziale dell'incendio. Per esempio tra una piccola auto privata [6 MW] e un autotreno pesante [100 MW], intercorre un intero ordine di grandezza. Da questa immediata comparazione si comprende perché in molte gallerie il traffico dei mezzi pesanti sia limitato in termini di frequenza e/o accessibilità. Il potenziale carico d'incendio che un camion carico di merce costituisce rappresenta una grave minaccia per la salvaguardia delle persone e delle cose, in caso di incendio, qualora la galleria non sia stata progettata con gli adeguati impianti di prevenzione e mitigazione che la normativa prevede. A titolo esemplificativo è bene citare l'incidente più famoso causato da un autoarticolato: l'incendio del traforo del Monte Bianco del 24 marzo 1999.

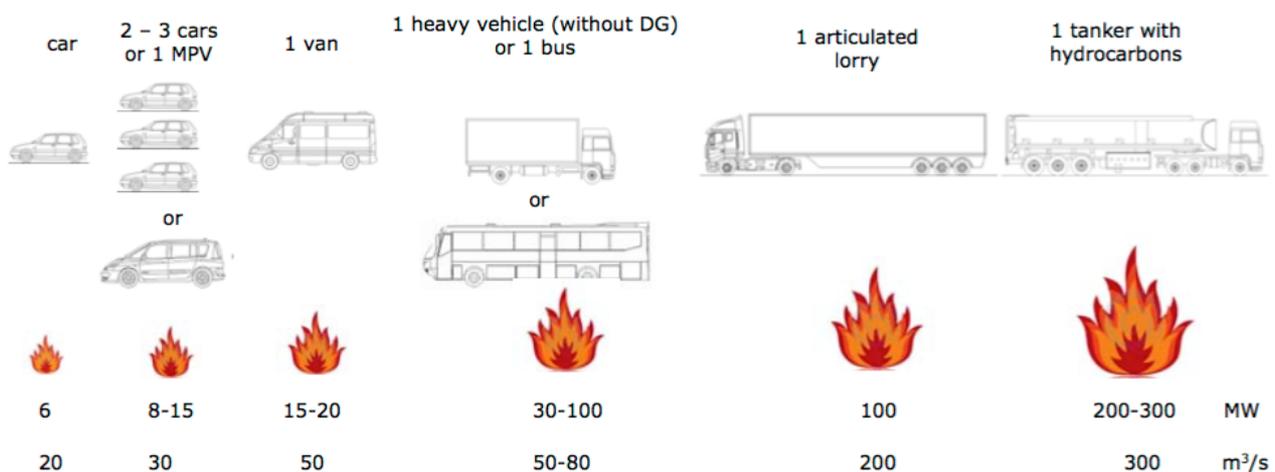


Figura 2 Schema indicante i valori d'incendio in base alla categoria di veicolo,  
SpringerBrief in Applied Sciences and Technology

Un altro aspetto significativo da indagare è dove, dal punto di vista probabilistico, si verifichino con maggior frequenza gli incidenti all'interno delle gallerie. Uno studio austriaco, condotto da C. Nussbaumer "Safety of Road Tunnels-Traffic safety in Highway and Expressway tunnel 1999-2009" del 2009, ha analizzato i tassi di collisione rispetto alle zone della galleria.

A tal fine sono state definite cinque zone, sia nei tunnel unidirezionali (arancio) e in quelli bidirezionali (blu):

- Zona pre-portale: 250 m prima dell'entrata della galleria;
- Area del portale: 10 m prima e dopo l'entrata della galleria;
- Area d'ingresso: da 10 m a 150 m all'interno della galleria;

- Zona interna: l'area lontana 150 metri dagli ingressi della galleria;
- Zona di uscita: fino a 250 m dopo la galleria;

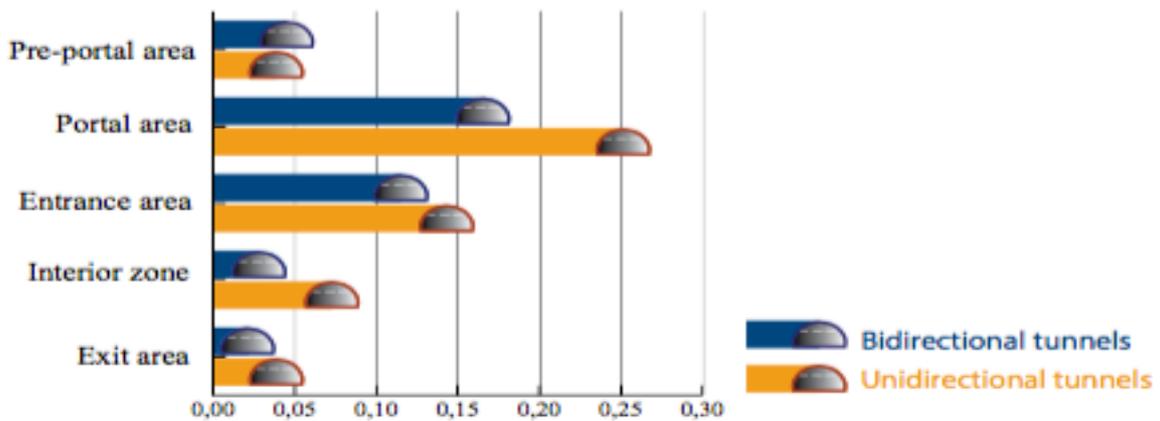


Figura 3: grafico che mette in rapporto la zona del tunnel con la probabilità che si verifichi un incidente, *Safety of Road Tunnels-Traffic safety in Highway and Expressway tunnel 1999-2009*

Contrariamente a quanto si pensi, i tassi di collisione più alti sono stati trovati nell'area del portale, seguita dall'area d'ingresso e non all'interno della galleria come ci si aspettava. La zona interna mostra tassi di collisione significativamente inferiori.

Un altro aspetto particolare è legato alla direzione del traffico, al tal proposito emerge senza nessuna incertezza che i tassi di collisione risultano più elevati nelle gallerie con traffico unidirezionale anziché quelle bidirezionali come suggerirebbe l'esperienza comune.

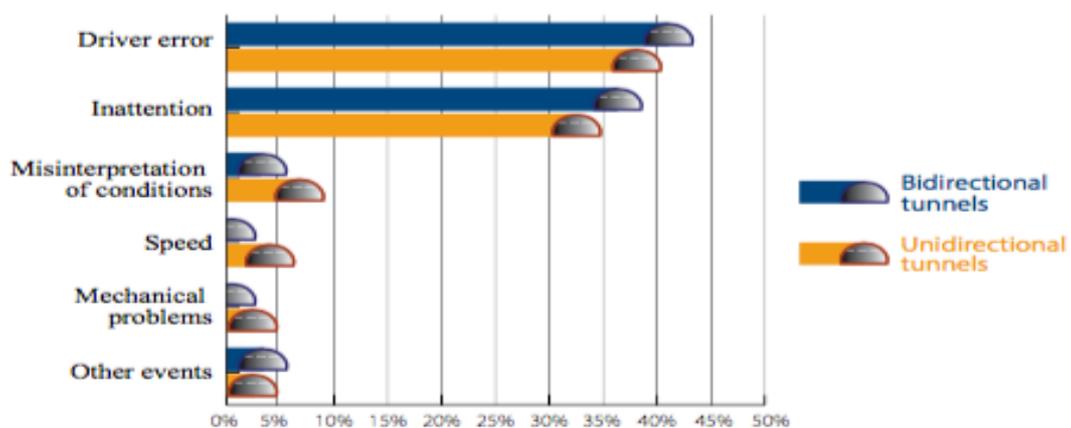


Figura 4: Grafico che mostra quali sono dal punto di vista probabilistico le primarie cause d'incidente in galleria, *Safety of Road Tunnels-Traffic safety in Highway and Expressway tunnel 1999-2009*

Lo stesso studio ha approfondito anche le cause scatenanti le collisioni, nello specifico sono state esaminate 502 collisioni in galleria raggruppandole in cause dominanti:

- Errore dell'autista;
- Disattenzione;
- Interpretazione errata delle condizioni;
- Eccesso di velocità;
- Problemi meccanici;
- Altri problemi;

Le cause dominanti che generano incidenti in galleria sono risultate l'errore alla guida e la mancanza di consapevolezza da parte degli utenti.

Lo studio, come sopra dimostrato, ha rivelato che i tunnel unidirezionali presentano un tasso di collisione decisamente più elevato rispetto alle gallerie bidirezionali, tuttavia tali valori si riferiscono a gallerie con lunghezza media e di traffico differenti.

Per queste ragioni il modello di rischio utilizzato nelle gallerie austriache include una correzione specifica per tener conto dell'influenza di questi parametri nel calcolo dei tassi di collisione per ogni singola galleria. In Austria, in un numero sempre maggiore di gallerie è installato un sistema per il controllo automatico della velocità chiamato "controllo di sezione", simile al nostrano "Tutor", che mostra effetti positivi sulla riduzione del rischio di collisione.

## **1.5 Valutazione dei Rischi in Galleria**

In letteratura esiste una limitata antologia riguardante i rischi legati all'innescò e alla propagazione di incendi di veicoli a combustibili alternativi in galleria. Le cause sono da ricercare nella limitata estensione che la tecnologia del gas compresso e dell'energia elettrica avevano all'interno del panorama veicolare dei paesi sviluppati. Solo grazie all'aumento della sensibilità nei confronti dell'ambiente e del clima, le case automobilistiche hanno iniziato ad investire in veicoli per il trasporto di persone e cose non a combustione interna.

Già a partire dallo shock energetico, causato dalla guerra dello Yom Kippur del 1973 in Medio Oriente, si erano iniziati ad ingegnerizzare i primi veicoli alimentati a gas, soprattutto a GPL e a metano. Tuttavia, la forte crescita economica degli anni '80 e '90 e il costo limitato di benzina e gasolio, hanno relegato i combustibili alternativi ad una nicchia del mercato. La diffusione delle tecnologie a trazione elettrica e ad idrogeno è invece più recente e ancora in fase di sviluppo, infatti i primi prototipi di auto ad idrogeno ed elettriche risalgono alla fine degli anni '90 e venivano mostrati agli autosaloni più per motivi di marketing che di ricerca e sviluppo.

L'accelerazione decisiva per investire in queste tecnologie è arrivata alla firma del Protocollo di Kyoto (1997) da parte dei paesi industrializzati, che stabiliva i primi obblighi di riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera (CO, CO<sub>2</sub>, etc). In questo modo la volontà politica ha dato l'input definitivo alla crescita del mercato dei veicoli a combustione non-convenzionale.

Sempre tra la fine degli anni '90 e l'inizio degli anni 2000, a causa di alcuni tra i più tristemente famosi disastri in galleria, si sono iniziate a migliorare le condizioni di sicurezza delle gallerie stradali. Si è passati da un metodo prescrittivo ad uno basato sul Risk Thinking che meglio si adatta alle varie tipologie di galleria stradale e veicolo che l'attraversa.

Fino a non pochi anni fa, in molti paesi, la progettazione della sicurezza antincendio nelle gallerie stradali si basava in larga misura sulle prescrizioni contenute in regolamenti e linee guida. Se le prescrizioni applicabili relative alle normative vigenti erano soddisfatte, la galleria era ritenuta sicura. Questo tipo di approccio prescrittivo presenta tuttavia molte lacune:

- Qualora la galleria soddisfi tutti i requisiti normativi, rimane sempre un rischio residuo che viene totalmente ignorato;
- Un approccio prescrittivo definisce degli standard per tutti i sistemi di galleria stradale, tuttavia questi standard non sono sempre idonei per tenere conto delle condizioni specifiche di una particolare galleria. Inoltre, al verificarsi di un grave incidente, lo scenario cambia totalmente rispetto al normale funzionamento, causando una serie di situazioni differenti che trascendono l'attuale esperienza operativa.

È quindi buona norma utilizzare un approccio basato sulla valutazione del rischio, in aggiunta al tradizionale approccio prescrittivo, al fine di considerare le caratteristiche di un sistema galleria specifico e il loro impatto sulla sicurezza.

Un approccio basato sul rischio può analizzare diverse tipologie di rischio, dal danno nei confronti di un gruppo di persone (rischio sociale) o di una singola persona (rischio individuale), della proprietà privata, dell'ambiente, etc. Generalmente le analisi dei rischi per le gallerie stradali si focalizzano sul rischio sociale degli utenti della galleria, che può essere espresso come il numero atteso dei decessi in un anno oppure come la curva che mette in relazione la frequenza (tasso di accadimento) con le conseguenze (numero di decessi) dei possibili incidenti in galleria.

La valutazione dei rischi è un approccio ingegneristico olistico che analizza le sequenze e le interrelazioni nei potenziali eventi (incidenti, incendi, esplosioni, etc), così da individuare i punti deboli del sistema e mitigarli attraverso interventi specifici che migliorano la sicurezza.

Il processo di valutazione dei rischi si articola in tre fasi principali:

- **Analisi dei rischi:** l'analisi dei rischi si basa prima di tutto sull'identificazione dei pericoli e la stima delle probabilità di accadimento e delle possibili conseguenze che ciascun rischio comporta. L'analisi dei rischi può essere condotta mediante più approcci: qualitativo e quantitativo o la combinazione dei due.

Per quanto riguarda l'analisi dei rischi in galleria sono consigliate due tipologie di approccio:

- Un approccio basato sugli scenari che analizza una serie definita di scenari rilevanti, analizzandoli individualmente;
- Un approccio basato sul sistema che analizza il sistema nella sua interezza attraverso un processo integrato, includendo tutti gli scenari rilevanti che influenzano il rischio nella galleria, generando indicatori di rischio per l'intero sistema galleria.

Per l'analisi dei rischi basata sul sistema, il metodo quantitativo è il più diffuso.

Le probabilità relative al verificarsi di un incidente e le loro conseguenze per diversi indicatori di danno (lesioni, decessi, danni alle cose, interruzione del servizio, etc), come pure il rischio risultante, sono stimate quantitativamente, tenendo in considerazione i fattori rilevanti del sistema e le loro interazioni.

- **Valutazione dei rischi:** la valutazione dei rischi si occupa dell'aspetto relativo all'accettabilità dei rischi attraverso una discussione esplicita sui criteri di sicurezza.

Per una valutazione sistematica dei rischi occorre stabilire i criteri di sicurezza e i livelli di rischio, così da definire se il rischio sia o meno accettabile. I criteri di accettabilità devono essere selezionati in funzione del tipo di analisi dei rischi che si intende eseguire: criteri basati sugli scenari (rischio individuale, rischio sociale, etc) e criteri basati sul sistema.

Esistono diversi metodi di valutazione dei rischi: approccio costi-efficacia, confronto relativo, etc. Però, nella pratica quotidiana si applica una combinazione di più approcci.

- **Pianificazione delle misure di sicurezza:** se al termine del Risk Assessment, il rischio stimato non risulta accettabile, sarà necessario predisporre ulteriori misure di prevenzione e precauzione. L'efficacia di queste misure aggiuntive, anche rispetto ai costi, può essere valutata indagandone l'impatto sulla frequenza e sulla magnitudo in diversi scenari.

La valutazione dei rischi nelle gallerie stradali consente di realizzare un'analisi strutturata, armonizzata e trasparente per una specifica galleria, inclusa la considerazione dei fattori d'influenza rilevanti e delle loro interazioni.

I modelli di valutazione del rischio consentono una compressione maggiore e più approfondita dei processi, evitando di basarsi soltanto sull'approccio legato all'esperienza e all'applicazione sterile della normativa. Inoltre, la valutazione dei rischi permette di valutare le misure di sicurezza aggiuntive in termini di mitigazione dei rischi, confrontando le varie alternative.

In conclusione, la valutazione dei rischi può essere un utile strumento capace di completare i tradizionali metodi prescrittivi basati su norme e linee guida. Quindi, spetterà al progettista stabilire di volta in volta il metodo migliore da applicare all'analisi dei rischi, in base al tipo di problema che si trova a dover risolvere.

Nonostante i modelli utilizzati nell'analisi dei rischi cerchino di avvicinarsi il più possibile alla realtà, attraverso dati il più realistici possibili, è inevitabile che i modelli abbiano comunque un certo grado di incertezza ed indeterminazione nei risultati. Considerando tali livelli d'incertezza, i risultati dell'analisi del rischio dovranno essere supportati da adeguati studi di sensitività.

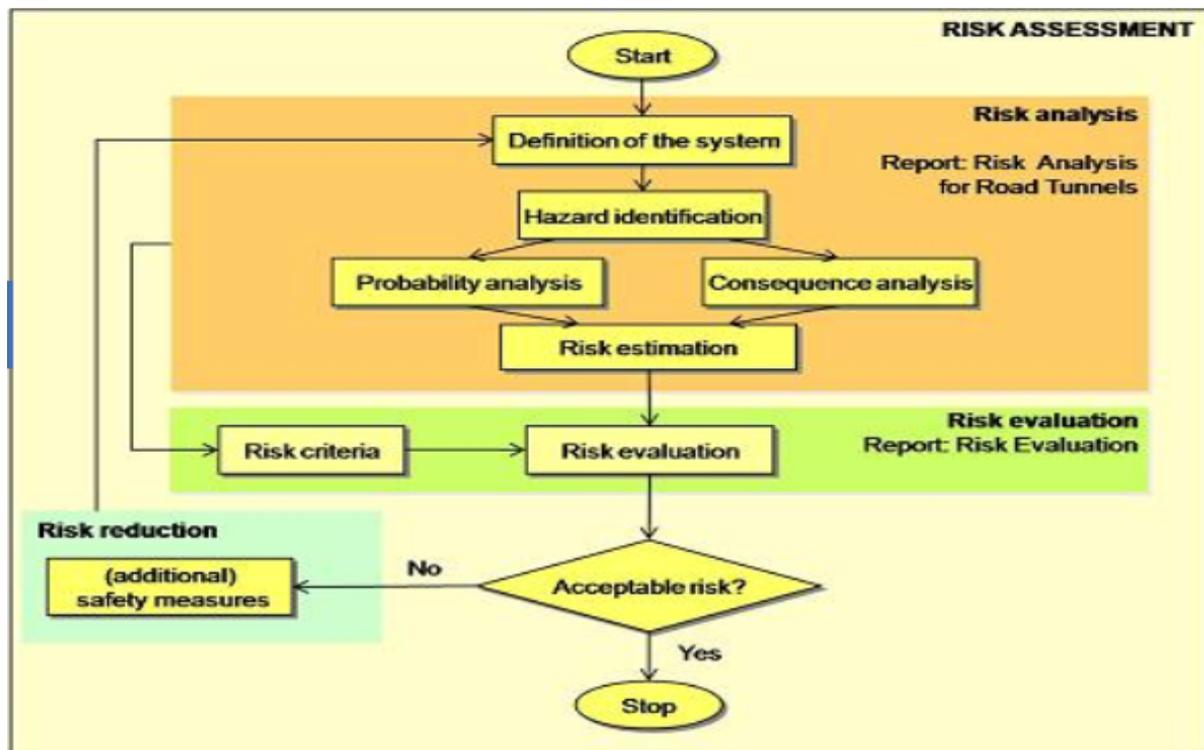


Figura 5: diagramma logico per stabilire se il livello di rischio della galleria risulta accettabile. PIARC

# Capitolo 2 Tecnologie dei veicoli

## 2.1 Veicoli a GPL

Quello che comunemente viene chiamato GPL, non è altro che gas di petrolio liquefatto composto da una miscela prevalentemente di Propano e Butano ed altri componenti.

I veicoli a propano offrono ai consumatori una valida alternativa ai veicoli alimentati con i tradizionali combustibili liquidi: benzina e gasolio.

I veicoli a GPL sono ad oggi disponibili nel mercato sia come tipo dedicato, monovalenti, che bi-fuel, bivalenti. Nei veicoli monovalenti il GPL è l'unica fonte di energia, mentre nei mezzi bivalenti ci sono due sistemi di alimentazione separati che permettono al veicolo di essere utilizzato a benzina o a propano in maniera indistinta.



*Figura 6: Due serbatoio di GPL collocati nel vano dedicato alla ruota sostitutiva, Safety Car Rimini*

In generale, i veicoli a GPL sono paragonabili ai veicoli alimentati convenzionalmente in termini di potenza erogata, accelerazione, velocità di crociera ed autonomia.

Attualmente nel mercato esistono diversi modelli di veicoli a propano incasellabili tra le classi di veicoli leggeri, medi e pesanti.

I veicoli a GPL presentano un esborso per l'acquisto maggiore rispetto ad un veicolo a combustibile tradizionale, tuttavia i costi di manutenzione inferiori, le ormai buone prestazioni di accensione in condizioni di freddo, le minori emissioni di carbonio e la bassa contaminazione da olio; rendono tali mezzi popolari per un'utenza che presenta la necessità di avere costi ridotti ed elevate percorrenze come accade per camion, taxi, spazzatrici stradali e scuolabus.

Generalmente il GPL viene immagazzinato sotto pressione in uno stato bi-fase, liquido-compresso. Quando un serbatoio di stoccaggio è pieno, il propano è in gran parte liquido con un po' di vapore

gassoso nella parte sommitale del serbatoio. La fase gas del propano nel serbatoio è ciò che viene utilizzato come carburante.

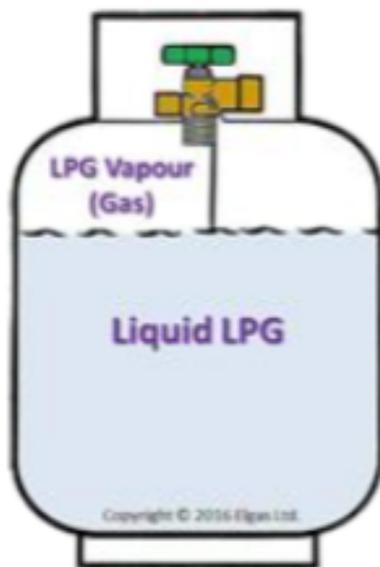


Figura 7: Sezione bombola domestica di GPL: fase gas e fase liquida, PROLINE

Le principali proprietà che rendono il GPL un carburante attraente per i veicoli sono il suo alto numero di ottani e la totale compatibilità con i motori a combustione interna con accensione a scintilla. Il propano si presenta naturalmente come un gas alcalino a 3 atomi di carbonio e 8 di idrogeno:  $C_3H_8$ . Il propano può essere liquefatto attraverso una pressurizzazione a 1220 KPa, che aumenta la sua densità energetica di un fattore di 270 rispetto alla sua forma gassosa.

In termini di utilizzo per l'autotrazione, il carburante GPL deve essere costituito da almeno il 90% di propano, non più del 5% di propilene e non più del 2.5% di altri gas come butano e butilene.

Tabella 4: Proprietà chimico-fisiche del propano. Fonte schede di sicurezza Merck KGaA.

Proprietà	Propano
Formula Chimica	$C_3H_8$
Densità Energetica	23.648 MJ/m <sup>3</sup>
Rapporto Stechiometrico Aria/Carburante	15.5
Densità del gas a 15 °C	1.85 Kg/m <sup>3</sup>
Densità del liquido a 15 °C	505 Km/m <sup>3</sup>
Temperatura di Auto-Accensione	450 °C (724 K)
Peso Specifico a 15 °C	0.85

## 2.2 Veicoli a gas naturale: LNG-CNG

I veicoli a gas naturale sono mezzi a combustibile alternativo che utilizzano il metano in più forme: CNG gas naturale compresso e LNG gas naturale liquefatto o criogenico.

Il gas naturale è composto principalmente da metano con concentrazioni che variano dal 85 % al 96 % in volume. La combustione di questo carburante produce meno emissioni rispetto ad altri idrocarburi, ad esempio il gasolio e la benzina.

I mezzi a gas naturale coprono l'intera gamma dei veicoli: dai leggeri ai pesanti. Il gas naturale può essere utilizzato per far funzionare motori sia a combustione interna (ICE), come carburante dedicato (mezzi monovalenti), o come bio-carburante miscelato con benzina, diesel, etc. Il metano può anche essere adoperato per far girare piccole turbine a gas per alimentare generatori elettrici montati su auto ibride.

Un volano significativo per la diffusione dei veicoli alimentati a metano è stato il prezzo concorrenziale rispetto agli altri carburanti. Altro aspetto che ha favorito la diffusione dei mezzi a metano è stata anche la diffusa rete di distributori commerciali e la relativa velocità di rifornimento.



*Figura 8: Bombe metano per veicoli leggeri:  
collocazione sotto al pianale e nel vano bagagli (ruota di scorta). Federmetano.*

Per ottenere la densità di energia richiesta per lo stoccaggio nei serbatoi dei veicoli, il CNG viene immagazzinato nel serbatoio come gas pressurizzato, mentre il LNG viene immagazzinato criogenico. Il gas naturale in condizioni standard ha circa la metà della densità dell'aria.

L'energia rilasciata all'accensione (potere calorifico) del metano è superiore a quella del gas naturale, il che comporterebbe una sotto stima del rischio in caso d'incendio di un impianto a gas naturale quando si utilizza il metano come alternativa.

Tabella5: Proprietà chimico fisiche del metano e del gas naturale. Fonte schede di sicurezza Merck KGaA.

Proprietà	Metano	Gas Naturale
Peso Molecolare	16.043 g/mol	19.5 g/mol
Densità del Gas	0.657 g/L, 25°C, 1 Atm	0.7-0.9 g/L, 25°C, 1 Atm
Densità Relativa di Vapore	0.5536	0.5809-0.7468
Densità di Liquido	422.62 g/L, -162°C	470 g/L, -162°C
Punto di Fusione	-182.5°C	-182.0°C
Punto di Ebollizione	-161.50°C	-162.0°C
Temperatura di Auto-Accensione	580°C	723°C
Limiti d'Infiammabilità [% Vol in Aria]	5-15%	4.3-15%

Il metano liquido ha un rapporto di espansione di 621.3 tra la forma liquida e quella gassosa. La densità di energia del gas naturale, sia CNG che LNG, è di circa 43 MJ/Kg, molto simile a quello della benzina che è 45 KJ/Kg. La densità di energia per unità di volume per il CNG è di 9 MJ/L, mentre per il LNG è di 22.2 MJ/Kg a -162 °C; rispetto ai 34.6 MJ/L della benzina.

Nel grafico sottostante sono evidenziati due punti significativi:

- La densità del serbatoio di CNG (250 bar, temperatura atmosferica);
- La densità del serbatoio di LNG (pressione atmosferica, temperatura -162 °C);

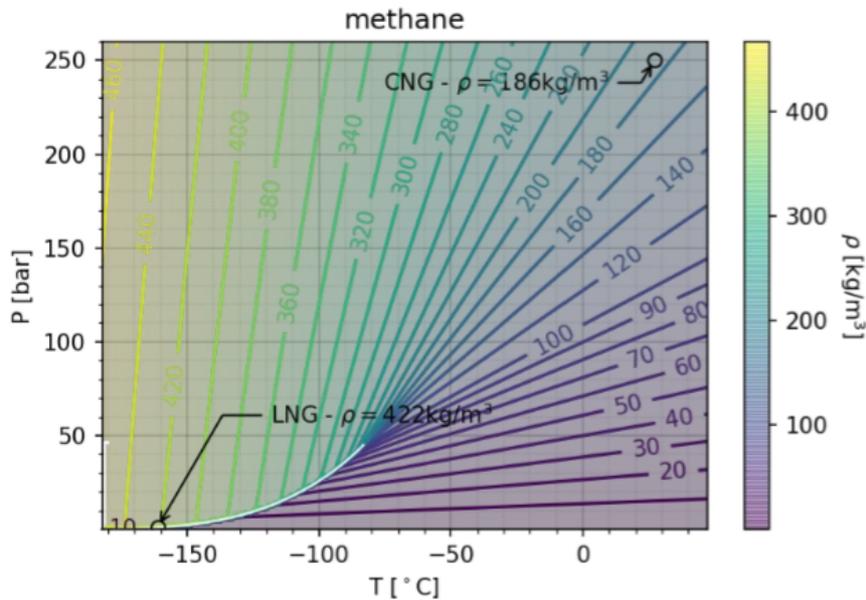


Figura 9: Grafico Pressione, Temperatura, Densità del metano.

Acoustic noise emission of air turbines for wave energy conversion: Assesment and Analysisi.

## 2.3 Veicoli ad Idrogeno

Gli elevati standard di efficienza ed affidabilità che, all'attuale stato dell'arte, forniscono i veicoli elettrici a celle a combustione ad idrogeno (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle), permettono di offrire ai consumatori un'opzione di trasporto alternativa a quella offerta dai tradizionali veicoli a combustione interna (ICE). Le celle a combustione sono più efficienti delle ormai datate tecnologie endotermiche, inoltre i veicoli FCEV si pongono nel mercato come veicoli ad emissione zero, non emettendo inquinanti ma solo vapore acqueo nell'aria. I veicoli ad idrogeno, se confrontati con gli EV puri, offrono anche il vantaggio di un rifornimento rapido e di un'ampia autonomia.

Il mercato offre ormai diverse tipologie di veicoli FCEV ad idrogeno capaci di supportare le diverse esigenze dei consumatori. Sebbene vi sia un crescente interesse per i mezzi FCEV, medi e pesanti, la produzione e commercializzazione di FCEV leggeri ad idrogeno resta limitata a causa degli elevati costi di acquisto. Basti pensare che il costo di una berlina media a quattro porte, ad esempio una VW Golf si aggira sui 35.000 €, mentre per un pari modello ad idrogeno, come la Toyota Mirai, il costo è di circa 70.000 €, quindi quasi doppio.



Figura 10: Esplosione veicolo FCEV, collocazione dell' $H_2$  in due serbatoi nella zona del pianale del veicolo. TOYOTA

Altro svantaggio dei veicoli FCEV è la limitata rete di stazioni di rifornimento sia negli Stati Uniti sia in Europa. Per esempio in Italia, al 2024, è presente una sola stazione di rifornimento nella Provincia Autonoma di Bolzano. Gli Stati Uniti non fanno meglio, ad esclusione della California che ad oggi ospita la rete di stazioni di rifornimento ad idrogeno più capillare, circa un centinaio.

Per quanto riguarda la diffusione dei veicoli ad idrogeno, nel 2023 negli Stati Uniti sono stati venduti 2.968 nuove auto ad idrogeno, che è circa il 10 % in più rispetto al 2022 (2.707). Questo è un piccolo

risultato positivo, anche se l'anno 2023 non è riuscito a superare il record di 3.341 unità vendute nel 2021.

I produttori automobilistici globali del settore hanno fatto una serie di piani di sviluppo per l'espansione commerciale, in particolare nel settore dei trasporti medi e pesanti, al fine di integrare la tecnologia FCEV con altre piattaforme: EV, ibridi plug-in e ICE a biocarburante.

Oltre ai veicoli FCEV leggeri esistono molte altre applicazioni per le celle a combustione ad idrogeno: i carrelli elevatori che operano nei magazzini, gli autobus del trasporto pubblico, i camion per la distribuzione delle merci, etc.

Nel prossimo futuro si prevede che questi utilizzi "alternativi" delle celle ad idrogeno subiranno un'accelerazione a causa del bisogno di decarbonizzare il trasporto su strada di merci e persone che l'opinione pubblica richiede come misura per combattere il cambiamento climatico in atto.

A causa delle diverse opportunità applicative che il mercato in crescita offre, è necessario implementare una solida analisi della sicurezza degli FCEV ad idrogeno per garantirne il massimo grado di sicurezza.

Il combustibile idrogeno, in qualità di vettore energetico, può essere stoccato sia come gas compresso ad alta pressione, sia come liquido criogenico a bassa pressione.

L'idrogeno è il gas più diffuso e più leggero presente in natura (1/14 della densità dell'aria) e a temperatura e pressione standard esiste sotto forma di molecola di idrogeno con due atomi: H<sub>2</sub>.

L'idrogeno liquido criogenico ha un punto d'ebollizione di -252.88 °C e risulta molto più denso dell'idrogeno gassoso.

L'idrogeno gassoso può essere stoccato in serbatoi ad alta pressione per fornire grandi quantità di energia; tuttavia ancora maggiore energia può essere immagazzinata in forma liquida criogenica a bassa pressione. L'idrogeno ha un rapporto di espansione di 1:848, il che significa che l'idrogeno gassoso occupa 848 volte il volume dell'idrogeno liquido.

La tabella sottostante mostra le proprietà fisico-chimiche dell'idrogeno.

Tabella 6: Proprietà chimico fisiche dell'idrogeno. Fonte schede di sicurezza Merck KGaA.

Proprietà	Idrogeno
Formula Chimica	H <sub>2</sub>
Peso molecolare	2.0159
Densità del Gas	0.08988 g/L a 0°C, 1 Atm
Densità Relativa del Vapore	0.07
Densità del Liquido	70.8 g/L a -253 °C
Punto di Fusione	-259.35 °C
Punto di Ebollizione	-252.88 °C
Temperatura di Auto-Accensione	500 °C
Limite d'Infiammabilità	4-75 % [% Vol in Aria]

## 2.4 Veicoli Elettrici

Attualmente sul mercato sono disponibili diverse tipologie di batterie per la trazione di veicoli totalmente elettrici (EV Electric Vehicle) o ibridi (Hybrid-Electric Vehicle), così da offrire ai consumatori un'opzione di trasporto alternativo ai tradizionali motori a combustione interna (ICE). In questi veicoli il motore a combustione e il sistema di trasmissione sono sostituiti da un solo componente: il propulsore elettrico.

I veicoli elettrici ibridi plug – in (PHEV) offrono la combinazione di entrambe le tecnologie: motore elettrico alimentato da batterie e motore a combustione interna che si attiva per ricaricare le batterie quando queste si esauriscono.

Invece, gli EV sono interamente alimentati da elettricità e si ricaricano quando il veicolo è parcheggiato e non in funzione (esiste anche la frenata rigenerativa ma è marginale per il suo apporto energetico). Gli EV offrono numerosi vantaggi come l'alta efficienza, l'assenza di emissioni nocive dagli scarichi (non ci sono) e le superlative prestazioni, soprattutto mediante elevati valori di coppia, il rifornimento è a basso costo, inoltre godono di numerosi incentivi statali atti a favorirne la rapida diffusione per combattere i fenomeni legati al cambiamento climatico.

Gli EV utilizzano un sistema di accumulo elettrochimico in cui l'energia viene convertita da energia elettrica ad energia chimica attraverso un processo reversibile. Questo procedimento avviene mediante un sistema a batterie a celle agli ioni di litio. Le celle sono composte generalmente da un involucro, un anodo e un catodo che sono rispettivamente elettrodi, separatore ed elettrolita. A seconda del tipo di batteria i materiali che la compongono nelle sue parti possono variare, il che si traduce in prestazioni e costi molto variabili.

La tecnologia più diffusa di batterie nei veicoli leggeri, sulla buona strada per diventare la predominante, è quella della batteria secondaria agli ioni di litio o al litio. Questa ampia diffusione è dovuta all'alta densità energetica, all'alta efficienza e alla lunga durata.

A differenza delle celle primarie al litio che sono usa e getta, le celle secondarie agli ioni di litio sono ricaricabili rendendole particolarmente adatte al montaggio negli EV.

Oltre alle batterie secondarie agli ioni di litio, ci sono anche altre tecnologie, come quelle al piombo acido ( $PbO_2$ ), al nichel metallo idruro (NiMH), al nichel cadmio (NiCd) e al cloruro di sodio nichel ( $NaNiCl_2$ ). Tuttavia, ci sono diversi svantaggi, come la minor energia specifica o minore capacità di alimentazione specifica, che rendono tali batterie "alternative" meno desiderabili per la diffusione su ampia scala rispetto a quelle agli ioni di litio.

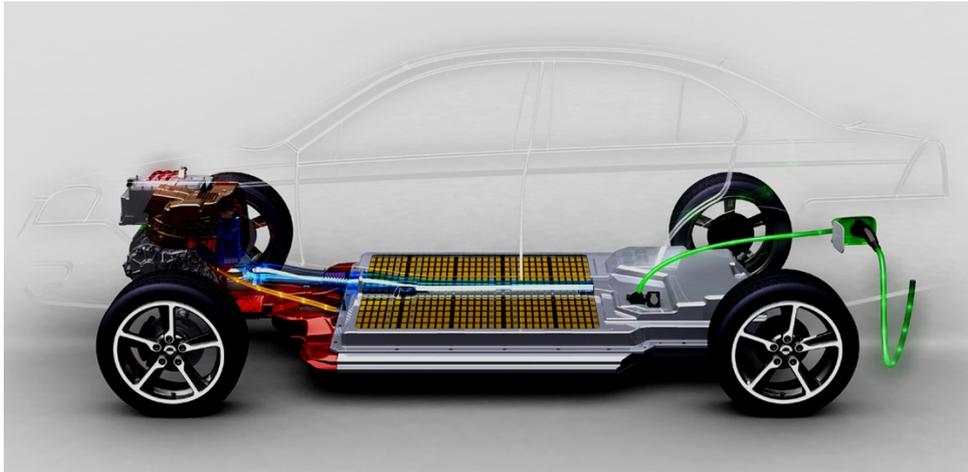


Figura 11: Pacco batteria adagiato al pianale per tenere il baricentro basso visto l'elevato peso delle celle. KIA

Le batterie agli ioni di litio sono considerate la tecnologia più promettente nel panorama delle batterie grazie dell'elevato rapporto tra densità di energia e peso. Questa caratteristica è particolarmente evidente nel grafico sottostante dove l'insieme delle batterie al litio (insieme arancio Li-ion) è posizionato nella zona con valori più elevati sia di densità di volume e sia di densità di energia specifica.

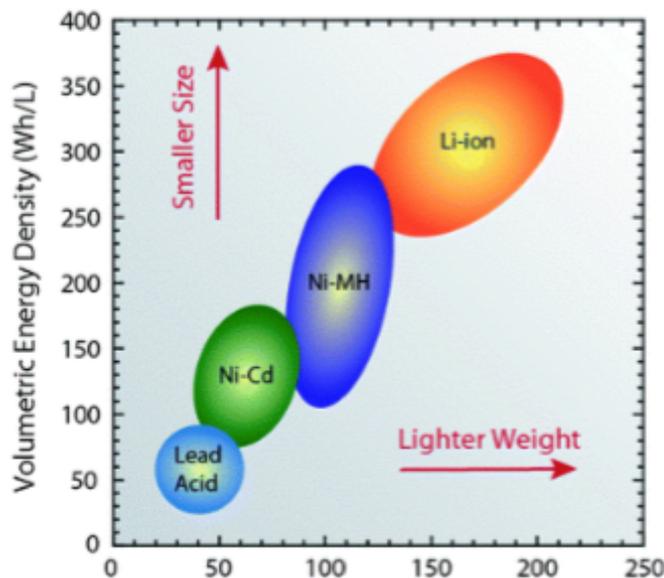


Figura 12: Efficienza delle varie tipologie di batterie ad oggi sul mercato. Veerapandien Ponnuchmy

In natura esistono diverse tipologie di elettrodi ed elettroliti che possono essere utilizzati all'interno delle batterie al litio. Nonostante la varietà, il funzionamento della batteria rimane pressoché identico: durante la ricarica della batteria il litio<sup>+</sup> viaggia dal catodo all'anodo attraverso l'elettrolita quindi si

combina con gli elettrodi di carica che formano un atomo di litio che viene depositato tra gli strati di carbonio. Lo stesso processo viene invertito durante le attività di scarico.

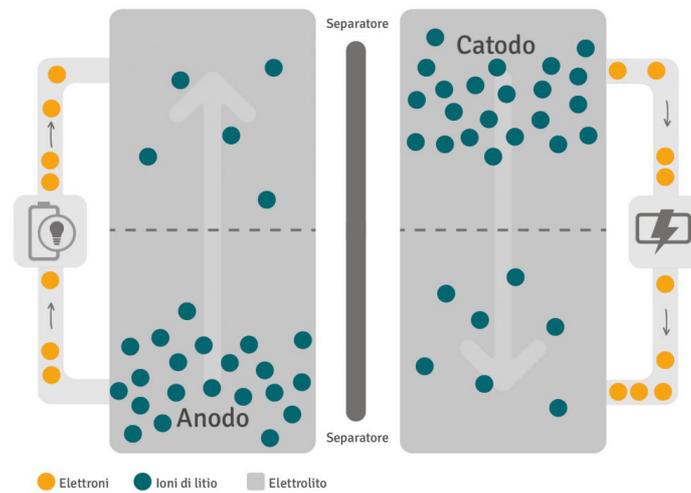


Figura 13:funzionamento batteria al litio. Profi-Guide

Un sistema di batterie agli ioni di litio è suddiviso in vari sotto sistemi e sotto componenti:

1. Celle agli Ioni di Litio (Litio secondario)
  - Varie capacità, sostanze, fattori di forma, produttori, etc;
2. Modulo
  - Ospita le celle in varie configurazioni;
3. Involucro del sistema
  - Alloggia un sistema di batterie completo composto da moduli;
4. Sistema di gestione delle batterie
  - Gestione termica;
  - Determinare i cicli di carico/scarico;
  - Controllare l'integrità del sistema;

Controllare lo stato di carica (SOC, Control State of Charge).

# Capitolo 3 Combustibili convenzionali e non convenzionali

Nel capitolo si descrivono le caratteristiche sei combustibili convenzionali e non convenzionali. Si analizza la casistica di eventi incidentali che hanno coinvolto veicoli con tali combustibili.

## 2.5 Combustibili Convenzionali

Fino a pochi anni fa, gran parte dei veicoli erano mossi da motori a combustione interna (ICE) alimentati da idrocarburi liquidi come benzina, diesel, etanolo e varie miscele.

Durante un incendio causato da un liquido infiammabile a combinarsi tra loro sono principalmente i vapori emessi dal carburante stesso e l'ossigeno presente nell'aria che insieme costituiscono una miscela infiammabile.

Durante una fuoriuscita di carburante all'aperto, la temperatura del liquido deve essere al di sopra del suo punto di infiammabilità affinché ne avvenga l'accensione. A temperature superiori al punto di infiammabilità del liquido ci sarà sempre un intervallo entro cui i vapori del carburante sono dentro i loro limiti d'infiammabilità, quindi il liquido può essere acceso solo se è presente una fonte di accensione esterna.

Quando invece un liquido infiammabile viene stoccato in un recipiente chiuso, viene raggiunto un equilibrio nella miscela aria-carburante liquido che dipende dalla temperatura. Se la temperatura del liquido si trova tra il suo LIE e LSE, la miscela all'interno del serbatoio è combustibile e l'eventuale sua accensione può comportare una piccola esplosione. Ciò significa che anche un incendio che coinvolga l'esterno del serbatoio del carburante può provocarne la sua accensione, sia attraverso una fiamma libera che accende i vapori del carburante, attraverso un'apertura di ventilazione o in un punto che presenta una perdita, sia con il riscaldamento del serbatoio portando il carburante interno alla temperatura di autoaccensione.

### 2.5.1 Benzina

La benzina o gasoline è un carburante altamente volatile ed infiammabile che in condizioni normali ha un punto d'infiammabilità compreso tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Le sue proprietà sono standardizzate per garantire che funzioni correttamente come carburante per motori in tutto il mondo. Questo emerge per esempio nella differenza tra la miscela invernale e quella

estiva, le quali possiedono una pressione di vapore diversa, più elevata nella stagione fredda così da garantire un più facile avviamento dei motori alle basse temperature.

La benzina possiede una bassa conducibilità elettrica, quindi sussiste il rischio di generare elettricità statica durante la movimentazione, ad esempio a seguito della caduta libera o del flusso attraverso lunghe condutture.

A causa dell'elevata pressione di vapore, la concentrazione all'interno di un serbatoio di benzina è molto al di fuori dei limiti di infiammabilità (circa 1-8%). Nella pratica, se la temperatura del carburante è superiori a  $-20^{\circ}\text{C}$ , la miscela all'interno del serbatoio è troppo ricca, e quindi non combustibile. Attualmente la benzina contiene circa il 5-7% di etanolo che tuttavia non influenza in maniera significativa le proprietà di accensione della miscela.

Tabella 7: Proprietà chimiche tratte dalle schede di sicurezza Merck kGaA.

Proprietà	Benzina
Formula Chimica	$\text{C}_4\text{-C}_{12}$
Peso Molecolare	95-120 g/mol
Densità del Gas ( $25^{\circ}\text{C}$ , 1 Atm)	1.46 kg/m <sup>3</sup>
Densità del Liquido	0.742 g/m <sup>3</sup>
Punto di Ebollizione	25-215 $^{\circ}\text{C}$
Punto d'Infiammabilità	$-45^{\circ}\text{C}$
Temperatura di Auto-Accensione	258 $^{\circ}\text{C}$
Velocità della Fiamma ( $\phi=1$ )	0.33 m/s
Temperatura Della Fiamma Adiabatica	2016 $^{\circ}\text{C}$
Limiti d'Infiammabilità [% Vol in Aria]	1.2-7.1 %

Il tasso di rilascio di calore (HRR [kW]) di un incendio a benzina per metro quadro è molto alto ed emette un flusso di calore elevato verso l'ambiente circostante. Per incendi di poche centinaia di metri quadri o più, il flusso di calore relativo diminuisce a causa di una combustione inefficiente e di una maggiore produzione di fuliggine (particolato carbonioso) all'interno della fiamma, che devia anche alcune parti del calore.

### 2.5.1.1 Scenario con coinvolgimento di veicoli a benzina

Nonostante la benzina sia una sostanza altamente infiammabile, per quanto riguarda la normale manipolazione, la normativa vigente garantisce un grado di sicurezza molto elevato che nel tempo ha permesso di ridurre sempre più il tasso di incidenti.

Le pompe di benzina delle stazioni di rifornimento sono dotate di un sistema di recupero dei vapori che rimuove efficacemente i vapori di benzina dal tubo di riempimento, diminuendo il rischio di accensione di eventuali atmosfere esplosive.

Inoltre, i veicoli sono costruiti in modo da ridurre al minimo la possibilità di generare elettricità statica durante il rifornimento. In caso di accensione, la concentrazione di carburante all'interno del serbatoio è talmente elevata che l'incendio non può propagarsi al suo interno causandone l'eventuale esplosione.

Tuttavia, durante la fuoriuscita si formano rapidamente dei vapori che rendono il carburante altamente infiammabile. L'energia richiesta per accendere questi vapori è relativamente modesta e quindi il rischio di accensione risulta elevato. Se la benzina viene accesa, probabilmente inizierà a bruciare alla velocità massima di rilascio del calore entro pochi secondi.

Durante gli urti che possono provocare fuoriuscite di benzina, il rischio d'incendio è dunque molto elevato, in quanto vi sono molte possibili fonti d'innescò: scintille dovute all'attrito, cortocircuiti, superfici calde, etc.

I serbatoi dei veicoli di oggi sono spesso realizzati in plastica e quindi possono fondersi a causa del calore. Secondo le attuali norme UNECE R-034:2014b, un serbatoio dovrebbe essere in grado di resistere ad un'esposizione al fuoco standardizzata per almeno 2 minuti senza perdite; si prevede che dopo questo lasso temporale però il serbatoio si scioglia e faccia fuoriuscire il suo contenuto coinvolgendo rapidamente l'intero veicolo nell'incendio. Non vi è, tuttavia, un grande rischio di esplosione a causa dell'elevata saturazione del carburante nel serbatoio e dell'indebolimento di oggetti di plastica come il serbatoio stesso e le tubazioni flessibili che per mezzo del calore impediscono la formazione di pressioni elevate all'interno del serbatoio.

## 2.5.2 Gasolio

Il gasolio o diesel è un carburante molto meno volatile rispetto alla benzina, che normalmente ha un punto di infiammabilità intorno ai 60°C. Ciò significa che a temperature normali, una fuoriuscita all'esterno di carburante non può essere innescata da una piccola fonte d'innescò.

A causa del suo alto punto d'infiammabilità, la propagazione di un incendio sulla superficie di una piscina diesel è notevolmente più lenta rispetto ad una di benzina, sebbene dal momento in cui un incendio si sviluppa completamente, il gasolio brucia in modo molto simile alla benzina.

Il gasolio produce una formazione di fuliggine più pronunciata e densa e quindi un flusso di calore leggermente inferiore.

Tabella 8: Proprietà chimiche tratte dalle schede di sicurezza Merck kGaA

Proprietà	Gasolio
Formula Chimica	C <sub>8</sub> -C <sub>25</sub>
Peso Molecolare	204 g/mol

Densità del Gas (25 °C, 1 Atm)	1.46 kg/m <sup>3</sup>
Densità del Liquido	0.87-0.95 g/m <sup>3</sup>
Punto di Ebollizione	282-338 °C
Punto d'Infiammabilità	55 °C
Temperatura di Auto-Accensione	316 °C
Velocità della Fiamma ( $\phi=1$ )	0.40 m/s
Temperatura Della Fiamma Adiabatica	2054 °C
Limiti d'Infiammabilità [% Vol in Aria]	0.6-6.6 %

### 2.5.2.1 Scenario con coinvolgimento di veicoli a gasolio

A causa del punto d'infiammabilità notevolmente elevato del gasolio, il rifornimento di carburante, la sua normale movimentazione ed eventuali fuoriuscite comportano un rischio d'incendio notevolmente inferiore rispetto alla benzina.

Tuttavia, una perdita all'interno del vano motore, derivante da una mancata manutenzione o da una collisione, comporta un grande rischio d'incendio poiché sono presenti molte superfici incandescenti che possono prima riscaldare il gasolio e successivamente, a causa della sua temperatura di autoaccensione relativamente bassa, accenderlo. Un incendio di un vano motore può propagarsi, e in determinate circostanze, arrivare fino al serbatoio del carburante esponendolo al fuoco.

I serbatoi di plastica sono altrettanto comuni nelle le auto diesel, al pari di quelle a benzina, così come, in misura minore, nei veicoli più grandi come gli autobus, i quali devono soddisfare i requisiti della normativa UNECE R.034:2014, ovvero essere in grado di resistere all'esposizione al fuoco per 2 minuti. Poiché i serbatoi di grandi veicoli, come autobus e camion, sono molto più grandi di quelli delle auto e quindi contengono una quantità di carburante significativamente maggiore, una eventuale fuoriuscita di carburante diventa molto più importante in caso di incendio creando un incendio più grande, più intenso, considerevole e prolungato.

Per ovviare a questo problema i serbatoi di carburante degli autocarri sono generalmente realizzati in lamiera di alluminio o acciaio, riducendo la probabilità di un rapido deflusso durante l'esposizione al fuoco.

## 2.6 Combustibili non Convenzionali

Al diffondersi dei veicoli a propulsione non convenzionale, le infrastrutture per sostenerli diventano sempre più capillari nella rete, così i problemi legati alla sicurezza diventano un argomento centrale poiché questi combustibili presentano rischi diversi rispetto ai tipici combustibili liquidi (benzina e gasolio) diffusi ormai da circa un secolo con la comparsa delle "prime" carrozze motorizzate".

Tra i combustibili non tradizionali troviamo il gas naturale e il propano che vengono utilizzati per sostituire i combustibili tradizionali già da qualche anno, perché più puliti o più efficienti nei motori a combustione interna. I veicoli a combustione alternativa includono anche quelli alimentati ad elettricità utilizzando batteria agli ioni di litio o celle a combustione ad idrogeno.

## 2.6.1 Combustibili Gassosi

Il gas è un fluido che non ha volume proprio e che è facilmente comprimibile. Il gas è un aeriforme la cui temperatura è superiore alla temperatura critica.

I combustibili gassosi possono essere compressi, compressi-liquefatti oppure assumere la forma di un gas criogenicamente congelato cioè raffreddato così tanto da condensare il gas in un liquido.

Lo stoccaggio e la movimentazione del metano avviene sia sotto forma di gas compresso (CNG) che di gas criogenico (LNG).

L'idrogeno gassoso, invece, viene gestito prevalentemente sotto forma di gas compresso; mentre il gas di petrolio liquefatto (LPG) e il dimetiletere (DME) sono normalmente gestiti sotto forma di gas compresso-liquefatto.

Solitamente i veicoli leggeri che sono movimentati da questi gas ospitano i serbatoi o sul lato inferiore o sul lato posteriore del mezzo. I veicoli pesanti, invece, collocano i serbatoi del gas in prossimità o nella stessa posizione di dove attualmente sono posizionati i serbatoi del gasolio, anche se iniziano ad esserne installati anche sotto il carico o dietro alla cabina. Un discorso a parte meritano gli autobus, i quali ospitano i serbatoi del gas sul tetto del mezzo riducendo così i rischi in caso di incidente.

*Tabella 9: Nome e caratteristiche dei combustibili gassosi.*

<b>Tipo Combustibile</b>	<b>Gas Compresso</b>	<b>Gas Compresso – Liquefatto</b>	<b>Gas Criogenico</b>
<b>LPG</b>		X	
<b>DME</b>		X	
<b>CNG</b>	X		
<b>LNG</b>			X
<b>H<sub>2</sub></b>	X		

I gas compressi, come il CNG e H<sub>2</sub>, sono spesso gestiti ad alta pressione, infatti la pressione nei serbatoi può variare a seconda delle dimensioni tra 200 – 700 bar. Un momento critico per questo tipo di combustibili è la fase del rifornimento, infatti possono verificarsi esplosioni di recipienti in pressione a causa dell'esposizione alle pressioni massime.

Esistono in commercio quattro diverse tipologie di serbatoio per il gas metano e per l'idrogeno:

- Contenitori in metallo;
- Cilindri metallici avvolti da fogli di materiale composito, ad esclusione del fondo e del collo;
- Cilindri metallici interamente avvolti in materiale composito;
- Cilindri in plastica interamente avvolti in materiale composito;

Per i gas compressi-liquefatti, come il GPL e il DME, il gas è condensato quando viene compresso trovandosi nei serbatoi a pressione sia in fase liquida e sia in fase gassosa. La pressione all'interno del serbatoio varia con la temperatura ambientale, spesso è di circa 5 bar a 20 °C, ma la pressione cresce rapidamente all'aumentare della temperatura.

Il gas criogenico, come LNG, si ottiene raffreddando il gas al di sotto del suo punto di ebollizione e conservandolo successivamente in forma condensata in un serbatoio a pressione ed isolato. L'LNG ha un punto di ebollizione di -162 °C. I serbatoi a pressione di gas criogenico devono essere ben isolati, in un modo simile ad un thermos, così che il trasferimento di calore nel recipiente sia minimo. La piccola quantità di calore che viene trasferita nel serbatoio, nonostante l'isolamento termico, provoca l'evaporazione di una frazione ridotta di gas che genera l'aumento di pressione all'interno del recipiente; se questa pressione in eccesso non viene spillata durante il normale utilizzo, una parte del gas deve essere scaricato attraverso una valvola limitatrice di pressione, affinché la pressione all'interno del serbatoio non diventi troppo alta e ne comprometta la sicurezza statica. La pressione di rilascio che la valvola limitatrice di pressione attiva deve essere adatta al tipo di serbatoio e spesso è compresa tra 5 – 15 bar.

## **2.6.2 Gas Naturale: CNG e LNG**

Il metano, CH<sub>4</sub>, è un gas inodore, incolore, altamente infiammabile ed esplosivo e se messo a contatto con forti ossidanti reagisce violentemente. Il metano, inoltre, è un gas leggero, meno denso dell'aria e può quindi facilmente accumularsi sotto alla volta di una galleria o di un garage, tanto più se la ventilazione risulta scarsa.

Il metano viene immagazzinato sia in forma compressa, sotto lo pseudonimo di CNG, sia raffreddandolo in contenitori criogenici, LNG.

La maggior parte degli studi presenti in letteratura si concentra sul gas naturale compresso in forma gassosa noto con la sigla di CNG, vi è quindi la necessità di indagare e comprendere ulteriormente i rischi del gas naturale liquefatto o LNG.

Tabella 10: Proprietà di stoccaggio del gas naturale.

Proprietà	CNG	LNG
Pressione di Esercizio	200 bar	5 – 20 bar
Temperatura	-	-162 °C
Volume	<b>Veicoli Leggeri</b> 25 – 250 L (1 solo serbatoio) <b>Veicoli Pesanti</b> 50 – 400 L (Diviso in più serbatoi)	<b>Veicoli Leggeri</b> 100 L (1 solo serbatoio) <b>Veicoli Pesanti</b> 700 – 900 L (Diviso in 2 serbatoi)
Pressione di Progetto	Pressione di Esercizio X 2	Pressione di Esercizio X 2
Valvola di Sovrapressione	Pressione di Esercizio X 1,5 e 110 °C +/- 10 °C	Pressione di Esercizio X 1,5

### 2.6.2.1 Proprietà di infiammabilità/esplosività Gas Naturale-Metano

I principali rischi associati al gas naturale sono gli stessi della maggior parte degli altri combustibili, vale a dire l'infiammabilità e la combustione incontrollata. Esistono ulteriori rischi associati al LNG a causa della bassa temperatura di stoccaggio e del potenziale di rapida espansione in caso di rilascio. Il gas naturale è inodore e per ragioni di sicurezza viene quindi odorato prima della distribuzione, infatti risulta rilevabile nell'aria con concentrazioni fino allo 0.3 %. Il limite inferiore d'infiammabilità (LFL) è del 5.3 % in aria. Pertanto una perdita è rilevabile dall'odore a concentrazioni di circa 15 volte inferiori rispetto alla concentrazione richiesta per la combustione.

Tabella 11: Proprietà Infiammabilità metano. Fonte schede di sicurezza Merck KGaA.

Proprietà	Metano
[Vol %] Concentrazione infiammabilità in Aria	LFL 5.0 %
	UFL 15.0 %
Miscela più facilmente infiammabile in Aria [Vol %]	8.5 %
Temperatura della Fiamma Adiabatica	1963 °C (2236 K)
Galleggiabilità (Rapporto con l'Aria)	0.54
MIE	0.28-0.30 mJ
Temperatura di Auto-Accensione	580 °C (728 K)

Una caratteristica significativa del metano, nelle analisi di sicurezza, è la sua minore densità rispetto all'aria in condizioni standard. Questo sperimentalmente significa che durante un evento che produce una perdita o una rottura in un serbatoio di gas naturale, la massa infiammabile nella maggior parte dei casi tende a risalire verso l'alto, lontana dal suolo a causa della galleggiabilità. Questo rappresenta una potenziale riduzione del rischio di venire a contatto con inneschi vicini al suolo. A questo punto la massa potenzialmente infiammabile deve essere diluita e dissipata attraverso un'adeguata

ventilazione, altrimenti il pericolo potrebbe persistere per parecchio tempo sotto la volta della galleria.

Nel caso di un rilascio di LNG, la nuvola di vapore ha la possibilità per essere più estesa a causa della grande quantità, tipicamente maggiore rispetto a quella di un serbatoio di pari volume di CNG, di carburante che è conservato in maniera criogenica nel serbatoio. Nel caso di un rilascio dal fondo del serbatoio di GNL, il liquido raffredda la superficie sottostante, il che potrebbe consentire la formazione di una pozza di GNL con tempi di evaporazione più estesi. Inoltre, la densità del GNL vaporizzato è maggiore, riducendo così la dispersione per galleggiamento. Inizialmente il vapore è molto più pesante dell'aria, ma quando la temperatura del gas si riscalda e la densità diminuisce, diventerà più leggero dell'aria. Entrambi questi fattori aumentano la probabilità d'innesco attraverso una sorgente presente al suolo.

Il GNL, essendo un combustibile liquido pressurizzato, comporta il rischio di causare esplosioni di vapore in espansione di liquido bollente, Bleve. Il Bleve si verifica quando avviene un rapido riscaldamento del liquido, nonostante il super raffreddamento (-162 °C), provocando un cambio di fase. A mano a mano che il GNL vaporizza, il suo volume aumenta di oltre 600 volte, se la velocità di rilascio del gas è inferiore alla velocità di espansione, il suo serbatoio può sovra pressurizzare e rompersi. Questo scenario potrebbe verificarsi nel caso delle condizioni estreme portate da un incendio che lambisca e deteriori il rivestimento isolante del serbatoio di GNL. Affinché si verifichi il Bleve, il gas liquido deve raggiungere il limite di temperatura di surriscaldamento, che nel caso del GNL corrisponde a circa -93 °C.

#### 2.6.2.2 Scenario con coinvolgimento di veicoli a CNG

Possono verificarsi diversi scenari incidentali che coinvolgono veicoli alimentati a metano:

- Nel caso un veicolo sia in fiamme, con il propagarsi dell'incendio può inglobare i serbatoi.
- Nel caso di una collisione, un secondo veicolo può rilasciare del carburante che innescandosi, può scorrere sotto al serbatoio del veicolo alimentato a metano.
- Nel caso di una perdita che si verifichi in un tubo adiacente al serbatoio del veicolo a metano, una volta innescato, può verificarsi un getto di fuoco diretto verso una parte del serbatoio.

In tutti questi scenari, il serbatoio del metano viene sottoposto ad un rapido riscaldamento, provocando un immediato aumento della pressione interna del contenitore stesso. A questo punto dovrebbe intervenire la valvola limitatrice di pressione del serbatoio che in risposta all'aumento della temperatura e della pressione dovrebbe attivarsi; questa fuoriuscita improvvisa ed estremamente rapida di gas, a causa dell'incendio circostante, si accende e provoca un forte getto di fuoco.

A tal proposito, il regolamento UNECE R. 110 sostiene che la valvola limitatrice di pressione del serbatoio debba essere orientata in modo da impedire un'ulteriore esposizione del contenitore al fuoco; tuttavia in molti casi accade che i serbatoi, o altre parti del veicolo, siano comunque sottoposti al fuoco, diretto e/o indiretto.

Poiché la quantità di gas stivata in un serbatoio di un veicolo CNG risulta molto limitata in forma compressa, l'eventuale rilascio si sicurezza svuota in modo relativamente rapido il contenitore, portando ad una rapida diminuzione della pressione.

Se l'effetto dell'incendio sul serbatoio risulta significativo, la struttura del contenitore si riscalda, diventa plastica, e perde così gran parte della sua resistenza e rigidità.

Inoltre, se la valvola limitatrice di pressione non è in grado di sfiatare la sovrappressione causata dall'aumento di temperatura con relativa rapidità, c'è il concreto rischio che il serbatoio possa esplodere. Ciò può causare danni mortali non solo nelle immediate vicinanze del veicolo, ma anche a distanze maggiori a causa del lancio di frammenti e della sovrappressione che un ambiente confinato come una galleria amplifica. Un'esplosione può verificarsi durante un incendio completamente sviluppato, generalmente entro 10-25 minuti dall'inizio dell'incendio.

L'energia rilasciata da un serbatoio di CNG da 130 litri alla pressione di 200 bar che esplose (8.7 MJ) è equivalente a 1.85 kg di TNT in detonazione. Una tale esplosione romperebbe finestre nel raggio di 30 metri a causa della pressione che supererebbe i 50 mbar e risulterebbe letale entro il raggio di 12 m dove la pressione supererebbe i 140 mbar. (Perette e Wiedemann 2007).

Occorre ricordare anche la possibile letalità dei frammenti rilasciati da un'eventuale esplosione, a tal proposito risulta significativo un incidente accaduto ad Indianapolis (USA) nel gennaio 2015 quando l'esplosione di un serbatoio di metano CNG di un veicolo leggero ha causato la proiezione di detriti e schegge fino a 1.2 Km di distanza.

Nel 2013, U.S. Department of Transportation ha condotto uno studio sui tassi d'incidentalità dei veicoli CNG. Gli eventi totali analizzati tra il 1976 e il 2010 sono stati 135 e riguardavano incidenti legati al metano, prevalentemente accaduti negli Stati Uniti. A tal proposito si riporta la seguente tabella riassuntiva:

*Tabella 12: Sommario degli incidenti di veicoli a CNG nel periodo 1976-2010.*

<b>Incidente</b>	<b>Numero</b>	<b>Percentuale %</b>
Rottura del serbatoio	50	37
La valvola limitatrice di pressione ha fallito	14	10
Incendio del veicolo senza rottura del serbatoio	17	13
Incidente tra più veicoli	12	9
Incidente di un singolo veicolo	6	4

Perdita dal serbatoio cilindrico	14	10
Altro	7	5
Cause sconosciute	15	11
<b>Totale</b>	135	100%

Le statistiche indicano che lo scenario più diffuso nel caso d'incidenti di veicoli a metano è la rottura del serbatoio, che possono essere interpretate come 50 casi di esplosioni di serbatoi a pressione tra il 1976 – 2010. La così ampia diffusione di questo tipo d'incidente è dovuta al fatto che molti altri incidenti, più comuni e meno drammatici spesso non sono segnalati e quindi non rientrano nelle statistiche. La maggior parte delle esplosioni di serbatoio si è verificata durante il rifornimento o in seguito all'esposizione al fuoco.

In 14 casi, le rotture del serbatoio sono state causate da bombole danneggiate; tali scenari avrebbero potuto evitarsi attraverso un'ispezione periodica dei contenitori (revisione e sostituzione al termine della vita utile).

In 14 casi, invece, la valvola limitatrice di pressione non si è attivata durante l'esposizione al fuoco. In più della metà di questi casi il gas si è innescato a causa di non conformità nell'installazione dell'impianto per esempio con tubi di alimentazione del motore che passavano per il vano motore.

### 2.6.2.3 Scenario con coinvolgimento di veicoli a LNG

I serbatoi di gas metano liquefatto (LNG) hanno una capacità maggiorata a causa della condensazione del gas che permette quindi un aumento notevole dell'autonomia dei veicoli LNG.

La struttura di un serbatoio LNG è simile a quella di un grande thermos isolato con perlite, per ridurre al minimo la dispersione termica nel contenitore. Ciò significa che la struttura dei serbatoi a gas LNG riduce anche il possibile riscaldamento del gas durante l'esposizione al fuoco e fornisce anche una protezione aggiuntiva contro i danni meccanici in caso d'incidente.

I serbatoi criogenici destinati all'installazione nei veicoli devono soddisfare i requisiti del regolamento UNECE R.110, che include una prova al fuoco.

Se un serbatoio è danneggiato in modo tale che si verifichi una perdita, ma senza incendio, si possono verificare due scenari:

- Se il contenitore si rompe sopra la superficie liquida del gas condensato, i vapori del gas fuoriusciranno formando una nuvola di vapore. Questa perdita diminuirà d'intensità al diminuire della pressione del contenitore, poiché la vaporizzazione richiede il trasferimento di calore nel serbatoio.

- Se il contenitore è danneggiato in modo tale che la frattura si verifichi sotto la superficie del liquido, il liquido freddo uscirà sotto pressione e inizialmente vaporizzerà istantaneamente quando verrà a contatto con il suolo o altre superfici più calde (LNG nel serbatoio è a -162 °C), ma successivamente, nel caso di maggiori quantità, il gas raffredderà le superfici con cui verrà a contatto abbastanza rapidamente creando così una pozza di liquido che solo successivamente vaporizzerà indugiando nel sito dell'incidente più a lungo.

Una perdita di gas criogenico può, a causa della sua molto bassa temperatura, provocare ustioni da gelo e danni a persone e/o cose.

Durante l'esposizione al fuoco, un gas criogenico all'interno di un serbatoio viene riscaldato aumentando la velocità di vaporizzazione e quindi la pressione interna al serbatoio; questo a sua volta porta all'attivazione della valvola limitatrice di pressione.

Se l'isolamento del serbatoio è progettato per funzionare esclusivamente come un "thermos", quando questo viene danneggiato, il suo effetto isolante è drasticamente ridotto, sebbene la sua struttura protegga in qualche modo il liquido dal fuoco.

Se l'isolamento del serbatoio è costituito da un "thermos" in combinazione con altri materiali isolanti, l'isolamento del contenitore è più efficace e il trasferimento di calore nel serbatoio è sensibilmente diminuito, aumentando così la probabilità che la valvola limitatrice di pressione sia in grado di gestire la pressione interna ad un livello sicuro fino allo spegnimento dell'incendio o all'esaurimento del gas. In circostanze particolarmente sfavorevoli in cui l'isolante risulta danneggiato, l'esposizione termica alla temperatura ambiente può fare in modo che la valvola limitatrice di pressione non abbia il tempo di rispondere all'aumento della pressione, determinando un rischio di aumento della pressione ancora maggiore.

Quando la resistenza del serbatoio decresce e contemporaneamente si verifica un'esplosione del contenitore, che si traduce in un BLEVE in cui il gas condensato ora riscaldato viene vaporizzato istantaneamente, il serbatoio si rompe e la pressione tra interno ed esterno del serbatoio si uguaglia. Ciò si traduce in una grande nube di vapore/aerosol ardente che si alza ed espone l'area circostante ad un flusso di calore molto elevato per diversi secondi.

Nel caso di fuoriuscite di carburante esiste una netta differenza a seconda dello stato fisico in cui sono queste perdite: nel caso di carburante liquido che produce nuvole di vapore è consigliato lavare le perdite con uno spruzzo d'acqua, mentre nel caso di emissioni di gas condensato non può essere usato lo stesso approccio poiché il calore fornito dall'acqua causerebbe un aumento della velocità di evaporazione. In tale scenario è necessario impedire all'acqua di entrare in contatto con la piscina di

gas liquefatto e se possibile coprire la fuoriuscita con un telo o con una schiuma d'aria compressa molto secca (CAF Compressed Air Foam) così da diminuire il tasso di vaporizzazione.

Le emissioni di metano condensato si diffondono rapidamente lungo il suolo a causa della maggiore densità del gas condensato, riempiendo rapidamente le depressioni topografiche e dopo poco tempo, iniziano a mescolarsi con l'aria e quindi a disperdersi ulteriormente. Tale nuvola di vapore che è andata a formarsi è chiaramente visibile, poiché il gas freddo fa condensare l'umidità nell'aria e forma una nebbia.

Indipendentemente dal fatto che il gas emesso sia condensato o compresso, si forma rapidamente una miscela combustibile di gas-aria. La nuvola di vapore può essere incendiata e bruciata quando il fronte della fiamma si diffonde attraverso di essa e se si trova in uno spazio confinato quando viene innescata, può verificarsi un'esplosione della nuvola di vapore.

I contenitori di gas che sono esposti direttamente al calore e privi di una valvola limitatrice di pressione funzionante possono produrre un Bleve o un'esplosione del serbatoio in pressione.

### **2.6.3 Propano: LPG/GPL**

Il GPL, o gas di petrolio liquefatto, è costituito da una miscela di idrocarburi alcalini a basso peso molare composta principalmente da propano e butani e piccole quantità di etano, etilene, butilene, etc. Il GPL è un gas inodore e viene pertanto odorizzato con etanolo, che gli conferisce un odore forte ed acre così da facilitare l'individuazione di eventuali perdite.

Il GPL è compresso a pressioni relativamente basse, tra i 2 e gli 8 bar. Aumentando la densità della miscela gassosa di circa 250 volte si riduce il volume a parità di massa.

Il dimetiletere, DME ( $C_2H_6O$ ), è l'etere meno complesso e secondo la normativa vigente, non è considerato pericoloso per la salute e per l'ambiente. Il DME è un gas utilizzato nella forma compresso-liquefatto allo stesso modo del GPL con una pressione di esercizio di circa 5 bar a 20 °C. Il DME non reagisce a contatto con l'aria e non si auto-ossida in perossidi potenzialmente esplosivi, a differenza di altri eteri alchilici.

I rischi associati al DME sono simili a quelli del GPL e il suo utilizzo è regolato dal regolamento UNECE R.067-2014.

Il DME è un gas altamente infiammabile con una densità maggiore dell'aria. I suoi limiti d'infiammabilità sono compresi tra 3,4 – 27 % in volume, i quali risultano più ampi di quelli del GPL (circa 2 – 10 % in volume); questo significa che in aria il DME crea un'area più estesa contenente una miscela combustibile rispetto al GPL.

A causa dell'elevata densità del DME, simile a quella del GPL, in caso di perdite e rilasci tali gas tendono a scorrere lungo il terreno e si accumulano nelle depressioni topografiche causando possibili rischi di soffocamento.

Tabella 13: Proprietà di stoccaggio del GPL.

Proprietà	GPL (miscela di PROPANO e BUTANO)
Temperatura di Esercizio	15 °C
Pressione di Esercizio	7 bar
Volume	Simile a quello dei serbatoi dei veicoli a carburante convenzionale
Pressione di progetto	30 bar
Valvola d sovrappressione	32 +/- 1 bar (Con fusibile a fusione 120 +/- 10 °C)

### 2.6.3.1 Proprietà di infiammabilità/esplosività LPG/GPL

Esistono due considerazioni fondamentali da analizzare sulla sicurezza dei veicoli a GPL:

- La sovrappressione eventuale del serbatoio causata dal riempimento eccessivo o da repentini cambiamenti ambientali. Per prevenire questo problema i veicoli a GPL sono dotati di dispositivi di protezione del troppo pieno (ad esempio valvole di spurgo, etc) e dispositivi di rilascio della pressione per sfiatare il serbatoio se la pressione interna dovesse salire oltre i limiti di sicurezza.
- L'eventuale innesco del carburante rilasciato attraverso il dispositivo di sicurezza del troppo pieno/dispositivo di rilascio della pressione o rilasciato a seguito di un incidente.

Il gas propano è più pesante dell'aria a temperatura e pressione standard a differenza del gas naturale o dell'idrogeno. Pertanto i vapori possono accumularsi in aree basse come le caditoie o i locali di servizio sotto al piano stradale. A differenza dell'idrogeno e del gas naturale, i vapori di propano si dissipano prevalentemente in base al movimento dell'aria, piuttosto che attraverso la galleggiabilità, inoltre, si dissiperanno più velocemente in condizioni di vento piuttosto che in regime di quiete. Di seguito la tabella mostra le proprietà d'infiammabilità rilevanti del propano.

Tabella 14: Proprietà Infiammabilità propano. Fonte schede di sicurezza Merck KGaA.

Proprietà	Propano	
[Vol %] Concentrazione infiammabilità in Aria	LFL	2.1 %
	UFL	9.5 %
Miscela più facilmente infiammabile in Aria [Vol %]		4 %
Temperatura della Fiamma Adiabatica		1977 °C (2250 K)

Galleggiabilità (Rapporto con l'Aria)	1.52
MIE	0.25-0.26 mJ
Temperatura di Auto-Accensione	455 °C (728 K)

### 2.6.3.2 Scenario con coinvolgimento di veicoli a GPL e a DME

Durante uno scenario che causi perdita o incendio, il DME si comporta in maniera simile al GPL e in una certa misura al LNG. Se un serbatoio è danneggiato a causa di un incidente in modo tale che si verifichi una perdita senza incendio, possono verificarsi due possibili situazioni:

- Se il contenitore si rompe sopra la superficie liquida del gas condensato, i vapori del gas fuoriusciranno formando una nuvola di vapore. Tuttavia questa perdita diminuirà d'intensità al diminuire della pressione nel serbatoio, poiché la vaporizzazione richiede il trasferimento di calore nel contenitore.
- Se il contenitore è danneggiato in modo tale che la frattura si verifichi al di sotto della superficie del liquido, il liquido freddo uscirà sotto pressione e, inizialmente, vaporizzerà istantaneamente quando viene a contatto con il terreno o con altre superfici calde, ma poi il terreno si raffredderà gradualmente verso il punto di abolizione del gas (- 25 °C). una grande perdita può produrre una pozza di liquido che vaporizza più lentamente, formando una nuvola di vapore che permane più a lungo.

Uno studio basato su osservazioni sperimentali di Van Den Schoor del 2013 ha osservato l'effetto di diverse emissioni di GPL. Una piccola emissione di GPL (0,21 Kg/s) ha prodotto una nuvola di vapore trascurabile con una miscela stechiometrica GPL-Aria; un serbatoio di 70 litri di GPL può produrre potenzialmente una nuvola di vapore di 100 m<sup>3</sup> in un ambiente confinato, come un garage, se l'emissione è diretta verso il soffitto ed ha una velocità di 0,55 Kg/s; le conseguenze dell'innesco di una tale nuvola di vapore sarebbero probabilmente gravi.

Una nuvola di vapore più grande, 200 m<sup>3</sup>, richiederebbe un tasso di emissione più elevato, che potrebbe verificarsi se il GPL venisse emesso in forma liquida. In un garage di dimensioni medie (30 x 30 x 2,4 m<sup>3</sup>), l'innesco del GPL potrebbe, nel peggiore dei casi, portare ad una pressione in eccesso di 30 kPa in tutto l'ambiente confinato. Una nuvola di vapore di 50 m<sup>3</sup> comporterebbe un piccolo aumento della pressione (5 kPa). Lo studio è arrivato a definire che sarebbe necessaria un'elevata velocità di ventilazione (0,06 m<sup>3</sup>/s, con circa 100 ricambi d'aria all'ora o un flusso d'aria medio di 0,8 m/s in un garage) per diluire una nuvola di vapore di GPL stechiometrica di 200 m<sup>3</sup> al di sotto del suo LEL (Limite di Esplosione) entro 60 secondi.

Durante l'esposizione al fuoco, il gas condensato di GPL all'interno del serbatoio viene riscaldato, aumentando la velocità di vaporizzazione e quindi la pressione all'interno del contenitore; questo causa l'apertura della valvola limitatrice di pressione.

Secondo il "Test del Falò", previsto dal regolamento UNECE R.067, il serbatoio di carburante esposto ad una fonte di fuoco deve attivare la valvola limitatrice di pressione in modo da garantire che il rilascio di pressione avvenga ad una velocità tale che si eviti l'esplosione. Il metodo di prova, tuttavia, è descritto in modo piuttosto vago nel regolamento, quindi l'esposizione al fuoco può variare notevolmente a seconda di come vengono eseguiti i test.

Se un serbatoio di carburante subisce un'esposizione termica maggiore di quella utilizzata durante il suo test (eseguito per essere omologato secondo il regolamento UNECE), non vi è alcuna garanzia che la valvola limitatrice di pressione sia in grado di gestire l'aumento di pressione, portando ad una ulteriore crescita della pressione interna al serbatoio.

Uno studio realizzato da Van Den Schoor nel 2013 stabilisce la probabilità che una data valvola limitatrice di pressione non attivi il rilascio d'emergenza:  $6,2 \times 10^{-8}$ .

Quando la resistenza del contenitore del gas diminuisce a causa dell'aumento della pressione e dell'esposizione al calore, contemporaneamente può verificarsi un'esplosione del serbatoio che si traduce in un BLEVE, in cui il gas condensato ora riscaldato viene vaporizzato istantaneamente quando il serbatoio si rompe. Ciò si traduce in una grande nube di vapore/aerosol ardente che si alza ed espone l'area circostante a un flusso di calore molto elevato per un periodo di diversi secondi. Questi eventi possono verificarsi in modo relativamente rapido, addirittura in alcuni casi si è verificato un Bleve dopo meno di 5 minuti di esposizione al fuoco.

Sebbene i serbatoi per GPL siano dotati di valvole limitatrici di pressione progettate per resistere all'esposizione al fuoco, possono sorgere problemi se il veicolo viene ribaltato durante l'incidente e il gas, in forma liquida, fuoriesce dalla valvola di sicurezza. Ciò può provocare un incendio a getto (jet-ire) molto violento e una riduzione simultanea e significativa della velocità di rilascio della pressione. A sua volta ciò può provocare un rapido aumento della pressione, aumentando la probabilità che si verifichi un Bleve.

## **2.6.4 Idrogeno: H<sub>2</sub>**

L'idrogeno gassoso è un gas inodore, incolore e non tossico. Per renderlo più facilmente rilevabile vengono aggiunte varie sostanze odorose, tuttavia il gas usato per alimentare le celle ad idrogeno non è trattato con questi odorizzanti poiché la purezza richiesta in queste applicazioni è assai elevata. L'idrogeno gassoso è costituito da due atomi di idrogeno, H<sub>2</sub>, ed è l'elemento noto meno denso, per

questo tende naturalmente in caso di rilascio o perdita ad accumularsi nella sommità del tunnel o nel soffitto della stanza (es. box chiuso).

La densità energetica dell'idrogeno è molto elevata per unità di massa, ma bassa per unità di volume, rendendo il gas difficile da immagazzinare e trasportare.

Il gas idrogeno può essere utilizzato come carburante in due modalità:

- HICEV (Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles): l'idrogeno alimenta un normale motore a combustione interna in un veicolo.
- FCEV (Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles): l'idrogeno alimenta una cella a combustione di un veicolo che a sua volta produce elettricità, che a sua volta attiva dei motori elettrici.

Sono state stabilite normative a livello europeo per l'omologazione dei veicoli per quanto riguarda l'uso dell'idrogeno come carburante e dei componenti e dei sistemi a gas idrogeno, nonché per l'installazione di questi componenti e sistemi. Questi regolamenti sono stati pubblicati nella Direttiva Europea 2007/46/CE.

Nonostante esistono regolamenti che normino l'uso dell'idrogeno come carburante per veicoli, questa tecnologia non ha ancora preso piede come valida alternativa nel trasporto urbano a causa degli elevati costi e del limitato numero di stazioni di rifornimento. Ad esempio in Italia ne esiste solamente due attive: una a Bolzano ed una a Mestre. Se ne aggiungeranno altre 36 entro il 2026, finanziate in parte dai 230 milioni di euro del Pnrr, messi sul piatto per sperimentare l'idrogeno nel trasporto su strada, in linea con la direttiva europea 2014/94 su uso e promozione dei combustibili alternativi.

Questa scarsa diffusione ne limita anche gli eventi incidentali e di conseguenza l'interesse a portare avanti degli studi approfonditi.

Quando l'idrogeno viene utilizzato come carburante per veicoli, tale gas viene compresso ed immagazzinato ad una pressione compresa tra i 300 – 700 bar. Le sue molecole sono molto piccole e il suo coefficiente di diffusione alto, consentendo quindi all'idrogeno di penetrare nei materiali porosi. Pertanto, l'acciaio al carbonio, che viene usualmente utilizzato per produrre le bombole che devono contenere l'idrogeno a causa della sua porosità, permette al gas di diffondersi al suo interno e di infragilire il materiale, tale fenomeno è noto come "infragilimento da idrogeno"; di conseguenza per aggirare il problema viene utilizzato acciaio inossidabile.

Il posizionamento dei serbatoi di idrogeno nei veicoli è simile a quello usato per i serbatoi a metano. Una differenza significativa tra i veicoli ad idrogeno e quelli a metano è data dalla collocazione dei regolatori di pressione, i quali nel caso dell'idrogeno sono collocati più vicini al serbatoio rispetto a quelli del metano, inoltre la pressione del sistema per l'idrogeno è di circa 1 bar.

I regolamenti UNECE R.134-2014 contengono i requisiti per i veicoli ad idrogeno ed i loro componenti.

Tabella 15: Proprietà di stoccaggio dell'idrogeno compresso.

Proprietà	Idrogeno
Pressione di Esercizio	350 – 700 bar
Volume	5.6 Kg/bombola Veicoli Pesanti: 8 cilindri
Valvola di Sovra Pressione	Deve essere installata, ma ad ora non esiste normazione in materia e quindi le scelte progettuali spettano ai produttori.

#### 2.6.4.1 Proprietà di infiammabilità/esplosività Idrogeno

Storicamente il principale rischio associato all'idrogeno, per tutelare la sicurezza delle cose e delle persone, è la sua alta infiammabilità. Le proprietà dell'idrogeno richiedono che il sistema di erogazione del carburante sia progettato per mitigare tutti i rischi pertinenti alla sicurezza.

Tabella 15: Proprietà Infiammabilità idrogeno. Fonte schede di sicurezza Merck KGaA

Proprietà	Idrogeno
[Vol %] Concentrazione infiammabilità in Aria	LFL UFL
	4.0 % 75.0 %
Miscela più facilmente infiammabile in Aria [Vol %]	29 %
Temperatura della Fiamma Adiabatica	2210 °C (2483 K)
Galleggiabilità (Rapporto con l'Aria)	0.07
MIE	0.011-0.017 mJ
Temperatura di Auto-Accensione	500 °C (773 K)

Sebbene il limite inferiore d'infiammabilità dell'idrogeno sia simile a quello degli altri combustibili, invece, il limite superiore è molto più elevato. A peggiorare le cose c'è anche la possibilità di avere un innesco facilitato grazie all'energia minima di accensione che l'idrogeno possiede rispetto agli altri combustibili, convenzionali e non. Ciò introduce il rischio d'innesco anche da scariche elettrostatiche deboli.

La figura sottostante mostra il MIE (Minimum Ignition Energy) di diversi combustibili (metano, gasolio e idrogeno) in funzione della concentrazione nell'aria in volume. Il grafico mostra come nell'intervallo tra 10 % - 60 % di concentrazione volumetrica, l'idrogeno ha un'energia di accensione inferiore rispetto al metano e alla benzina su un intervallo di concentrazione molto più ampio. Ciò nonostante, per la valutazione dei rischi la MIE delle miscele magre è più rilevante e l'idrogeno non differisce dagli altri combustibili.

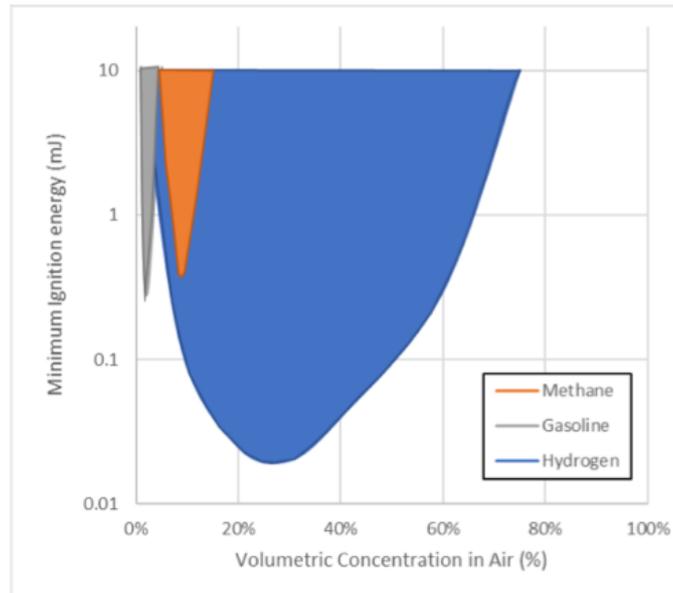


Figura 14: Confronto tra i limiti di infiammabilità, *Handbook for Hydrogen-fuelled vessels*

Queste caratteristiche, che rendono l'idrogeno altamente infiammabile e facilmente innescabile, hanno portato a robusti requisiti di sicurezza dei sistemi di alimentazione e propulsione per ridurre la probabilità di rilasci di gas idrogeno a seguito di un incidente.

Per mitigare i rischi di accensione dell'idrogeno, i sensori di rilevamento sono collocati in luoghi chiusi e dove il gas può intrappolarsi e accumularsi in concentrazioni potenzialmente infiammabili. Questi sensori possono essere programmati per avvisare quando l'idrogeno raggiunge una certa frazione dell'LFL. Poiché l'idrogeno è più leggero dell'aria, i sensori devono essere collocati sopra i potenziali punti di rilascio ma sotto l'altezza del soffitto per evitare temperature troppo elevate. Nei luoghi all'aperto, i rilasci d'idrogeno salgono lontano dalle fonti d'innescio per effetto della galleggiabilità del gas nell'aria. Ciò significa che se le perdite d'idrogeno possono dissiparsi rapidamente, si evitano le concentrazioni esplosive.

La maggior parte dei sistemi di alimentazione ad idrogeno sarà ad una pressione che si tradurrà in getti d'idrogeno azionati dalla quantità di moto.

#### 2.6.4.2 Scenario con coinvolgimento di veicoli ad Idrogeno

L'idrogeno gassoso brucia con una fiamma molto calda (circa 2000 °C), quasi invisibile che non produce particolato.

Tra i rischi relativi all'uso dell'idrogeno gassoso spiccano: l'alta pressione alla quale viene immagazzinato, la sua capacità di fragilizzare vari materiali, la sua bassa temperatura durante il deflusso e la relativa alta possibilità di fuoriuscire dagli accoppiamenti a causa delle piccole dimensioni delle sue molecole. Inoltre, per l'accensione è richiesta una piccola quantità di energia

(molto bassa) grazie ai limiti d'infiammabilità molto ampi (4 – 75 % di Vol). Per ragioni ancora non molto chiare l'autoaccensione si verifica spesso durante l'emissione di idrogeno gassoso.

Secondo l'FM Global, l'idrogeno gassoso non dovrebbe essere conservato al chiuso; le emissioni interne provocano quasi sempre l'accensione e questo in tre casi su quattro si traduce in un'esplosione, mentre in un caso su quattro in un incendio.

I serbatoi di carburante utilizzati per immagazzinare l'idrogeno sono dello stesso tipo di quelli utilizzati per il metano e di conseguenza soggetti agli stessi possibili meccanismi di guasto dei serbatoi di CNG.

Data la limitata diffusione di serbatoi ad idrogeno nella realtà, al fine di determinare gli scenari possibili in caso di mancato azionamento di una valvola limitatrice di pressione, sono stati condotti negli USA dei test da Zalosh nel 2008 utilizzando un bruciatore a propano posto sotto due serbatoi d'idrogeno gassoso di circa 20 litri e 350 bar di capienza che non erano dotati di valvole di sfiato. I due contenitori sono esplosi dopo circa 6 e 12 minuti, a causa delle differenze costruttive che presentavano internamente. A seguito delle esplosioni si sono trovati pezzi dei serbatoi a circa 82 metri di distanza dal sito di test. In entrambi i test, appena i serbatoi hanno ceduto, si sono sviluppate delle nuvole d'idrogeno infiammato con diametro di 7 e 24 metri.

L'energia delle due esplosioni è stata stimata in circa 13 MJ e 15 MJ. Questi valori sono stati misurati in ambiente aperto, qualora il test fosse stato realizzato in un ambiente confinato le sovrappressioni misurate sarebbero state ben superiori.

In definitiva i risultati dei test mostrano che l'area di rischio attorno ad un veicolo alimentato ad idrogeno potrebbe essere potenzialmente di un raggio di 100 metri, considerando l'effetto di una potenziale esplosione del serbatoio a pressione.

Al fine di mitigare i rischi che possono intercorrere in caso d'incendio, alcune case automobilistiche hanno iniziato ad isolare i serbatoi d'idrogeno per migliorarne la resistenza al fuoco.

Statisticamente un'emissione di idrogeno gassoso, in uno spazio aperto, causata da un rilascio da una valvola limitatrice di pressione, genera una fiamma a getto (jet fire), che dal punto di vista del rischio rappresenta un evento molto meno pericoloso rispetto ad un'esplosione.

Affinché avvenga una detonazione è necessaria un'emissione rapida con conseguente innesco ritardato; 40 Kg d'idrogeno gassoso a 350 bar con accensione dopo 30 secondi in un ambiente confinato, come una galleria stradale, possono produrre una detonazione come stimato dallo studio di Venetsanos nel 2008. Si noti che l'accensione deve avvenire dopo un tempo relativamente esteso, nell'ordine dei 30 secondi, affinché si verifichi una grande esplosione. Lo scenario più probabile, tuttavia, è che l'idrogeno si accenda in una fase precedente, poiché possiede dei limiti

d'infiammabilità particolarmente ampi. A mitigare questo rischio interviene la rapida diluizione a cui l'idrogeno è naturalmente soggetto, in particolare in ambienti confinati come le gallerie soggetti alla ventilazione naturale e/o meccanica, che riduce notevolmente la finestra in cui la miscela è combustibile.

La ventilazione diventa dunque una variabile fondamentale per ridurre il rischio d'esplosione in galleria, poiché riduce drasticamente la probabilità che si verifichi l'innesco. Sebbene resta il fatto che un'emissione da una valvola limitatrice di pressione produce una miscela troppo magra, ma se l'emissione dovesse aumentare potrebbe comunque creare miscele omogenee quasi stechiometriche.

## **2.6.5 Veicoli Elettrici: EV**

Al momento sul mercato sono disponibili diverse tecnologie di batterie per l'uso in veicoli totalmente elettrici (EV Electric Vehicle) o ibridi (Hybrid - Electric Vehicle), così da offrire ai consumatori un'opzione di trasporto alternativo ai tradizionali motori a combustione interna (ICE). In questi veicoli il motore a combustione e il sistema di trasmissione sono sostituiti da un solo propulsore elettrico.

I veicoli elettrici ibridi Plug-In (PHEV) offrono la combinazione delle tecnologie: motore elettrico alimentato da batterie, le quali sono ricaricate da un motore a combustione interna che si attiva quando queste si esauriscono.

Gli EV, invece, sono totalmente alimentati da elettricità e ricaricano le loro batterie quando il veicolo è parcheggiato e non è in funzione. Gli EV offrono vantaggi come l'alta efficienza, assenza di emissioni nocive dagli scarichi (non ci sono) e superlative prestazioni soprattutto mediante elevati valori di coppia, il rifornimento è a basso costo e godono di numerosi incentivi statali atti a favorirne la diffusione per combattere i fenomeni legati al cambiamento climatico.

Gli EV utilizzano un sistema di accumulo elettrochimico in cui l'energia viene convertita da energia elettrica ad energia chimica attraverso un processo reversibile. Questo processo avviene mediante un sistema a batterie costituito a celle agli ioni di litio. Le celle sono composte generalmente da un involucro, un anodo e un catodo che sono rispettivamente elettrodi, separatore ed elettrolita. A seconda del tipo di batteria i materiali che la compongono nelle sue parti possono variare, il che si traduce in prestazioni e costi molto variabili.

La tecnologia più diffusa di batterie nei veicoli leggeri, e sulla buona strada per diventare la predominante, è quella della batteria secondaria agli ioni di litio o al litio. Questa ampia diffusione è dovuta all'alta densità energetica, all'alta efficienza e alla lunga durata.

A differenza delle celle primarie al litio che sono usa e getta, le celle secondarie agli ioni di litio sono ricaricabili rendendole particolarmente adatte al montaggio negli EV.

Oltre alle batterie secondarie agli ioni di litio, ci sono anche altre tecnologie come quelle al piombo acido, al nichel metallo idruro (NiMH), nichel cadmio (NiCd) e cloruro di sodio nichel (NaNiCl<sub>2</sub>). Tuttavia, ci sono diversi svantaggi, come la minor energia specifica o capacità di alimentazione specifica, che rendono tali batterie “alternative” meno desiderabili per la diffusione su ampia scala rispetto a quelle agli ioni di litio.

### 2.6.5.1 Proprietà di infiammabilità/esplosività di EV

Le batterie nei veicoli elettrici (EV) presentano un rischio significativo di incendio dovuto al potenziale di guasti a cascata (effetto domino). Quando una cella agli ioni di litio si guasta, i gas infiammabili vengono rilasciati a causa della reazione dell'elettrolita liquido durante il processo di combustione. Questi gas possono rimanere incombusti o accendersi, generando una fiamma a getto (jet-fire) che può rapidamente riscaldare le celle circostanti e convertire l'energia chimica potenziale in energia termica. In presenza di ossigeno sufficiente e materiali potenzialmente infiammabili come nylon e polipropilene, il rischio di incendio diventa significativo.

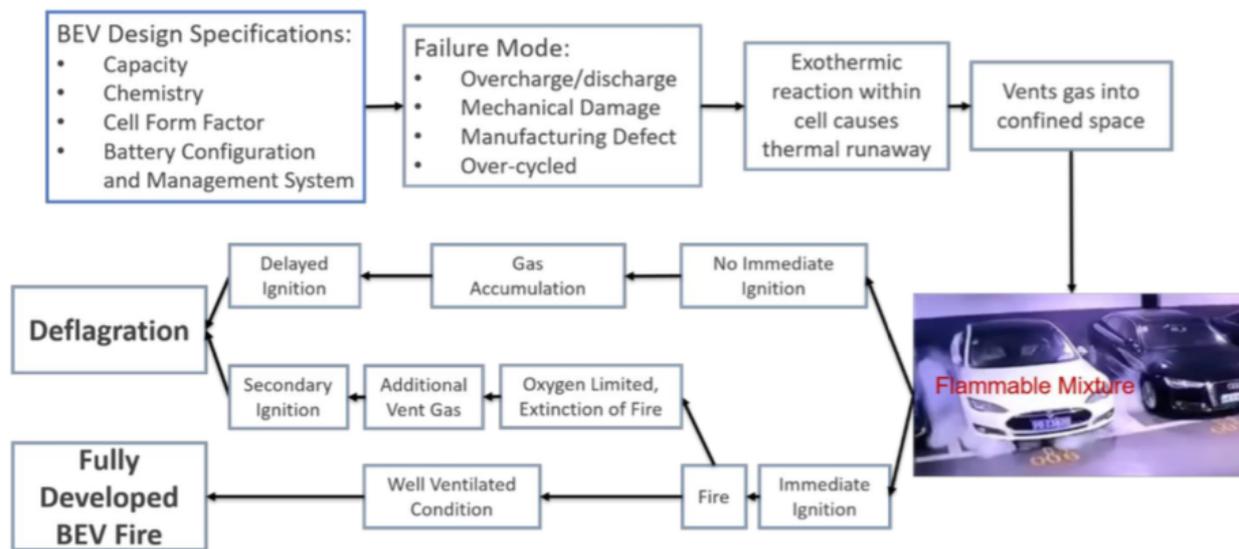


Figura 15: Scenari di guasto di un EV: incendio generalizzato e/o deflagrazione.

Il diagramma sovrastante mostra come la progettazione del sistema può portare alla generazione di una miscela infiammabile e quindi ad un eventuale incendio generalizzato o ad una deflagrazione a causa di uno dei tanti guasti possibili in un EV.

Nel caso in cui si verifichi un guasto in EV collocato in un ambiente confinato (galleria e/o parcheggio) il gas di sfiato può accumularsi pericolosamente. In base a fattori quali: tipo, concentrazione, velocità di rilascio e volume totale di gas di sfiato può formarsi una miscela infiammabile.

Con l'accensione immediata può verificarsi un incendio che consuma l'ossigeno circostante e può portare all'estinzione spontanea dell'incendio. All'aumentare del numero di celle guaste sarà possibile produrre più gas di sfiato. Sulla base del livello di confinamento si determina se lo scenario sarà d'incendio o di deflagrazione/esplosione.

Se l'EV si trova in una zona ben ventilata, con accensione immediata, potrebbe verificarsi un incendio completamente sviluppato.

Se il gas di sfiato continua ad accumularsi in uno spazio ristretto, l'accensione secondaria potrebbe causare una deflagrazione. La deflagrazione e l'incendio potrebbero verificarsi con circa la stessa probabilità di accadimento, anche se nulla vieta che si possano verificare entrambi o solo uno di essi. Le batterie agli ioni di litio presentano un'unica varietà di gas prodotti durante lo sfiato, con differenze significative nel volume e nella velocità di produzione. Negli attuali veicoli elettrici in commercio, la capacità varia da 30 kWh a 100 kWh. Gli studi indicano che il tasso di produzione di gas di sfiato è di circa 0.32 L/Wh con celle da 7.7 Wh, suggerendo la necessità di stimare la produzione di gas su larga scala, considerando l'intero pacco batteria. I gas rilasciati dalle batterie difettose contengono una miscela infiammabile di idrogeno, monossido di carbonio, idrocarburi e biossido di carbonio, con quantità variabili influenzate da fattori come la composizione chimica del catodo, la forma della cella e la sua capacità. Il rischio di deflagrazione o esplosione nelle batterie agli ioni di litio si basa su cinque parametri simultanei: presenza di ossidante, fonte di accensione, carburante, confinamento e dispersione del gas. Il grado di confinamento e la quantità di gas rilasciata da un guasto determinano la gravità dell'esplosione, con esempi come l'incidente di una sottostazione a Surprise, in Arizona, dove un accumulatore di energia agli ioni di litio guasto ha provocato un'esplosione ritardata, causando danni significativi e mettendo a rischio i soccorritori.

#### 2.6.5.2 Scenario con coinvolgimento di EV

Recenti pubblicazioni della NFPA (National Fire Protection Association) statunitense affermano che: “un automobilista ha 5 volte più probabilità di subire un incendio in un'auto a benzina convenzionale piuttosto che in un'auto elettrica”.

Analizzando il panorama italiano dove la diffusione degli EV è ancora al di sotto dei numeri americani, si calcola che il rischio d'incendio collegato alle auto elettriche sia 64 volte minore rispetto

alle vetture a carburante tradizionale. Ad affermarlo è stato Guido Zaccarelli, presidente vicario della sezione APC prevenzione incendi nel 2018. Altre fonti come l'associazione dei proprietari di Tesla affermano che gli incendi di EV sono meno frequenti di quelli delle auto tradizionali, ad esempio per le sole Tesla sono 1 ogni 7500 esemplari contro 1 ogni 1500 delle auto tradizionali, pur tuttavia risultando più impegnativi da estinguere risultano più lenti nello svilupparsi e quindi lasciando maggior tempo agli occupanti di mettersi in salvo.

In paesi come quelli scandinavi dove il tasso di penetrazione degli EV è molto elevato, basti pensare che i norvegesi già ad inizio 2021 possiedono un rapporto di 1:2 tra EV e IEC. Le statistiche delle grandi compagnie assicurative norvegesi, legate ai tassi d'incidentalità mostrano che il numero di incendi di EV rispetto a quelli totali, su un periodo decennale (2006-2016), è del 4.8% con un tasso di decrescita annuale legato all'aumentare dell'affidabilità della tecnologia delle celle agli ioni di litio (nel 2016 la percentuale è scesa al 2.3%).

Esistono numerosi scenari d'incendio legati agli EV. Solitamente un incendio di una batteria può essere causato da un guasto di natura meccanica o termica o da un'influenza esterna (sabotaggio, atti vandalici, etc), ed in tutti questi casi l'energia potenziale chimica interna alle celle agli ioni di litio si può trasformare in energia termica attraverso fenomeni specifici come le fughe termiche attivate da reazioni fuggitive.

Gli scenari che possono verificarsi durante un incendio di un veicolo elettrico differiscono a seconda del tipo di guasto subito dalle celle della batteria.

Il momento più probabile in cui si possa sviluppare un incendio in un EV è quando si esegue la carica, in quanto si espongono le celle della batteria ad uno stress significativo; in particolare quando vengono utilizzate apparecchiature di ricarica scadenti o difettose. A tal proposito risulta particolarmente sensibile l'installazione di colonnine di ricarica in ambienti chiusi, come sono i parcheggi sotterranei o i box condominiali, che se non forniti di adeguati sistemi antincendio possono causare scenari catastrofici.

## **2.7 Analisi della letteratura di scenari di incendio di veicoli con combustibili non convenzionali**

Di seguito si analizza la letteratura di scenari di incendio che hanno coinvolto veicoli con alimentazione combustibile non convenzionale in galleria per caratterizzare la valutazione del rischio.

### **2.7.1 Scenari di incendio del LPG/GPL**

La seguente sezione riassume le ricerche in essere sui guasti di veicoli alimentati a LPG/GPL avvenute in gallerie. L'analisi della letteratura indaga solamente esperimenti che valutano il rischio associato ai veicoli a propano in una galleria. Tuttavia, poiché il materiale specifico è limitato, vengono considerati anche altri esperimenti e test che potrebbero essere rilevanti per comprendere gli effetti di un rilascio accidentale di propano in un ambiente confinato, al fine di caratterizzare il rischio in modo più completo.

#### **2.7.1.1 Controllo del fumo nelle gallerie in pendenza di Atkinson e Wu del 1996.**

Atkinson e Wu hanno studiato gli effetti della ventilazione e dello sviluppo di fumi causati da un incendio di propano in galleria. Le pendenze del tunnel da 0° a 10° sono state utilizzate per sviluppare un fattore di pendenza relativo allo sviluppo e al movimento dei fumi. La galleria è stata modellata con una sezione a ferro di cavallo di larghezza pari a 274 mm e altezza 244 mm, che comprendeva una testa semicircolare su pareti divaricate di 7°.

Per il test è stato utilizzato un bruciatore a propano a letto poroso di 100 mm di diametro, con la parte superiore impostata a filo con la base del tunnel. La portata del gas variava da 2 a 10 litri/min. la velocità d'uscita del propano era di circa 0,4-2 cm/s. Questo caratterizzava un incendio da 15 a 75 MW.

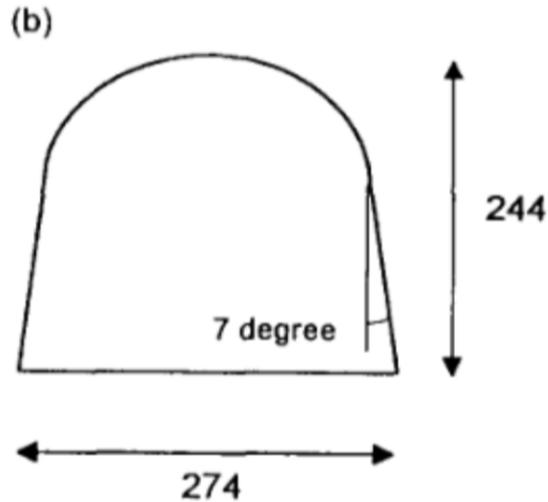


Figura 17: Sezione della galleria a ferro di cavallo: 244 x 274, 7° gradi.

Comprendere la pendenza di un tunnel nel caso di un incendio in discesa è importante nella progettazione del controllo del fumo in caso di emergenza affinché le vie di esodo restino libere dal fumo. La velocità critica viene studiata per comprendere la velocità minima di ventilazione che non consenta al fumo di non rifluire oltre il fuoco.

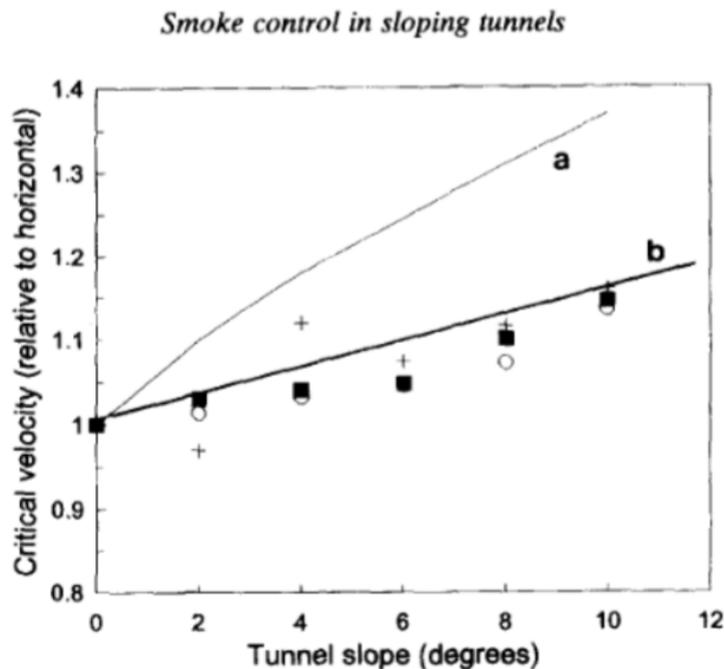


Figura 18: Controllo dei fumi in galleria: Velocità Critica x Pendenza Galleria.

La velocità critica è funzione della pendenza  $\theta$ , del flusso volumetrico di propano e delle variabili adimensionali  $Q^*$  e  $V^*$ . Questi valori transitori sono determinati tramite il ridimensionamento del numero di FROUD.

Nel grafico sovrastante, il quadrato nero indicava il flusso di 10 L/min di propano e  $Q^* = 0.44$ , i cerchi indicano quello di 5 L/min e  $Q^* = 0.22$ , il segno “+” indica quello di 2 L/min e  $Q^* = 0.088$ , mentre la linea “a” indica la previsione del programma di simulazione SES (Subway Environment Simulation) ricavata da un precedente esperimento sul metano, la linea “b” invece mostrava le previsioni basate su questo lavoro.

Le equazioni (2.1) e (2.2) per la velocità critica in una galleria sono state calcolate in funzione della pendenza  $\theta$ , del flusso volumetrico di propano  $V^*$ , del valore di transizione di  $Q^*$ , dell’altezza della galleria  $H$  e della costante di gravità  $g$ :

$$V_{CRI} = [gH]^{1/2} \cdot V_{MAX}^* \cdot \left[ \frac{Q^*}{1.2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot [1 + 0.014 \cdot \theta] \quad \text{for } Q^* < 0.12 \quad (2.1)$$

$$V_{CRI} = [gH]^{1/2} \cdot V_{MAX}^* \cdot [1 + 0.014 \cdot \theta] \quad \text{for } Q^* > 0.12 \quad (2.2)$$

### 2.7.1.2 Rischi e conseguenze di esplosione in tunnel di Weerheijm and B. van den Berh del 2014.

Weerheijm e Van den Berg hanno sviluppato dei modelli ingegneristici per quantificare il carico e la conseguenza di un’esplosione di GPL in una galleria. Gli input utilizzati per l’analisi CFD sono stati: la velocità di rilascio del gas, la durata del flusso, i parametri geometrici e la ventilazione. Il risultato è stato un modello di dispersione e concentrazione della nuvola di gas in funzione del tempo. I carichi esplosivi necessari a portare il gas ad esplodere sono stati stimati mettendo in relazione la lunghezza e la concentrazione della nuvola alle sovrapressioni di una nuvola stechiometrica equivalente.

Lo sviluppo di una nuvola infiammabile, quindi poi potenzialmente esplosiva, dipendeva dal rapporto tra la velocità di ventilazione dell’aria e il tasso di rilascio della perdita di GPL. La forza dell’esplosione dipendeva dall’estensione della nube infiammabile. Inoltre, si sarebbe potuta verificare una detonazione se la nuvola infiammabile fosse stata sufficientemente estesa.

Nel primo caso di studio è stato modellato un serbatoio quasi piano in cui il liquido bollente rilasciato si sarebbe potuto espandere in una nuvola esplosiva di vapore (Blave). La sezione del tunnel era rettangolare con dimensioni di 5 x 14.4 m (72 m<sup>2</sup>). Nell’area intorno al serbatoio (circa 8 m), l’esplosione ha provocato un fronte di alta pressione contro il rivestimento di circa 600-800 KPa. Il

flusso è stato quindi reindirizzato nella direzione assiale del tunnel, diminuendo l'entità della pressione.

Nel secondo caso di studio è stata modellata la rottura di un serbatoio di GPL quasi vuoto. Anche questo caso ha provocato fenomeni simili al Blave, tuttavia il valore della pressione misurata nelle pareti del tunnel (entro 6 m) è stata notevolmente inferiore: 200-500 KPa.

### 2.7.1.3 Valutazione della sicurezza del carburante gassoso per autoveicoli leggeri di M.Krupka, A. Peaslee e H. Laquer, del Los Alamos National Laboratory Report, del 1983.

Un'analisi comparativa del rischio relativa ai combustibili alternativi, compreso il GPL, è stata condotta dal LANL. L'analisi si è basata sulla raccolta di dati: proprietà fisico-chimiche, dati di sicurezza, statistiche sugli incidenti automobilistici e scenari di incidenti specifici. Uno degli scenari valutati riguardava la collisione di un veicolo in galleria con conseguente perdita di carburante. Un gruppo di esperti ha stimato le probabilità di risultati diversi al variare dei carburanti presi in considerazione. La tabella sottostante mostra i risultati. Questi tassi di probabilità sono basati solo giudizi di esperti piuttosto che da dati oggettivi, quindi il loro valore è relativo. Il GPL si stima che abbia maggiore probabilità di provocare un incendio senza lesioni e senza la comparsa di fuoco, inoltre presenta una probabilità minore di provocare un'esplosione rispetto alla benzina.

*Tabella 19: Tassi di probabilità per diversi tipi combustibile.*

Conseguenze	Probabilità				
	CNG	LNG	LPG	Benzina	Gasolio
Fuoco senza Feriti	0.1	0.1	0.15	0.12	0.02
Fuoco con Feriti	0.05	0.05	0.08	0.1	0.01
Esplosione	0.05	0.05	0.12	0.2	0.01
Nessun innesco	0.8	0.8	0.65	0.58	0.93

#### 2.7.1.4 Problemi e Limiti degli scenari d'incendio del GPL

Gli studi dedicati agli scenari d'incidenti di autoveicoli alimentati a GPL in galleria sono limitati. In particolare gli esperimenti che valutano esplicitamente i rischi dei veicoli a propano in galleria sono scarsi. Tuttavia, per raccogliere materiale significativo sono stati inclusi studi attinenti che possono aiutare il lettore se non a definire il problema almeno ad inquadrarlo.

Uno di questi esperimenti ha valutato l'emissione e la formazione di nubi infiammabili in spazi confinati come i parcheggi e i garage.

Sono stati esaminati gli effetti della ventilazione e dello sviluppo di fumi causati da rilasci di GPL in galleria. Inoltre, sono stati condotti studi di modellazione sui tassi di rilascio e dispersione da un veicolo a propano e le potenziali conseguenze di un'esplosione.

È stata anche eseguita un'analisi dei rischi basata su risultati probabilistici di veicoli equipaggiati con diversi tipi di combustibile, compreso il propano.

Le conclusioni che possono essere tratte da questi esperimenti sono tuttavia limitate. Per quanto riguarda la dispersione e la formazione delle nuvole di propano infiammabile, queste dipendono dal tipo e dalla geometria del tunnel. I risultati mostrano quanto la ventilazione faccia la differenza sulla concentrazione complessiva di una perdita di GPL. L'analisi probabilistica mostra comunque che un rilascio di GPL porta a conseguenze molto simili rispetto ad uno di benzina.

In conclusione è possibile affermare che non c'è all'attuale stato dell'arte una ricerca puntuale e completa sui rischi conseguenti ad un rilascio di GPL in galleria stradale. Risulterebbe opportuno indagare vari aspetti per ottenere un quadro completo sui rischi che comporta un incidente di un veicolo a GPL in galleria:

- Fare una valutazione complessiva degli eventi iniziali che risultano significativi in termini di veicoli a GPL in galleria;
- Valutare diverse classi di veicoli stradali a GPL: auto, autobus e Camion;
- Valutare le curve HRR-tempo per le diverse tipologie di guasto nei veicoli GPL in galleria;
- Valutare gli effetti che la sovrappressione, la deflagrazione e l'eventuale DDT possono causare alla struttura della galleria stradale;
- Valutare gli effetti che alcune variabili tipiche (ventilazione, confinamenti, ostruzioni, geometrie, etc) generano durante un guasto di un veicolo GPL in galleria;
- Indagare le conseguenze termiche dei guasti in maniera più accurata;
- Convalidare i risultati noti e futuri con esperimenti in scala reale;
- Indagare maggiormente l'influenza della classe del veicolo e la diversa quantità di combustibile immagazzinato con gli effetti di un possibile rilascio.

## 2.7.2 Scenari di incendio gas naturale

La seguente sezione riassume le ricerche relative a guasti di veicoli, in galleria, alimentati a metano. A causa delle elevate pressioni di stoccaggio del gas metano a bordo dei veicoli, il serbatoio di CNG potrebbero produrre grandi masse infiammabile, tuttavia risulta improbabile che la massa di gas s'innesci senza una fonte di accensione esterna. Diversi studi si sono concentrati sull'analisi delle nuvole accese di gas naturale e dei getti ad alta pressione che possono essere rilasciati dai serbatoi depressurizzati.

### 2.7.2.1 VCE in una lunga zona confinata di una miscela di metano e idrogeno di B. Lowesmith, G. Hankinson e D. Johson del 2011.

L'esperimento si basava su una serie di esplosioni di nubi di vapore in una lunga sezione confinata. Il test prevedeva un dominio di 18 m x 3 m x 3 m nel quale è stata accesa una serie di nubi di vapore di gas naturale a congestione variabile.

Lo scopo della prova era determinare il rischio di DDT (Deflagration to Detonation Transition) quando la velocità della fiamma era accelerata dalla congestione. Sono stati misurati i valori di velocità e sovrapposizione della fiamma. La velocità iniziale della fiamma, prima di entrare nella zona di congestione, variava da 45 m/s a 156 m/s. L'esperimento si è svolto in un recinto lungo 26 m che conteneva due sotto zone: la prima di 18 m congestionata e la seconda di 8.25 m libera.

L'intero involucro è stato riempito con una miscela di gas di aria e con rapporti di equivalenza 1.16 e 1.09. Le miscele sono state accese nella regione libera in posizioni variabili al fine di ottenere velocità di fiamma specifiche prima della congestione.

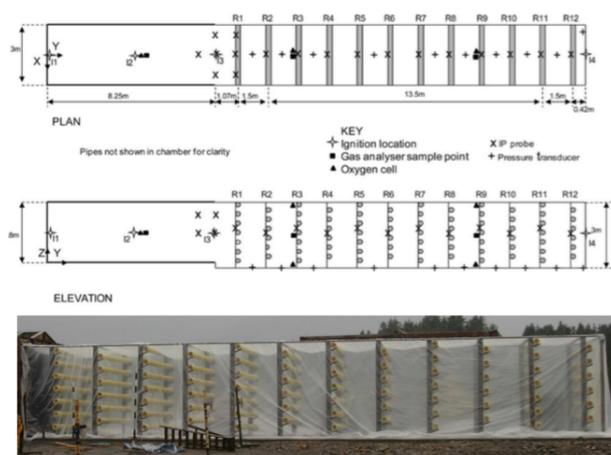


Figura 19: Veduta del poligono di prova, ambiente confinato (18x3x3 m).

Il gas all'interno del confinamento scorreva da sinistra a destra ed è stato fatto ricircolare fino ad ottenere una miscela uniforme. Le miscele prese in considerazione hanno valutato sia miscele di gas naturale (VCE01) che di gas naturale ed idrogeno (VCE04).

Per il test VCE01 la fiamma è stata accelerata da una velocità di 4 m/s ad una di 130 m/s ed è stata raggiunta una sovrappressione massima di 0.34 bar.

VCE04, test ad alta velocità iniziale, la velocità di fiamma massima è stata accelerata fino a 300 m/s con una sovrappressione massima che ha raggiunto i 2 bar.

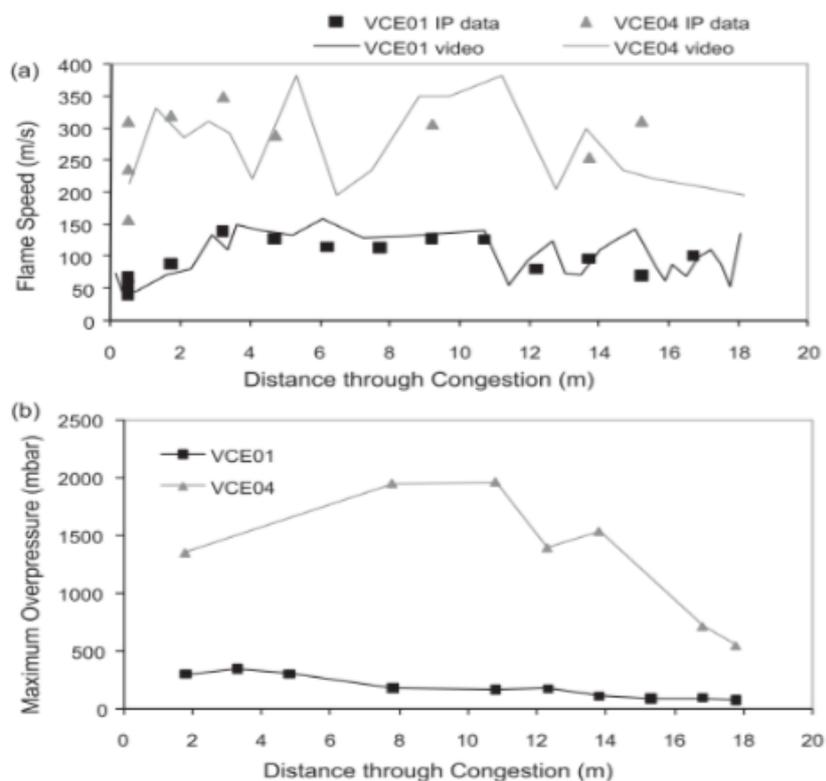


Figura 16: Grafici che mettono in relazione la distanza della zona confinata con la velocità di fiamma e la massima sovrappressione.

Nonostante le alte velocità di fiamma e la quantità di ostruzioni, il passaggio alla detonazione non si è verificato. Per avere la transizione DDT nel caso di miscele metano-aria le condizioni di prova devono essere più severe. Dalla letteratura emerge che per avere DDT la velocità di fiamma massima deve essere almeno di 800 m/s con Mach di 1.82.

Risulta quindi improbabile che queste condizioni così severe si possano sviluppare durante un rilascio di metano da un serbatoio di un veicolo stradale in galleria a causa della miscelazione non uniforme, della mancanza di un maggior confinamento e dell'assenza di fonti d'innesco ad alta energia. Pertanto

le probabilità che si verificano dei DDT durante degli incidenti stradali in galleria è altamente improbabile.

### 2.7.2.2 VCE da un innesco di una miscela di metano/idrogeno/aria in una zona confinata, M.Royle, L. Shirvill e T. Roberts, del 2007

I test condotti da Royle intendevano misurare la sovrappressione prodotta da miscele di metano e metano-idrogeno premiscelate all'interno di spazi confinati.

Il dominio sperimentale aveva una dimensione di 3m x 3m x 2m, adiacente insisteva un muro di calcestruzzo necessario per proteggere la sala di controllo così da non farla interferire con le onde di pressione in campo libero. Il muro aveva sensori di pressione a diverse quote. La parte esterna della griglia era ricoperta da una sottile pellicola di plastica da 23µm che conteneva la miscela di gas. Il gas metano è stato miscelato con l'aria per formare un rapporto stechiometrico di 1.1 che da letteratura produce le sovrappressioni più elevate. La sorgente di accensione era situata ad un'altezza di 0.5 m dal suolo e posizionata al centro della griglia. Per l'innesco un condensatore da 2.25J è stato scaricato attraverso uno spinterometro da 6 mm.

I valori di sovrappressione sono stati misurati da una serie di sensori a bassa e alta pressione. Tutti i sensori sono stati posizionati a 500 mm dal suolo ad eccezione dei sensori di pressione di campo lontano, che sono stati montati in posizioni più alte a causa della topografia del banco di prova.

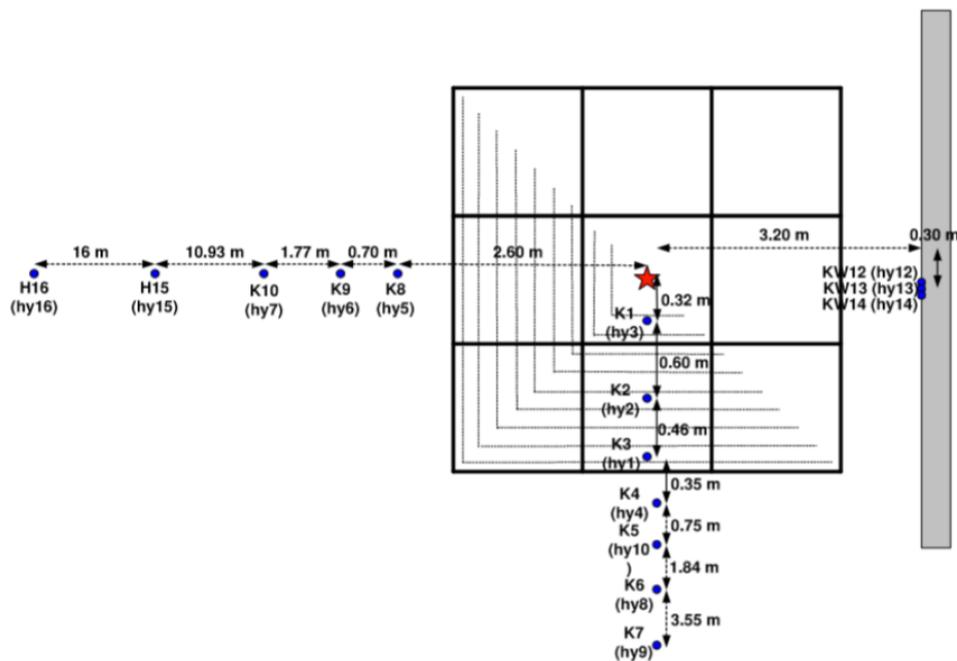


Figura 17: Schema di collocazione dei sensori di misura all'interno e all'esterno del dominio di prova.

Le pressioni sono state misurate in un'ampia gamma di posizioni, incluso il muro adiacente. La tabella seguente mostra le condizioni iniziali prima dell'accensione. Il metano puro è stato etichettato come NatHy\_02. Qui vengono riportati solo gli esiti degli esperimenti del metano e non delle miscele metano-idrogeno.

Tabella 20: Valori significativi del metano (NatHy\_02) misurati prima dell'accensione.

Misurazioni	Condizioni Test: NatHy_02	Misurazioni	Condizioni Test: NatHy_02
Metano [Vol %]	100	Pressione Atm [kPa]	97.71
Numero di Strati	9	Concentrazione Media Ossigeno [%]	18.71
Volume Libero	17.207	Pressione Parziale Ossigeno [kPa]	0.1871
Temperatura Miscela Gas [°C]	4.8	Pressione Parziale Azoto [kPa]	0.0076
Umidità Relativa [%]	85.1	Pressione Parziale Gas Combustibile [kPa]	0.0994

È stato notato che durante l'esperimento l'umidità risultava incontrollata ma si presumeva che avesse un effetto minoritario sui valori di sovrappressione dell'esplosione.

I grafici seguenti mostrano i valori delle sovra pressioni misurati in vari punti per tutte le miscele, ricordiamo che l'NatHy\_02 corrispondente al metano privo d'idrogeno era indicato dalla linea di colore blu. Le pressioni sono state riportate nelle regioni del campo vicino (all'interno e appena fuori della griglia) e lontano.

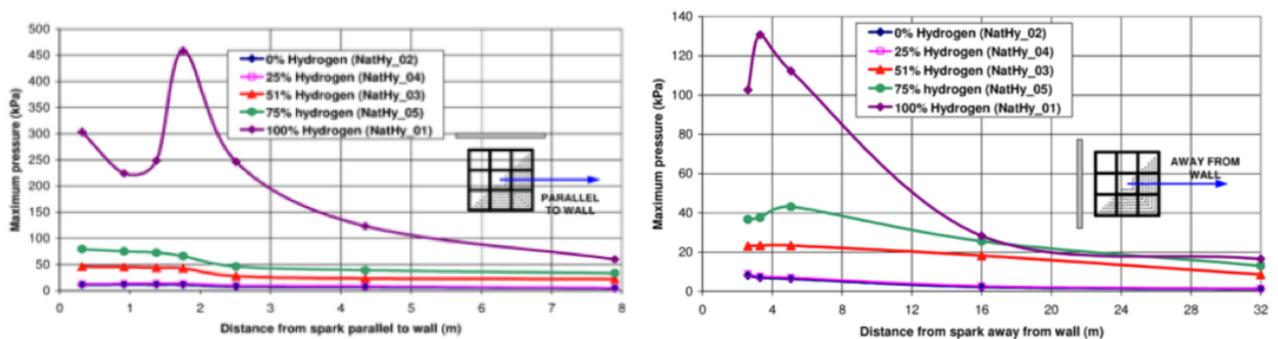


Figura 18: Grafici indicanti le sovrapressioni in relazione al punto di rilevazione per le diverse miscele, il metano corrisponde alla linea blu (NatHy\_02).

Nel campo vicino i valori di sovrappressione variano da 11 a 15 kPa. All'interno della griglia di prova la sovrappressione ha raggiunto gli 11.8 kPa e appena fuori l'1.4 kPa.

Nel campo lontano, a 32 m di distanza, la sovrappressione misurata era di 1.2 kPa.

Ricordiamo la soglia dei 4 kPa, che corrisponde al limite al di sotto del quale non vi sono lesioni da schegge da vetro volante.

L'esperimento prevedeva l'accensione di una miscela quasi stechiometrica di metano-aria premiscelata in una zona confinata di 18 m<sup>3</sup> con un alto livello di congestione: tali condizioni sono altamente improbabili da riscontrare durante un incidente con rilascio di gas naturale in galleria, soprattutto perché devono avvenire simultaneamente.

### 2.7.2.3 Dispersioni di CNG in un tunnel a ventilazione naturale di R.G. Zalosh, del 1994.

Sono stati studiati tre tunnel a ventilazione naturale rispetto alla dispersione transitoria di nubi di vapore o gas prodotte durante un rilascio accidentale di CNG. Lo scopo dello studio era di determinare l'effetto che la velocità di ventilazione aveva sulla formazione e dissipazione di volumi infiammabili. Sono state confrontate le emissioni provenienti da furgoni a CNG e benzina con autonomia paragonabile.

Il veicolo a CNG, il cui serbatoio conteneva 24 kg di gas a 20.68 kPa, ha rilasciato attraverso un tubo da 6.35 mm (1/4") gas metano in condizioni di flusso strozzato.

Il veicolo a benzina, con un serbatoio da 35 galloni (132.5 L), ha rilasciato il carburante allo stato liquido attraverso un tubo da 12.7 mm (1/2"). La benzina si è accumulata al suolo per poi evaporare formando una nuvola di vapore. La benzina si ipotizzava composta da: 53% pentano, 22% esano e 25% benzene.

Il test ha previsto la misurazione del profilo della velocità media in condizioni di basso traffico per diversi tunnel di Boston: Rutherford Avenue, Storrow Drive e Prudential Tunnels. I profili di velocità per ogni galleria sono stati misurati utilizzando una sonda a filo caldo su palo telescopico a varie altezze (1-5.5 m). Durante le misurazioni, una corsia è stata chiusa in modo che le letture potessero essere prese nel centro del tunnel. La sonda è stata spostata anche lungo la lunghezza della galleria al fine di ottenere le variazioni lungo l'asse longitudinale della galleria.

*Tabella 21: Dimensione delle gallerie di prova e velocità media della sezione trasversale dell'aria nelle rispettive sezioni trasversali.*

<b>Tunnel</b>	<b>Dimensioni del Tunnel (L x W x H) [m]</b>	<b>Velocità Media [m/s]</b>
<b>Rutherford Avenue</b>	121.9 x 15.2 x 5.4	1.24
<b>Storrow Drive</b>	304.8 x 9.1 x 15	1.00

<b>Prudential Tunnel</b>	224.0 x 18.3 x 4.6-7.1	1.10
<b>Media</b>		1.11

Il tasso di rilascio del CNG è stato calcolato come flusso isoentropico strozzato. I modelli di dispersione hanno simulato un rilascio in un dominio di 100.0 x 8.25 x 4.27 m. Le dimensioni e la forma della nuvola infiammabile sono state definite dal limite inferiore di infiammabilità (LFL) per ciascun carburante. L'LFL del CNG è del 5.0% in volume in aria, mentre l'LFL dei vapori della benzina è del 1.6% del volume in aria. Il volume della regione infiammabile è stato misurato dal punto di rilascio (posizione del furgone) alla fine del dominio di calcolo impostato per il modello. La figura sottostante di sinistra mostra il volume della regione infiammabile ottenuto per ogni combustibile in funzione della velocità di ventilazione.

Un rilascio di CNG equivalente produce un volume infiammabile molto più piccolo in presenza di una minima ventilazione (0.1 m/s). Al crescere della velocità di ventilazione, aumenta anche l'evaporazione della pozza di benzina. Nella figura inferiore destra si può notare come la velocità di rilascio del metano è costante perché il flusso viene strozzato indipendentemente dalla velocità di ventilazione.

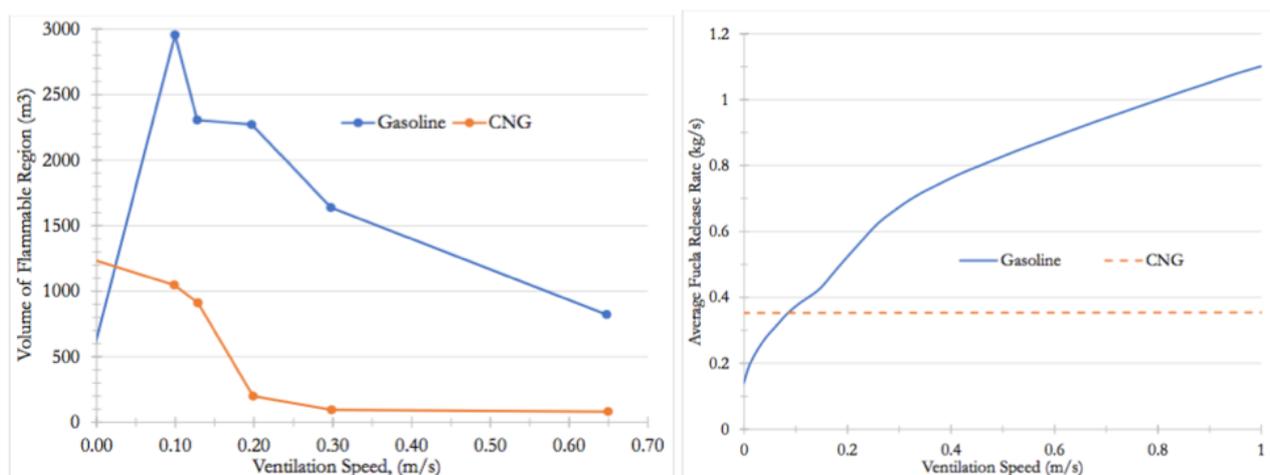


Figura 19: Grafici che mettono in relazione la regione infiammabile [m<sup>3</sup>] e la media del tasso di rilascio del combustibile [kg/s], in relazione alla velocità dell'aria [m/s] del metano (CNG) in arancione.

La velocità di rilascio della benzina aumentava al crescere della velocità di ventilazione a causa dell'incremento dell'evaporazione dalla pozza. Questo aumento iniziava seriamente a ridursi solo quando la velocità di ventilazione aumentava oltre 0.2 m/s. Invece, la velocità di rilascio del CNG era indifferente dalla velocità di ventilazione. Occorre notare che questi valori erano molto inferiori al rilascio di vapore medio misurato.

Complessivamente si era osservato, se la ventilazione risultava sufficiente, che le emissioni di CNG producevano masse infiammabili più piccole di quelle della benzina quando rilasciate in un tunnel a ventilazione naturale e con velocità del traffico ridotta.

#### 2.7.2.4 Simulazione CFD del rischio di esplosione da idrogeno e gas naturale in galleria di P. Middha e O. Hansen del 2009.

Lo studio utilizza dei modelli CFD per supportare la valutazione dei rischi di esplosione per auto e autobus alimentati a CNG nelle gallerie. L'obiettivo della modellazione era di prevedere un rischio quantitativo di esplosione del metano in galleria. Il software utilizzato è stato FLACS. Lo studio ha svolto simulazioni per auto e autobus sia alimentate a CNG sia ad  $H_2$ , in questo caso si è modellato il rilascio di metano per auto e per autobus.

L'autobus era un modello urbano con serbatoi di stoccaggio da 26 kg di massa e 200 bar di pressione a bombola. Si ipotizza che il rilascio avvenga da un set di quattro bombole con un totale di 104 kg di metano.

L'auto possiede un serbatoio standard da 26 kg di massa e 200 bar di pressione.

Per quanto riguarda le gallerie, sono state considerate due diverse tipologie di sezione trasversale, una rettangolare ed una a ferro di cavallo. Entrambi i tunnel sono stati modellati con una lunghezza di 500 m.

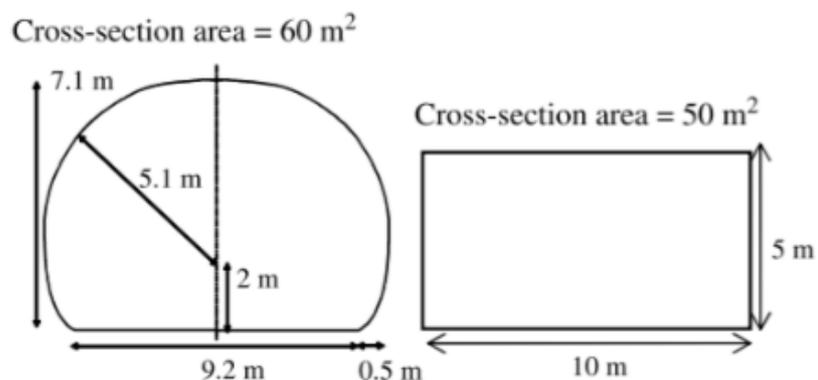


Figura 20: Sezione trasversale galleria: sezione a ferro di cavallo e sezione rettangolare.

Oltre alle sezioni trasversali e longitudinali del tunnel, la modellazione includeva i veicoli. Entrambi i tunnel erano a doppia corsia, con il traffico in un'unica direzione. Si ipotizzava, inoltre, che il tunnel fosse pieno di auto e autobus distanziati uniformemente di  $1.5 \text{ m}$  l'uno dall'altro. La distribuzione dei veicoli era un modello ripetuto per tutta la lunghezza delle gallerie: 6 auto seguite da 1 autobus. Lo stesso modello geometrico è stato utilizzato sia per il rilascio dell'auto che per quello dell'autobus. Si presumeva che i rilasci avessero un flusso strozzato. La portata massima del CNG per flusso

parzializzato a 200 bar (vedi immagine sottostante) è stata calcolata assumendo un coefficiente di scarico di 0.8 e un'apertura di 6 mm.

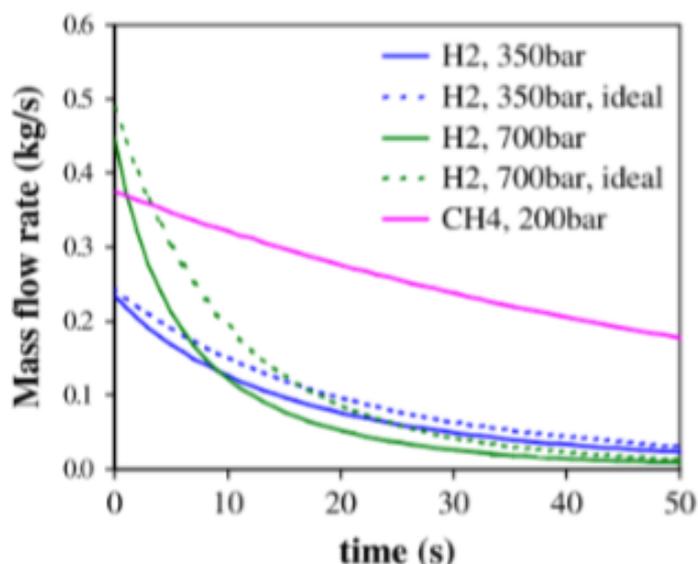


Figura 21: Grafico che mette in relazione la portata di CNG (Viola) con il tempo di rilascio.

I punti di accensione sono stati variati dal centro della nube di vapore ai bordi esterni. Anche le velocità di ventilazione sono state modificate tra i modelli. È stato realizzato un modello di dispersione che simula il rilascio dei sistemi di alimentazione.

La tabella sottostante elenca la dimensione massima della nuvola di gas infiammabile per ciascuna configurazione, nonché la nuvola stechiometrica equivalente o la nuvola quiescente Q9 (è una nuvola di gas stechiometrica più piccola in scala che rappresenta lo stesso carico di esplosione della nuvola più grande non omogenea, la scala avviene in base al volume infiammabile e alla velocità di combustione laminare).

Tabella 22: Tabella riassuntiva contenente per ciascuna configurazione indagata: dimensione massima della nuvola di gas infiammabile e la nuvola stechiometrica equivalente (o nuvola quiescente).

Caratteristiche Veicolo/Rilascio	Inventario [kg]	Dimensione Max della Nuvola di Gas Infiammabile in m <sup>3</sup> [kg]		Dimensione Max della Nuvola di Gas Stechiometrica Equivalente di Gas Infiammabile in m <sup>3</sup> [kg]		Max Pressione per Nuvola Max Equivalente Stechiometrica Q9 Quiescente/Pre Accensione Turbolenta	
		Tunnel Ferro di Cavallo	Tunnel Rett.	Tunnel Ferro di Cavallo	Tunnel Rett.	Tunnel Ferro di Cavallo	Tunnel Rett.
Bus CNG 200 bar	26	3.4 [0.15]	4.6 [0.19]	1.15 [0.08]	1.18 [0.08]	1.2	0.01/0.01
Bus CNG 200 bar	104	45 [2.10]	647 [26.0]	13.5 [0.90]	113.48 [7.60]	113.0	0.03/0.30
Car CNG 200 bar (Ventilazione Alta)	26	2.1 [0.10]	3.4 [0.15]	0.85 [0.06]	1.03 [0.07]	1.0	0.01/0.01

Car CNG 200 bar (Ventilazione Bassa)	26	17 [0.78]	15 [0.65]	6.31 [0.42]	5.25 [0.35]	6.3	0.01/0.07
--	----	-----------	-----------	-------------	-------------	-----	-----------

Dalle simulazioni accoppiate di dispersione e combustione si prevedeva che i valori di sovrappressione in galleria potessero produrre danni minori a persone e cose. Nel caso di sovrappressioni si rientrava tra la soglia delle lesioni da vetro volante, mentre nel caso di turbolenza di pre-accensione si ricadeva nella soglia di ferite potenzialmente gravi da vetro volante con probabilità massima di accadimento del 50 %.

I dati riportati nella tabella precedente sono stati combinati per creare una curva di frequenza di superamento per le sovrappressioni durante la combustione di nubi di vapore di CNG. Analizzando i valori di sovrappressione (linea verde) al di fuori dell'intervallo pericoloso (meno di 0.1 barg) risulta che essi sono molto più probabili delle sovrappressioni più elevate che possono risultare pericolose per gli occupanti del tunnel.

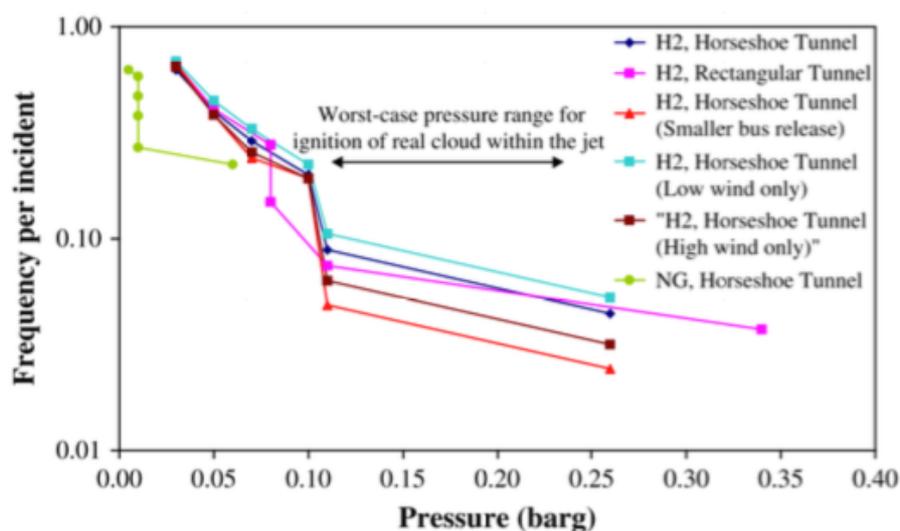


Figura 22: Curve di frequenza di superamento delle sovrappressioni durante la combustione di vapori di CNG (Verde).

### 2.7.2.5 Sicurezza degli autobus a CNG: Valutazione del rischio quantitativo, di S. Chamberlain e M. Modarres, del 2005.

In letteratura non vi sono valutazioni dei rischi associate a rischi specifici di veicoli CNG all'interno di una galleria. Tuttavia, esiste uno studio quantitativo che confronta autobus alimentati sia a combustibile tradizionale che a CNG, mostrando che questo ultimo comporta rischi più elevati.

L'analisi condotta in questo studio confronta il rischio antincendio associato ad un autobus a CNG con uno a gasolio. Poiché i dati relativi a guasti critici di veicoli pesanti a metano sono limitati, è stata eseguita una valutazione probabilistica del rischio (PRA) con un approccio in due fasi: prima è stata eseguita un'analisi qualitativa del rischio (QRA) e poi una quantitativa (PRA).

Lo studio ha identificato i rischi associati alla sicurezza antincendio: potenziale d'incendio dovuto a perdite di carburante, potenziale d'esplosione da dispersione incontrollata e miscelazione di metano in presenza di una fonte d'innesco, impatti e pericoli dovuti all'immagazzinamento di carburante ad alta pressione, rischi chimici e scarica elettrostatica.

Per identificare le modalità di guasto più significative è stata effettuata un'analisi FMEA. Queste modalità di guasto sono state determinate in base alla frequenza del verificarsi e alle conseguenze complessive. È seguita poi una PRA con albero dei guasti e degli eventi che ha portato a determinare gli scenari d'incendio e d'esplosione. È stata discussa anche l'incertezza dei parametri e come ha influenzato i risultati della PRA, compreso il sistema di alimentazione dell'autobus e le infrastrutture di supporto (stazioni di rifornimento, etc).

Attraverso la FMEA eseguita è stata classificata la gravità di uno scenario d'incidente ed è stata creata una matrice di classificazione per i sistemi CNG.

Dalla QRA è stato approssimato che il rischio medio totale d'incendio è 2.5 volte maggiore per gli autobus a CNG rispetto a quelli a gasolio. I risultati complessivi hanno identificato gli autobus a metano in possesso di un rischio più elevato in termini di rischi d'incendio ed esplosione a causa dei tassi di guasto delle valvole di sicurezza, delle bombole di metano e delle tubazioni. Queste conclusioni differiscono con lo studio di Zalosh del 1994, il quale sosteneva che i furgoni a metano presentano rischi inferiori per quanto riguarda le dispersioni di gas infiammabili rispetto alla dispersione di vapori infiammabili da una pozza di benzina di volume equivalente. Zalosh conclude che il CNG presenta rischi minori alla benzina, mentre Chamberlain e Modarres concludono che il CNG ha un rischio maggiore rispetto al gasolio.

2.7.2.6 Valutazione della sicurezza del carburante gassoso per veicoli automobilistici leggeri di M.Krupka, A. Peaslee e H. Laquer, del Los Alamos National Laboratory Report, 1983.

Un'analisi comparativa del rischio relativa ai combustibili alternativi, compresi CNG e LNG, è stata condotta dal LANL. L'analisi si è basata sulla raccolta di dati: proprietà fisico-chimiche, dati di sicurezza, statistiche sugli incidenti automobilistici e scenari di incidenti specifici. Uno degli scenari valutati riguardava la collisione di un veicolo in galleria con conseguente perdita di carburante.

Un gruppo di esperti ha stimato le probabilità di risultati diversi al variare dei carburanti presi in considerazione. La tabella sottostante mostra i risultati. Questi tassi di probabilità sono solo giudizi d'esperti piuttosto che dati oggettivi. Si stima che il gas naturale abbia meno probabilità di provocare

un incendio con o senza lesioni, più probabilità di non incendiarsi e meno probabilità di provocare un'esplosione rispetto alla benzina.

Tabella 23: Tassi di probabilità per diversi tipi combustibile.

Conseguenze	Probabilità				
	CNG	LNG	LPG	Benzina	Gasolio
Fuoco senza Feriti	0.1	0.1	0.15	0.12	0.02
Fuoco con Feriti	0.05	0.05	0.08	0.1	0.01
Esplosione	0.05	0.05	0.12	0.2	0.01
Nessun innesco	0.8	0.8	0.65	0.58	0.93

### 2.7.2.7 Problemi e Limiti degli scenari d'incendio del Gas Naturale

Le ricerche condotte sugli effetti dei veicoli a metano nelle gallerie hanno identificato diversi scenari di rischio e concluso alcune importanti considerazioni.

- **Valutazione dei rischi:** gli studi hanno esaminato i rischi legati al metano in varie situazioni, come le conseguenze di nubi di vapore accese (Blave) e getti ad alta pressione (Jet-Fire). Sono stati esaminati la probabilità di DDT, sovrappressione e trasferimento di calore durante incidenti con veicoli a gas naturale.
- **Modellazione CFD:** l'uso della modellazione CFD ha permesso di valutare le dispersioni, le modalità di guasto, le sovrappressioni e le lunghezze delle fiamme dei rilasci di CNG e LNG.
- **Influenza della ventilazione:** È stato dimostrato che una buona ventilazione riduce il rischio di formazione di nubi infiammabili e, in caso di deflagrazioni, limita le sovrappressioni.
- **Scenari di guasto:** diversi scenari di guasto sono stati identificati, tra cui impatti con altri veicoli, guasti alla valvola di sicurezza, degrado della struttura e errori umani.
- **Misurazioni e conseguenze:** le misurazioni delle sovrappressioni, le curve HRR-Tempo e il tipo di dispersione sono importanti per stimare le conseguenze di un guasto, ma sono influenzate dalle variabili tipiche delle gallerie.
- **Modalità di guasto:** le modalità di guasto per i veicoli a gas naturale includono il potenziale d'incendio, il potenziale esplosivo e la scarica elettrostatica.
- **Necessità di approfondimenti:** sono necessari ulteriori studi per comprendere meglio le conseguenze del rilascio di gas naturale nelle gallerie, inclusi effetti termici sulle pareti, sovrappressione in scala reale e accensione di nubi premiscelate.
- **Importanza della collocazione delle bombole:** la collocazione delle bombole nei veicoli può influenzare significativamente il rischio di incidenti e guasti.

In sintesi, le ricerche evidenziano l'importanza di valutare attentamente i rischi associati ai veicoli a metano nelle gallerie e suggeriscono la necessità di ulteriori studi per affrontare lacune specifiche (il rischio di scheggiare la struttura in cemento della galleria a seguito degli effetti termici della fiamma e del calore sulle pareti, studi sperimentali capaci di indagare adeguatamente i fenomeni di sovrappressione in gallerie in scala reale, indagare i casi di accensione di nubi premiscelate, di estensione e volume realistico, nelle gallerie al fine di individuare la sovrappressione massima e realizzare analisi del trasferimento di calore, delle fiamme di gas naturale, su scala reale) nella comprensione di tali rischi.

### **2.7.3 Scenari di incendio dell'Idrogeno**

In letteratura sono presenti pochi lavori che hanno valutato le conseguenze di un guasto in galleria accaduto ad un veicolo FCEV ad idrogeno. Di seguito sono stati selezionati gli studi più significativi, con l'intento di spiegare cosa accadrebbe se l'idrogeno venisse rilasciato dal serbatoio ad alta pressione in un ambiente confinato. Questi test hanno valutato inneschi immediati e ritardati, scenari finali nel tunnel con deflagrazione e detonazione e possibili DDT, l'influenza della ventilazione sugli accumuli di gas infiammabile nella volta della galleria, gli effetti della congestione e della quiescenza del gas, ed infine la differenza tra rilasci istantanei e continui.

#### **2.7.3.1 Deflagrazione e Detonazione d'idrogeno su larga scala, di M. Groethe, E. Merilo, J. Colton, S. Chiba, Y. Sato e H. Iwabuchi del 2007.**

L'esperimento è stato condotto in un tunnel in scala ridotta e prevedeva la creazione di deflagrazioni attraverso inneschi da scintilla utilizzando miscele di idrogeno omogenee.

La galleria scenario del test, un tunnel in scala 1:5, è stata utilizzata per eseguire diversi esperimenti con quantità di rilasci d'idrogeno variabili ed in assenza di ventilazione. Questi test sono stati compiuti per simulare il rilascio d'idrogeno da un veicolo FCEV o da una bombola cilindrica di stoccaggio. La ricostruzione del tunnel in scala prevedeva la presenza di ostacoli a simulare la presenza del traffico veicolare così da determinarne l'influenza durante l'esplosione. I 37 m<sup>3</sup> d'idrogeno, contenuti da barriere in film plastico HDPE al centro della galleria, erano in miscela comprese tra il 9.5 % (0.32 kg) e il 30 % (1 kg) con l'aria. Poco prima dell'innesco, tramite scintilla, le barriere di plastica sono state tagliate. Ulteriori esperimenti hanno valutato differenti variabili, tra cui diverse velocità di rilascio dell'idrogeno e l'influenza della ventilazione.

Le figure sottostanti in scala mostrano la struttura della galleria e i modelli di veicoli.

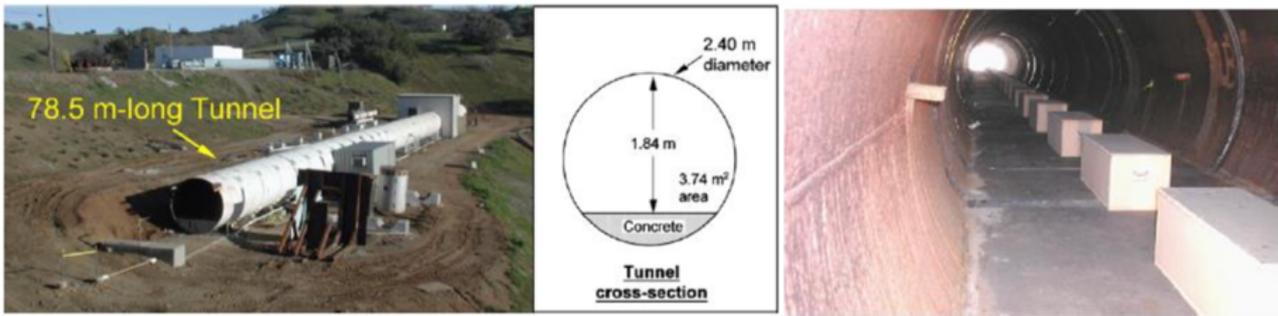


Figura 23: Vista esterna ed interna del tunnel di test in scala 1:5.

I risultati della campagna sperimentale hanno mostrato che la miscela d'idrogeno omogenea al 9.5 % produceva impulsi di pressione troppo piccoli per essere rilevati dai sensori. Solo quando il contenuto del volume d'idrogeno è stato aumentato al 20 % e poi al 30 %, gli impulsi di pressione hanno misurato rispettivamente 35 kPa e 150 kPa. Inoltre, è stato dimostrato (dagli impulsi di pressione) che la presenza dei volumi, ad imitare i veicoli stradali, non ha avuto effetti significativi sulla deflagrazione grazie anche agli effetti della ventilazione che hanno ridotto sensibilmente il rischio. La simulazione del rilascio d'idrogeno attraverso una sorgente, come può essere la valvola di sicurezza del serbatoio, ha prodotto concentrazioni d'idrogeno molto magre che hanno creato impulsi di pressioni quasi irrilevanti.

Il seguente grafico mostra l'andamento dell'impulso di pressione e della sovrappressione associato all'esperimento nel caso la miscela idrogeno-aria sia al 20 % che al 30 %.

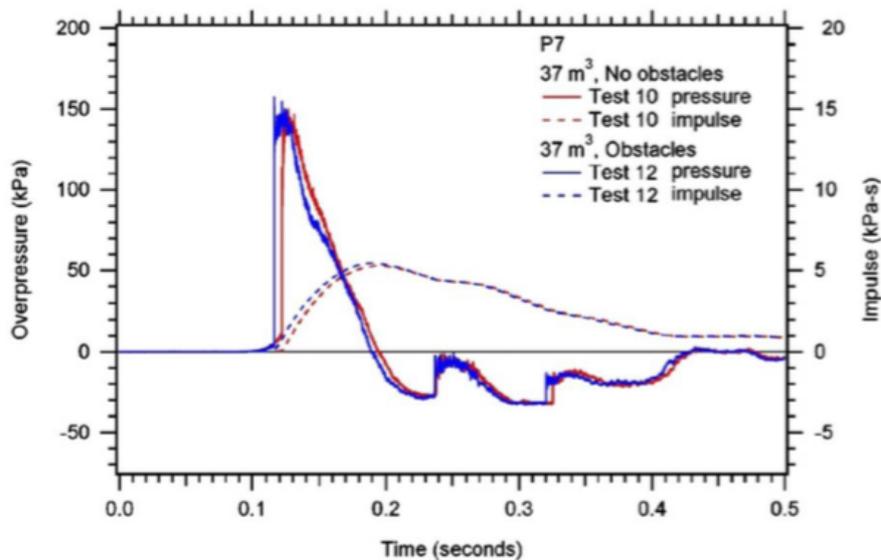


Figura 24: Grafico che mette in relazione le sovrappressioni nel tempo delle miscele aria-idrogeno in galleria.

Al fine di ricavare risultati più attendibili, gli autori consigliano di realizzare dei test non in scala, con veicoli più grandi, per approfondire meglio i possibili effetti di sovrappressione e di impulsi di pressione. Inoltre, gli autori spiegano come il ridimensionamento in scala del tunnel possa cambiare le sovrappressioni e quindi gli effetti sui veicoli dovrebbero ulteriormente essere studiati.

L'autore dello studio, Groethe, fa notare che la sezione trasversale del tunnel in scala possiede proporzioni maggiori rispetto ad una galleria reale, questo dettaglio potrebbe influenzare in modo significativo i risultati ottenuti in quanto i valori misurati potrebbero essere maggiorati. Questo problema è direttamente correlato al rapporto  $L/D$ , ossia alla lunghezza della galleria rispetto al diametro idraulico effettivo.

Infine, per poter confrontare i risultati con quelli presenti in letteratura, la posizione delle misurazioni della sovrappressione dovrebbe essere certa. Per supplire a questo problema ci si è avvalso dell'utilizzo di leggi di scala come quelle di: Hopkinson Blast Scaling e Sachs Blast Scaling; al fine di comprendere l'energia esplosiva totale. La legge di scala di Sachs afferma che pressione, tempo, impulso e altri parametri possono essere espressi come funzioni di questa distanza scalata, ma è necessario ipotizzare che l'aria si comporti come un gas perfetto e che gravità e viscosità siano trascurabili. Inoltre, gli effetti del confinamento, responsabili della velocità di fiamma turbolenta nel tubo di prova, potrebbero non trasferirsi nel caso in scala reale.

Un approfondimento di queste leggi di scala consentirebbe di migliorare i confronti tra studi diversi presenti in letteratura.

### 2.7.3.2 HyTunnel progetto per investigare l'uso di idrogeno per veicoli in gallerie stradali di S. Kumar, S. Miles, P. Adams, A. Kotchourko, D. Heldey, P. Middha, v. Molkov, A. teodorczyk e M. Zenner del 2009.

Il lavoro di Kumar e colleghi presso l'Health and Safety Laboratory ha valutato l'influenza della congestione e delle portate di ventilazione sulla sovrappressione prodotta dall'accensione di una nube stechiometrica d'idrogeno.

Gli esperimenti sono stati condotti in un dominio chiuso con una miscela stechiometrica idrogeno-aria e diversi volumi e configurazioni di congestione. Le differenti disposizioni di congestione consistevano in una diversa configurazione dei tubi, attraverso spaziature e orientamenti dissimili.

La disposizione A è la configurazione "stretta": composta da quattro tubi con distanze di tre diametri tra di essi, con file adiacenti orientate ad angolo retto e tubi sfalsati tra le fila.

La disposizione B è la configurazione "libera": composta da tre file di tubi con distanze di cinque diametri tra di essi, con file adiacenti orientate ad angolo retto e tubi sfalsati tra le fila.

Le immagini seguenti mostrano la strumentazione degli esperimenti di accensione. Il contenitore di sinistra mostra due moduli, tuttavia per gli esperimenti condotti sono stati utilizzati sei moduli (lunghezza 14.9 m e volume 93.1 m<sup>3</sup>). Nell'immagine di destra viene mostrato l'interno della configurazione "stretta".

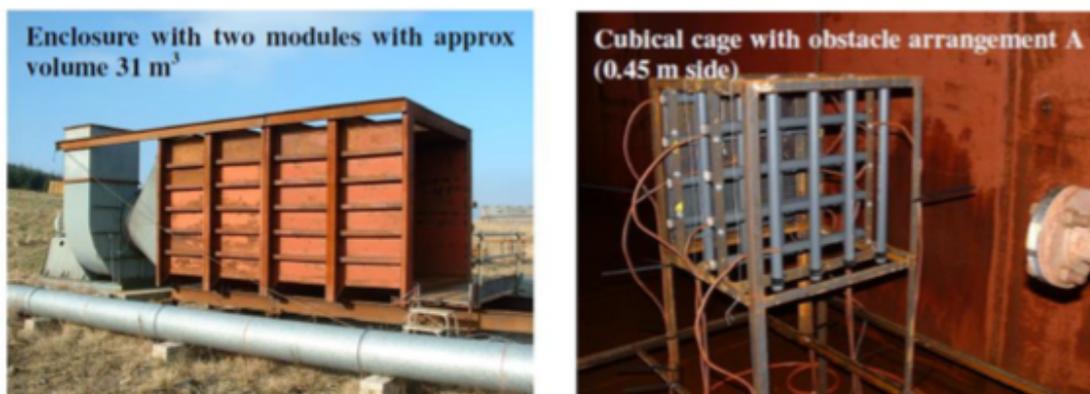


Figura 25: Struttura esterna ed interna del contenitore di prova, nello specifico due dei sei moduli utilizzati nella prova.

Le seguenti tabelle riassumono i risultati della campagna sperimentale di accensione. Dai test effettuati sull'accensione dell'idrogeno risulta un campo di pressione non uniforme. Inoltre, un aumento del volume della miscela idrogeno-aria ha determinato una crescita della sovrappressione massima si esplosione. Dalla seconda tabella si può affermare che un aumento iniziale del livello di congestione abbia causato una crescita delle sovrappressioni massime di esplosione (da nessuna alla configurazione B). Infine, un ulteriore aumento della congestione (dalla configurazione B alla configurazione A) ha comportato una riduzione della sovrappressione.

Tabella 24: Tabella che mostra le relazioni che intercorrono tra: tasso di rilascio, configurazione e sovrappressioni.

Tasso di Rilascio dell'H <sub>2</sub>	Velocità dell'Aria	Configurazione della Congestione	Sovrappressione del Trasduttore [mbar]		
			Parete dell'Involucro Sx	Centro dell'Involucro	Parete Dx dell'Involucro
1.5 g/s	1 m/s	A	28.2	124.2	63.5
		B	16.2	63.4	19.6
	2 m/s	A	13.6	66.6	12.6
		B	8.8	20.6	7.5
	4 m/s	A	12.1	39.5	10.5
		B	6	13.1	5
	1 m/s	A	32.4	123.3	55.4
		B	27.5	106	46.6
	2 m/s	A	23.2	117.7	39.6

2.0 g/s		B	25.7	66.3	46.6
	4 m/s	A	14.1	53.6	14.7
		B	39.4	25.4	28.9
4.0 g/s	1 m/s	A	48.9	255.8	71.2
		B	48.5	136.9	91.7
	2 m/s	A	37.3	222.5	66
		B	48.1	196.4	85.8
	4 m/s	A	26	160.4	39.2
		B	28.9	126.2	51.2

Tabella 25: Tabella che mette in relazione il volume congestionato, la configurazione e la sovrappressione.

Volume Congestionato	Configurazione della Congestione	Sovrappressione del Trasduttore [mbar]	
		Parete dell'Involucro Sx	Parete dell'Involucro Dx
0.098% del volume totale dell'involucro	Nessuna	28.2	24.7
	B	37.2	42
	A	27.4	24.2
0.55% del volume totale dell'involucro	Nessuna	Over-Range	85
	B	Over-Range	114.6

Inoltre, è stata eseguita una serie di esperimenti allo stato stazionario con varie velocità di rilascio dell'H<sub>2</sub> e di flusso di ventilazione, valutando anche l'influenza delle disposizioni di congestione A e B. La ventilazione nell'involucro è stata prodotta attraverso un ventilatore a velocità variabile che produce aspirazione attraverso una piastra terminale con 324 fori circolari per creare un flusso omogeneo. La prima tabella mostra i risultati degli esperimenti di accensione allo stato stazionario. I valori delle sovrappressioni massime dell'esplosione aumentano al crescere del tasso di rilascio dell'H<sub>2</sub> e al diminuire della velocità dell'aria di ventilazione. Le sovrappressioni di esplosione più elevate sono state osservate, con tassi di rilascio più bassi, per le configurazioni più congestionate. Tuttavia, ai tassi di perdita di idrogeno più elevati, le sovrappressioni di esplosione più elevate sono state riscontrate per la configurazione meno congestionata; eccetto per la velocità di ventilazione più bassa.

2.7.3.3 Esperimenti antincendio di una bisarca caricata con veicoli FCEV in un tunnel a grandezza naturale – Stima del HRR e del tasso di rilascio di fumi di M. Seike, Y. Ejiri, N. kawabata e H. Tanaka del 2014.

M. Seike e colleghi hanno condotto una serie di esperimenti d'incendio e simulazioni numeriche di una bisarca carica di veicoli FCEV in una galleria stradale a grandezza naturale.

La galleria sede dell'esperimento era lunga 80 m, larga 12.4 m e alta 7.36 m, con una sezione trasversale a ferro di cavallo.

L'HRR totale della bisarca carica di veicoli FCEV è stato determinato dalla variazione di temperatura ottenuta sperimentalmente vicino al fuoco.

L'HRR è stato stimato anche attraverso una simulazione numerica. L'HRR di ciascuna auto è stato calcolato e poi sommato per determinare l'HRR totale.

L'HRR totale della simulazione numerica è stato poi confrontato con i risultati sperimentali.

Come mostra il grafico sottostante, relativo ad un veicolo contenente 43.3 m<sup>3</sup> di idrogeno, il metodo numerico (Simulation) e i risultati sperimentali (Experiment) sono in buon parte sovrapponibili.

La metodologia sopra descritta è stata poi estesa per prevedere l'HRR di una bisarca caricata con otto veicoli FCEV ad idrogeno. L'esperimento ha stabilito che dopo un incendio di 10 minuti, l'HRR della bisarca carica di veicoli FCEV risultava 1.5 volte maggiore dell'HRR di un autobus ad uso passeggeri.

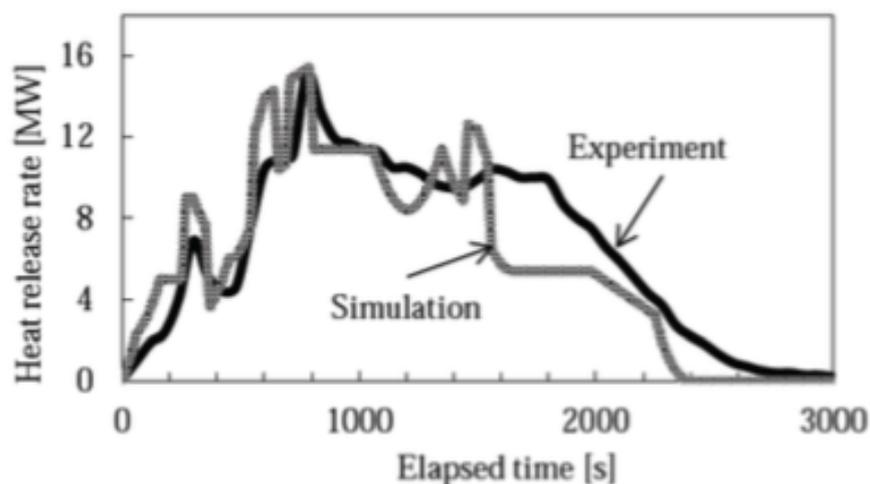


Figura 26: Curve HRR-Tempo ottenute dalla simulazione (Simulation) e dall'esperimento (Experiment) di un veicolo FCEV.

2.7.3.4 VCE da un innesco di una miscela di metano/idrogeno/aria in una zona confinata, M.Royle, L. Shirvill e T. Roberts, del 2007.

I test condotti da Rayle intendevano misurare la sovrappressione prodotta da miscele di metano e metano-idrogeno premiscelate all'interno di spazi confinanti.

Il dominio sperimentale aveva una dimensione di 3m x 3m x 2m, adiacente insiste un muro di calcestruzzo necessario per proteggere la sala di controllo. Il muro ha sensori di pressione a diverse quote. La parte esterna della griglia era ricoperta da una sottile pellicola di plastica da 23µm che conteneva la miscela di gas.

L'idrogeno gassoso è stato miscelato con l'aria per formare un rapporto stechiometrico di 1.2 che da letteratura produce le sovrappressioni più elevate. La sorgente d'accensione era situata ad un'altezza di 0.5 m dal suolo e posizionata al centro della griglia. Per l'innesco, un condensatore da 2.25 J, è stato scaricato attraverso uno spinterometro da 6 mm.

I valori di sovrappressione sono stati misurati da una serie di sensori a bassa e alta pressione. Tutti i sensori sono stati posizionati a 500 mm dal suolo ad eccezione dei sensori di pressione di campo lontano, che sono stati montati in posizioni più alte a causa della topografia del banco di prova.

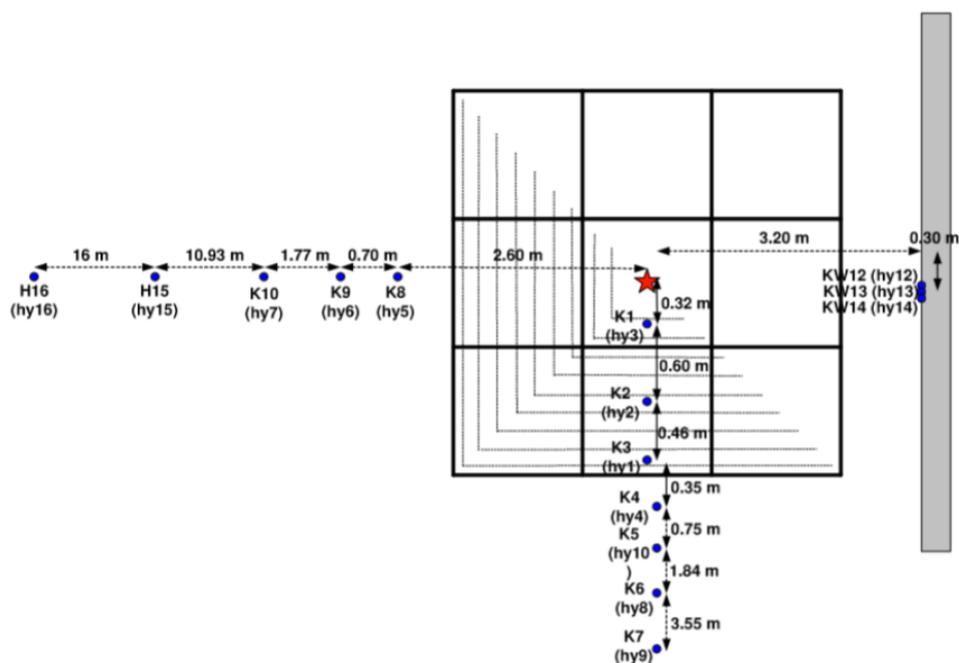


Figura 27: Schema di collocazione dei sensori di misura all'interno e all'esterno del dominio di prova.

Le pressioni sono state realizzate in un'ampia gamma di posizioni, incluso il muro adiacente. La tabella seguente mostra le condizioni iniziali prima dell'accensione. L'idrogeno puro è stato etichettato come NatHy\_01. Qui vengono riportati solo gli esiti degli esperimenti dell'idrogeno e non delle miscele metano-idrogeno.

Tabella 26: Valori significativi dell'idrogeno (NatHy\_01) misurati prima dell'accensione.

Misurazioni	Condizioni Test: NatHy_01	Misurazioni	Condizioni Test: NatHy_01
Idrogeno [Vol %]	100	Pressione Atm [kPa]	97.72
Numero di Strati	9	Concentrazione Media Ossigeno [%]	13.59
Volume Libero	17.207	Pressione Parziale Ossigeno [kPa]	0.1359

Temperatura Miscela Gas [°C]	11.0	Pressione Parziale Azoto [kPa]	0.5127
Umidità Relativa [%]	30.7	Pressione Parziale Gas Combustibile [kPa]	0.3474

È stato notato che durante l'esperimento l'umidità risultava incontrollata ma si presumeva che avesse un effetto minore sui valori di sovrappressione dell'esplosione.

I grafici seguenti mostrano i valori delle sovrappressioni misurati in vari punti per tutte le miscele, ricordiamo che a noi interessa l'NatHy\_01 corrispondente all'idrogeno gassoso in purezza, linea di colore viola. Le pressioni sono state riportate nelle regioni del campo vicino (all'interno e appena fuori della griglia) e lontano (più lontano della griglia).

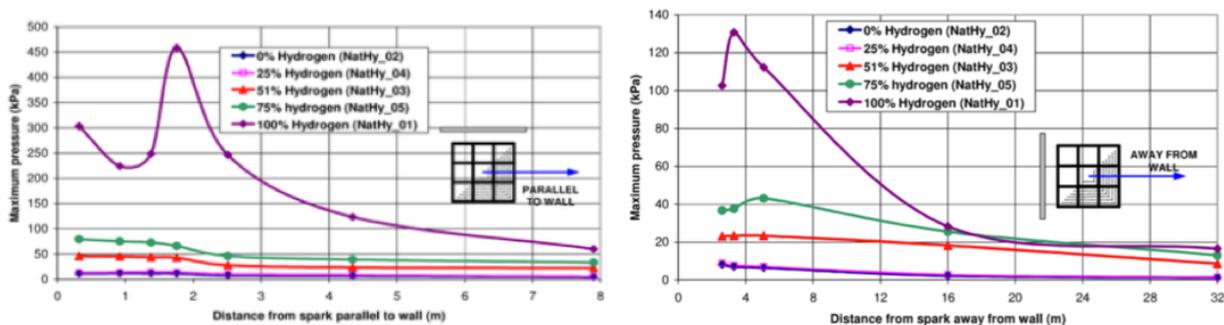


Figura 28: Grafici indicanti le sovrappressioni in relazione al punto di rilevazione per le diverse miscele, l'idrogeno in purezza corrisponde alla linea viola (NatHy\_01).

Nel campo vicino i valori di sovrappressione erano ben oltre 100 kPa, mentre rispetto alla distanza parallela al muro i valori misurati raggiungevano i 450 kPa.

Nel campo lontano, a 32 m di distanza, la sovrappressione misurata scendeva a valori minori di 20 kPa in direzione perpendicolare, invece in direzione parallela i valori erano poco superiori a 50 kPa. Ricordiamo che la soglia di 100 kPa corrisponde alla soglia di mortalità per gli effetti diretti dell'esplosione. Quindi, qualunque valore al di sopra di 200 kPa, relativo agli effetti diretti di un'esplosione, ha una probabilità di mortalità del 99%.

L'esperimento prevedeva l'accensione di una miscela idrogeno-aria premiscelata, in una zona confinata, di 18 m<sup>3</sup> con un alto livello di congestione: tali condizioni solo altamente improbabili da riscontrare congiuntamente durante un incidente con rilascio di idrogeno gassoso in una galleria reale, soprattutto perché devono avvenire simultaneamente.

### 2.7.3.5 Simulazione CFD del rischio di esplosione da idrogeno e gas naturale in galleria di P. Middha e O. Hansen del 2009.

Lo studio utilizza dei modelli CFD per supportare la valutazione dei rischi di esplosione per auto e autobus alimentati ad idrogeno nelle gallerie. L'obiettivo della modellazione era di prevedere un rischio quantitativo di esplosione dell'idrogeno in galleria. Il software utilizzato è stato FLACS. Lo studio ha svolto simulazioni per auto e autobus sia alimentate a CNG sia ad H<sub>2</sub>, ma in questa sezione si è modellato il rilascio dell'idrogeno per l'auto e l'autobus.

L'autobus era un modello urbano con otto bombole (due set da 4 bombole), ciascuna delle quali ospitava 5 kg di H<sub>2</sub>, per uno stoccaggio complessivo di 40 kg di idrogeno compresso a 350 bar. Il mezzo era rappresentato come un blocco rettangolare (12.0 m x 2.55 m x 2.9 m), con una distanza dalla sommità dei serbatoi di 3.1 m.

L'auto ad idrogeno compresso possedeva un serbatoio standard da 5 kg di a 700 bar di pressione di stoccaggio. L'auto era rappresentata come un semplice blocco rettangolare (5.0 m x 1.9 m x 1.5 m), situata a 0.3 m dal suolo.

Per quanto riguarda le gallerie, sono state considerate due diverse tipologie di sezione trasversale, una rettangolare ed una a ferro di cavallo. Entrambi i tunnel sono stati modellati con una lunghezza di 500 m.

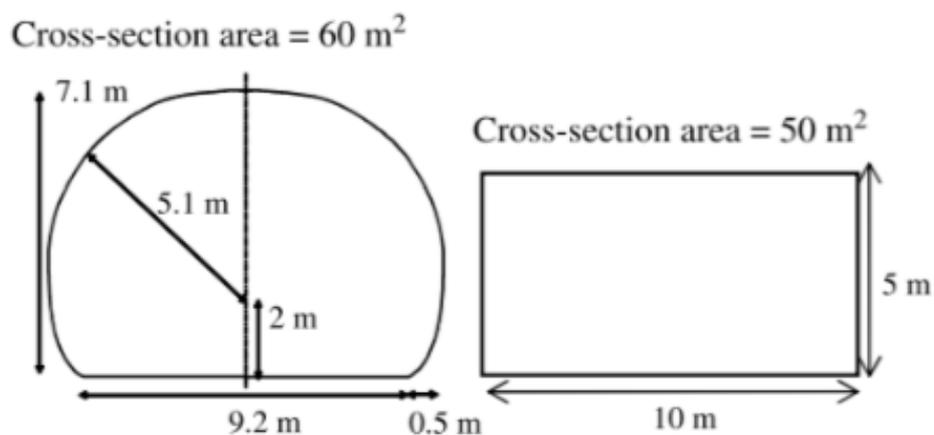


Figura 29: Sezione trasversale galleria: sezione a ferro di cavallo e sezione rettangolare.

Oltre alle dimensioni trasversali e longitudinali del tunnel, la modellazione includeva i veicoli. Entrambi i tunnel erano a doppia corsia, con il traffico in un'unica direzione. Si ipotizzava, inoltre, che il tunnel fosse pieno di auto e autobus distanziati uniformemente di 1.5 m l'uno dall'altro. La distribuzione dei veicoli era un modello ripetuto per tutta la lunghezza delle gallerie: 6 auto seguite da 1 autobus. Lo stesso modello geometrico è stato utilizzato sia per il rilascio dell'auto che per quello

dell'autobus. Si presumeva che i rilasci avessero un flusso strozzato. La portata massima dell'idrogeno per flusso parzializzato è stata calcolata a 350 bar (linea viola) e a 700 bar (linea verde) con un coefficiente di scarico di 0.8 e un'apertura di 4 mm.

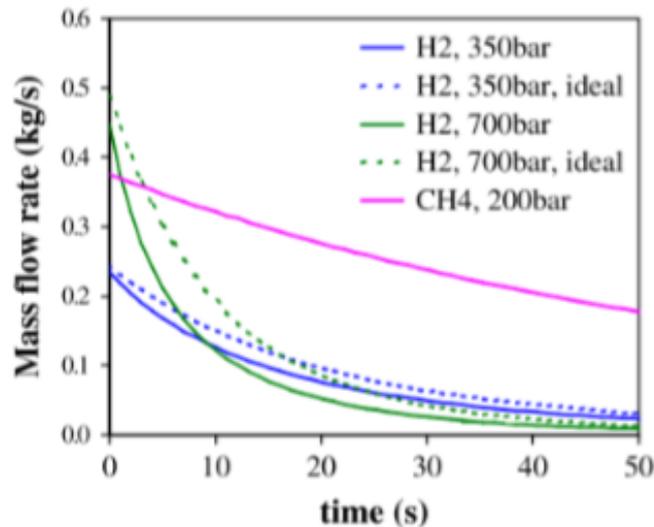


Figura 30: Grafico che mette in relazione la portata di Idrogeno a differenti pressioni (Blu e Verde) con il tempo di rilascio.

I punti di accensione sono stati variati dal centro della nube di vapore ai bordi esterni, per quanto riguarda la lunghezza del tunnel. Anche le velocità di ventilazione sono state fatte variare tra i modelli. È stato realizzato un modello di dispersione che simula il rilascio dei sistemi di alimentazione.

La tabella sottostante elenca la dimensione massima della nuvola di gas infiammabile per ciascuna configurazione, nonché la nuvola stechiometrica equivalente o la nuvola quiescente Q9 (è una nuvola di gas stechiometrica più piccola in scala che rappresenta lo stesso carico di esplosione della nuvola più grande non omogenea, la scala avviene in base al volume infiammabile e alla velocità di combustione laminare).

Tabella 27: Tabella riassuntiva contenente per ciascuna configurazione indagata: dimensione massima della nuvola di gas infiammabile e la nuvola stechiometrica equivalente (o nuvola quiescente).

Caratteristiche Veicolo/Rilascio	Inventario [kg]	Dimensione Max della Nuvola di Gas Infiammabile in m <sup>3</sup> [kg]		Dimensione Equivalente Stechiometrica della Nuvola di Gas Infiammabile in m <sup>3</sup> [kg]		Max Pressione per Nuvola Equivalente Stechiometrica Q9 Quiescente/Pre Accensione Turbolenta	
		Tunnel Ferro di Cavallo	Tunnel Rett.	Tunnel Ferro di Cavallo	Tunnel Rett.	Tunnel Ferro di Cavallo	Tunnel Rett.
Car LH <sub>2</sub>	10	1.4 [0.007]	1.8 [0.009]	0.02 [0.003]	0.02 [0.004]	0.0	<0.05/0.1
Car H <sub>2</sub> gas 700 bar (Ventilazione Alta)	5	281 [1.14]	273 [1.21]	4.42 [0.07]	4.31 [0.09]	4.4	0.05/0.10
Car H <sub>2</sub> gas 700 bar (Ventilazione Bassa)	5	268 [1.33]	308 [1.39]	17.75 [0.29]	8.77 [0.18]	17.8	0.11/0.34

<b>Bus H<sub>2</sub> 350 bar</b>	5	213 [0.89]	190 [0.81]	2.16 [0.04]	1.94 [0.04]	2.2	0.05/0.10
<b>Bus H<sub>2</sub> 350 bar</b>	20	1795 [7.46]	3037 [13.97]	27.46 [0.45]	24.67 [0.49]	27.5	0.11/0.34

Dalle simulazioni accoppiate di dispersione e combustione si prevedeva che i valori di sovrappressione in galleria possano produrre danni minori a persone e cose.

I dati riportati nella tabella precedente sono stati combinati per creare una curva di frequenza di superamento per le sovrappressioni durante la combustione di nubi di vapore d'idrogeno gassoso.

Osservando il grafico emerge che i valori più bassi delle sovrappressioni, al di fuori dell'intervallo pericoloso (meno di 0.1 barg), risultano molto più probabili delle sovrappressioni più elevate, potenzialmente letali per gli occupanti del tunnel. Queste deduzioni costituiscono informazioni importanti per il tecnico chiamato ad eseguire un'analisi dei rischi in una galleria stradale frequentata da veicoli ad idrogeno compresso.

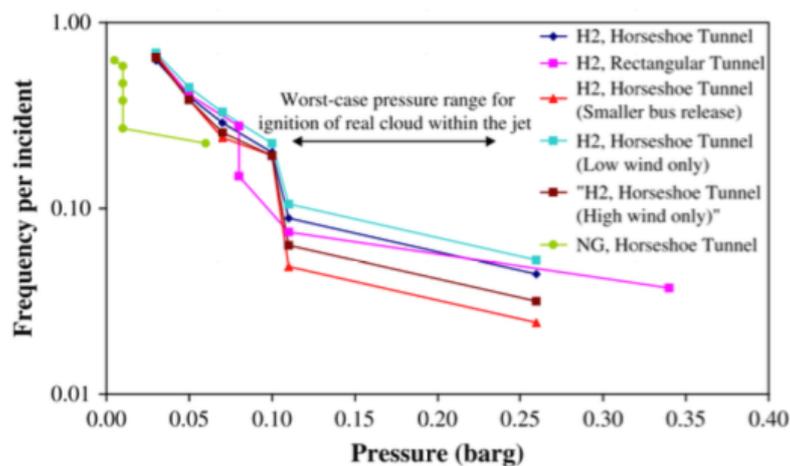


Figura 31: Curve di frequenza di superamento delle sovrappressioni durante la combustione di nubi di vapore di idrogeno.

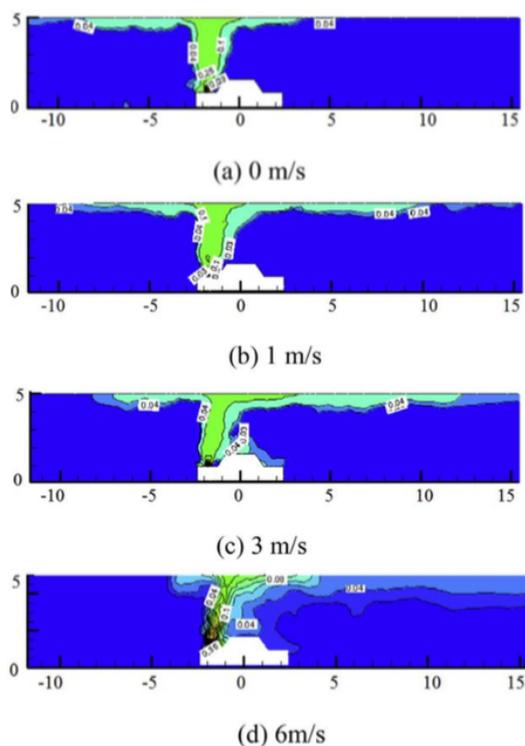
### 2.7.3.6 Analisi di simulazione sul rischio di rilasci di idrogeno e combustione nei tunnel sottomarini di H. Bie e Z. Hao del 2013.

Bie e Hao hanno utilizzato la modellazione della turbolenza per valutare gli eventi di rilascio di idrogeno da veicoli in gallerie sottomarine. Questo studio si è concentrato nel valutare le condizioni variabili di ventilazione del tunnel e le dimensioni delle nuvole d'idrogeno risultanti, nonché il ritardo nel tempo d'innescio. È stato utilizzato il modello di turbolenza di Navier-Stokes per indagare il rilascio d'idrogeno e i fenomeni di combustione in relazione al rischio nelle gallerie stradali

sottomarine. Il tunnel reale preso come esempio per questa modellazione è stato il Quingdao jiaozhou Bay Tunnel nella provincia cinese dello Shandong. Il modello del tunnel misurava 500 m x 13.5 m x 5 m. Un veicolo FCEV ad idrogeno di medie dimensioni è stato modellato ospitante 4.955 kg di H<sub>2</sub> a 70 MPa.

Le condizioni di ventilazione sono state monitorate in cinque punti di rilevazione, distanziati ad intervalli orizzontali di 5 metri, e variavano da 0- 1- 3 e 6 m/s.

Le figure di seguito mostrano le concentrazioni d'idrogeno dopo 3 secondi dall'inizio del rilascio del TPRD con variabili condizioni di ventilazione. Come si può notare la velocità di ventilazione ha avuto un'influenza dominante sulla distribuzione dell'idrogeno. Rispetto alla direzione dominante della ventilazione, i punti di monitoraggio a monte hanno mostrato concentrazioni d'idrogeno meno pericolose rispetto a quelli a valle.



*Figura 32: Influenza della ventilazione nell'allontanare i rilasci provenienti dalla TPRD. Nello specifico il caso d'innesci dopo 3.1 secondi. Si noti come una elevata velocità di ventilazione possa favorire l'arrivo "sicuro" dei soccorritori da monte.*

I grafici seguenti mostrano l'andamento della sovrappressione per le diverse condizioni di ventilazione con tempi d'innesci di 3.1 s e 6.1 s.

Nel tunnel ci sono quattro punti di monitoraggio che misurano le sovrappressioni: P1 è disposto a 5 m dal punto di perdita lungo la direzione del traffico, P2 è disposto a 10 m dal punto di perdita

lungo la direzione del traffico, P3 è disposto a 5 m dal punto di perdita lungo la direzione inversa del traffico e P4 è disposto a 10 m dal punto di perdita lungo la direzione inversa del traffico. P1 e P2 sono a valle, mentre P3 e P4 sono a monte.

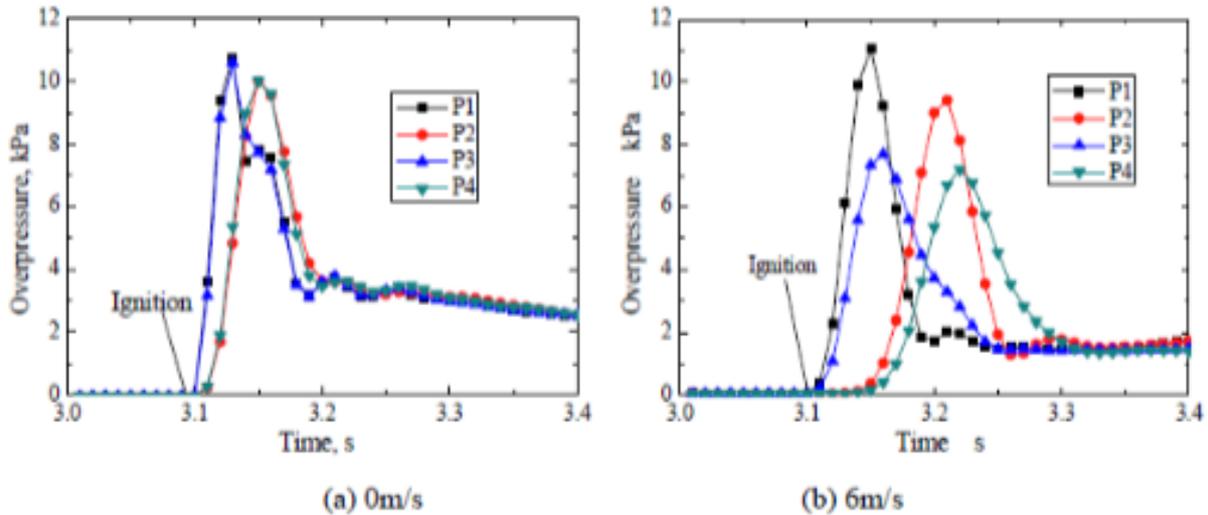


Figura 33: Grafico rappresentante l'andamento delle sovrapressioni innescate a 3.1 s a 0 m/s e 6 m/s di ventilazione.

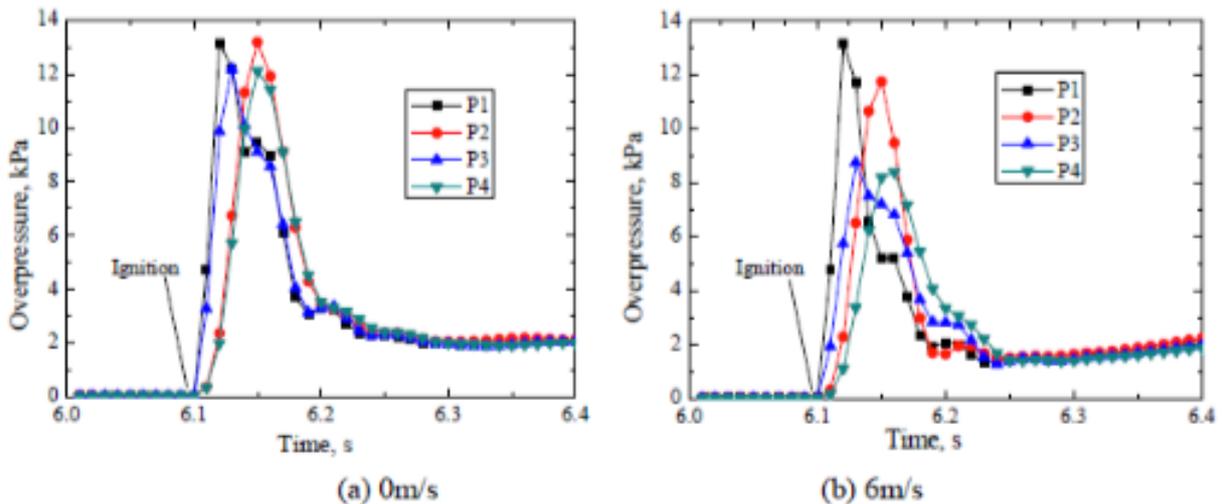


Figura 34: Grafico rappresentante l'andamento delle sovrapressioni innescate a 6.2 s a 0 m/s e a 6 m/s di ventilazione.

Il confronto tra le sovrapressioni, al variare del tempo d'innescò, mostra che i picchi per le posizioni a monte (P3 e P4) sono notevolmente ridotti con velocità di ventilazione elevate: nel caso di tempi d'innescò di 3.1 s i picchi di sovrapressione passano da 10-12 kPa a 7.5-8 kPa con una ventilazione di 6 m/s; nel caso di tempi d'innescò di 6.1 s i picchi di sovrapressione passano da 12-13 kPa a 8-9 kPa con una ventilazione di 6 m/s.

Solo il punto di rilevazione P2 a valle mostra una ridotta riduzione della sovrappressione misurata confrontando i casi con o senza ventilazione.

### 2.7.3.7 Problemi e Limiti degli scenari d'incendio dell'idrogeno

Dalle ricerche svolte sono emersi diversi studi che valutano le modalità di guasto e le conseguenze associate ai veicoli elettrici a celle a combustibile ad idrogeno (FCEV) nelle gallerie stradali.

Sono stati condotti numerosi studi che hanno esaminato l'andamento delle sovrappressioni derivanti dall'accensione ritardata dell'idrogeno, le curve HRR-tempo, i rilasci d'idrogeno e gli effetti dei Jet-Fire.

Diverse indagini hanno valutato l'influenza della ventilazione, in particolare sulle sovrappressioni, affermando che all'aumentare della ventilazione in galleria le sovrappressioni diminuiscono d'intensità. Tuttavia alcune simulazioni CFD affermano che le condizioni restano più o meno le stesse, riducendo così il teorico beneficio apportato dalla ventilazione.

Tra gli scenari di gusto più diffusi, responsabili di un eventuale rilascio di gas naturale in galleria, meritano menzione: l'impatto con altri veicoli, un guasto alla valvola di sicurezza (TPRD), degrado della struttura (scarsa manutenzione alle bombole o al sistema di alimentazione) e l'immane errore umano.

Una grande differenza negli scenari finali è rappresentata dal tipo d'innescò (immediato o ritardato) capace di variare il tipo e la gravità dello scenario, per esempio possiamo passare da un Jet-Fire in caso di innescò immediato ad un Bleve in caso d'innescò successivo.

Le misurazioni più diffuse per stimare le conseguenze delle modalità di guasto sono: l'intensità delle sovrappressioni, le curve HRR-tempo, il tipo di dispersione. Queste conseguenze sono però influenzate dalle variabili tipiche presenti in galleria: tipo ed intensità di ventilazione, confinamenti, ostacoli, geometria della galleria, etc.

In caso di rilascio sono state realizzate delle matrici di rischio, in funzione della concentrazione e della quota della perdita, capaci di prevedere i diversi scenari incluse le deflagrazioni, le detonazioni e i DDT.

Gli articoli e i report presenti in letteratura, che indagano i rischi relativi ad incidenti in galleria di veicoli FCEV, sono piuttosto variegati e completi, nonostante questo esistono delle lacune relative ad aspetti importanti come:

- Un'analisi puntuale delle temperature e degli effetti termici sulle strutture murarie della galleria;

- Gli effetti della ventilazione: gran parte della sperimentazione sugli inneschi spontanei è stata condotta in ambiente esterno, quindi sarebbe necessario effettuare i test in una galleria di prova per confermare i risultati;
- Comportamento specifico dell'incendio ad idrogeno: la potenza associata a questa tipologia d'incendio dovrebbe essere correlata a tutti i tipi di veicoli FCEV presenti sul mercato (auto, bus, camion, etc);
- Effetto esplosivo (Deflagrazione/Detonazione): occorrerebbe indagare a seconda del tipo e della classe del veicolo FCEV, gli effetti sulle strutture murarie e sugli impianti della galleria;
- L'effetto delle sovrapressioni sulla sicurezza delle persone all'interno del tunnel in caso di evento incidentale;
- La quantità di idrogeno che può accumularsi in galleria a causa del confinamento e definire quindi i valori di soglia per determinarne la quantità "sicura";

L'obiettivo a cui tende il legislatore, e di conseguenza anche le case costruttrici di mezzi FCEV, è che i veicoli ad idrogeno che entrano in un ambiente sotterraneo e confinato presentino e mantengano lo stesso livello di rischio dei veicoli a combustibili fossili.

## **2.7.4 Scenari di incendio delle batterie**

La recente diffusione di veicoli a trazione parzialmente o totalmente elettrica ha iniziato a sollevare interrogativi tra i legislatori riguardo alle misure da adottare per garantire la sicurezza antincendio.

I veicoli dotati di batteria agli ioni di litio possono generare emissioni inquinanti molto diverse da quelle dei veicoli tradizionali in caso di incendio. Questo problema diventa particolarmente critico quando tali incendi si verificano in ambienti confinati, come le gallerie stradali o i parcheggi sotterranei.

Attualmente, ci sono pochissime ricerche scientifiche su queste problematiche, principalmente a causa della recente introduzione della tecnologia, che limita la diffusione e la probabilità di accadimento di eventi incidentali.

Tuttavia, paesi con una vasta rete stradale in galleria, come quelli caratterizzati un'orografia particolarmente montuosa, come la Scandinavia o l'arco alpino, devono condurre studi preventivi su tali fenomeni per prevenire potenziali scenari catastrofici.

#### 2.7.4.1 Minimizzazione del rischio di incendio di veicoli elettrici in infrastrutture sotterranee di L.D. Mellert, M. Tuchschnid, M. Hermann, M. Tesson del 2018.

Questo studio mostra che gravi danni al pacco batterie dei veicoli elettrici possono portare immediatamente ad incendi incontrollabili con un tasso di rilascio energetico e di fumi molto elevato. L'esperimento è stato condotto in una galleria in scala 1:1 e ha studiato gli effetti che una batteria agli ioni di litio, montata in un veicolo totalmente elettrico omologato per il traffico, può scatenare se sottoposta a test di gusto. Un limite di questo studio è l'assenza di crash test tra veicoli, come eventi incidentali iniziatori, e la conseguente analisi sulla probabilità dei danni.

Poiché le potenziali cause di incendi di veicoli elettrici, nelle gallerie stradali, sono da ricercare tra danni meccanici e danni termici, lo studio si è concentrato sull'indagine di quattro diversi scenari, ciascuno dei quali considerato nel suo caso più conservativo:

1. Penetrazione del pacco batterie con cunei in acciaio;
2. Impatto da corpo contundente sul vano batterie;
3. Foratura tramite proiettile del modulo batterie;
4. Stress termico, tramite incendio imposto, del pacco batterie;

Lo studio afferma che i rischi d'incendio dei veicoli elettrici sono paragonabili a quelli dei veicoli convenzionali. Tuttavia, nelle immediate vicinanze e in situazioni di ventilazione particolarmente sfavorevoli gli incendi di natura elettrica possono causare pericoli chimici nuovi e potenzialmente più gravi. Le analisi indicano concentrazioni critiche di metalli pesanti come cobalto, litio e manganese sotto forma di aerosol e quindi più facilmente inspirabili. Concentrazioni così elevate di questi inquinanti non si verificano negli incendi di auto tradizionali, ed inoltre risultano tossiche sia per l'ambiente e sia per i soccorritori chiamati ad estinguere l'incendio. Dal punto vista della strumentazione tecnica, si presume che l'attrezzatura operativa di cui sono fornite le gallerie stradali sia più che sufficiente per far fronte ai nuovi rischi apportati dalla tecnologia elettrica.

Nel complesso, l'aumento della mobilità elettrica non porterà ad una riduzione della sicurezza nelle gallerie stradali, ma farà variare la gestione della sicurezza antincendio rendendo necessaria una formazione specifica soprattutto nei confronti dei soccorritori, come i vigili del fuoco.

A causa della loro elevata reattività, le batterie agli ioni di litio tendono a sviluppare una fuga termica se danneggiate termicamente, meccanicamente o elettricamente. La batteria si riscalda ad un tasso molto rapido ( $> 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) che attraverso processi chimico/fisici mette in azione grandi rilasci di energia sotto forma di perdite e sfiati di gas. L'obiettivo principale dell'esperimento era studiare questi effetti sulle batterie agli ioni di litio in un ambiente confinato come una galleria stradale.

I moduli batteria utilizzati per l'esperimento erano batterie agli ioni di litio di un EV nuovo e completamente carico (>95%):

Tabella 28: Caratteristiche fisico-chimiche delle celle e dell'elettrolita utilizzati nell'esperimento.

Caratteristiche	Descrizione	
Numero di celle	96 celle divise in 8 moduli	
Materiali degli elettrodi attivi	Anodo: Grafite	Catodo: LiNiMnCoO <sub>2</sub>
Elettrolita	Litio Hexafluorofosfene (LiPF <sub>6</sub> )	
Energia	33.182 / 27.2 KWh	
Energia specifica	0.14 / 0.12 KWh/Kg	
Temperatura galleria	Circa 210 °C	

Un incendio che coinvolge EV, a parte i gas di combustione tradizionali come CO e CO<sub>2</sub>, forma nuovi gas inquinanti altamente tossici. I valori degli inquinanti e degli aerosol sono stati misurati nella galleria di prova (160 m di lunghezza) ad una quota di 1.5 m di altezza. Inoltre, attraverso telecamere termiche sono state registrate le caratteristiche termiche e visive degli incendi provocati dalle batterie. L'esperimento è stato condotto presso le strutture di prova di VeruchsStollen Hagerbach AG (VHS) che offrono un ambiente reale e sicuro per grandi prove d'incendio per quanto riguarda i sistemi di galleria stradale. Il sito di prova ha una sezione trasversale variabile: 56 m<sup>2</sup> nella zona di test e 43m<sup>2</sup> nel sito di misurazione.

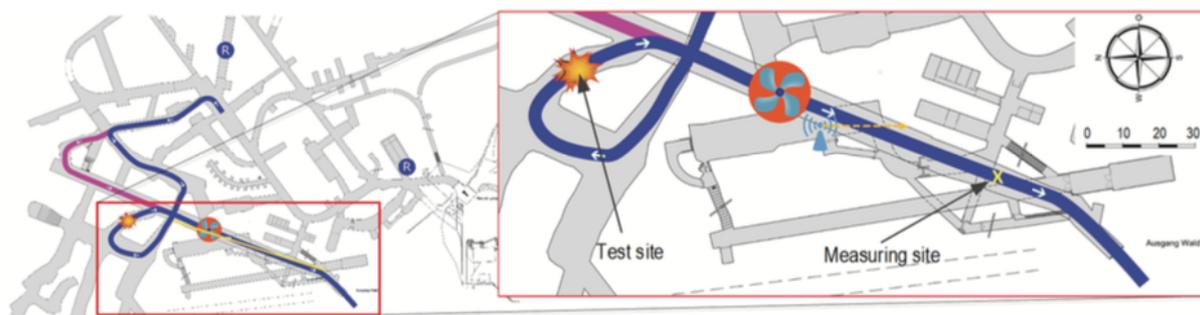


Figura 35: Planimetria della galleria di prova utilizzata per i test.

L'area di prova è stata costantemente ventilata durante l'intero esperimento sia per ragioni di sicurezza e misurazione, sia per imitare le condizioni di ventilazione presenti su una reale galleria stradale. In tal modo le misurazioni delle concentrazioni di inquinanti e delle velocità di flusso nella sezione di ventilazione principale sono state determinate in modo affidabile ed univoco.

Per monitorare il flusso d'aria fresca e prevenire la diluizione mediante l'aggiunta di aria fresca dopo il sito di prova, il bypass rosa al condotto di ventilazione principale blu è stato chiuso con un cancello per tutta la durata dei test.

La ventola si trovava a valle della zona di test, posizionata al centro della galleria e forniva un flusso d'aria omogeneo e costante con una velocità media di 1.0 – 1.5 m/s.

Gli scenari d'incendio nelle gallerie stradali che coinvolgono EV sono da imputare a due ragioni prevalenti: danni meccanici (incidenti, impatto di oggetti, etc) e stress termico delle batterie (incendio di una galleria stradale, incendio stesso dell'EV, etc).

Sono stati utilizzati questi scenari principali come fondamenta dell'esperimento. Si è proceduto a danneggiare quattro moduli identici in modo diverso portando comunque le batterie a subire una fuga termica. Lo scopo delle 4 tipologie di rottura nel test era quella di ottenere il massimo danno ai moduli batteria così da garantire la conseguente fuga termica, senza indagare la causa esatta del danno e la sua probabilità di accadimento.

Le forze richieste per il danno meccanico dei moduli batteria sono state generate con metodi esplosivi, senza però far esplodere le batterie stesse. A seconda del tipo di test è stata montata una carica esplosiva sufficiente per l'accelerazione in direzione del modulo batteria o attraverso un proiettile penetrante. Le quantità ideali di esplosivo erano state preliminarmente determinate con test specifici.

I quattro scenari d'incendio indagati in galleria sono stati:

1. Penetrazione del pacco batterie con cunei in acciaio: la detonazione di alcune cariche esplosive ha accelerato una piastra di acciaio in direzione del modulo batteria. Come conseguenza i cunei del lato inferiore sono penetrati uniformemente nelle due fila di celle del modulo, dove sono rimasti ed hanno causato cortocircuiti elettrici.
2. Impatto da corpo contundente sul vano batterie: la detonazione di cariche esplosive ha accelerato una piastra in acciaio in direzione del modulo batteria. Il modulo ha subito, quindi, un brusco impatto sull'intera sua superficie, cosicché tutte le celle al suo interno sono risultate danneggiate strutturalmente anche senza la penetrazione.
3. Foratura tramite proiettile del modulo batterie: il modulo batteria è stato centrato da un proiettile esplosivo (EFP) da una distanza di 10 cm. Di conseguenza, entrambe le file di celle sono risultate danneggiate da una penetrazione continua.
4. Stress termico, tramite incendio imposto, del pacco batterie: il modulo batteria è stato sottoposto al fuoco uniforme di gas propano fintanto che il modulo ha preso fuoco. All'avvio della fuga termica è stato rimosso il fuoco a propano e si è osservata la fuga termica della batteria.

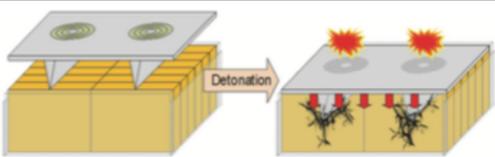
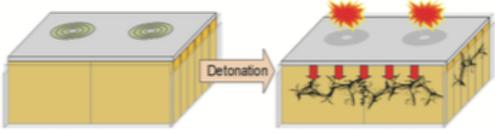
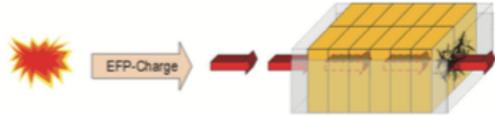
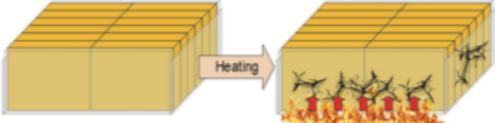
#	Scenario	Illustration
1	<b>Wedge-shaped penetration:</b> Detonation of explosive charges accelerated a steel plate in the direction of the battery module. As a result, the wedges on the underside penetrated evenly into the two cell rows of the battery module, where they remained and caused electrical short-circuits.	
2	<b>Blunt impact:</b> Detonation of explosive charges accelerated a steel plate in the direction of the battery module. The module thus suffered a blunt impact over its entire surface so that all cells were structurally damaged without penetration.	
3	<b>Central puncturing:</b> Battery module was shot at centrally with an explosively formed projectile (EFP) from a distance of 10 cm. As a result, both cell rows were to be damaged with a continuous penetration of all 12 cells.	
4	<b>Thermal stress:</b> Battery module was evenly underfired with a propane gas fire until the module caught fire. The fire source was then removed and the thermal runaway of the battery observed.	

Figura 36: Illustrazioni dei quattro scenari di danno del pacco batteria LIB soggetti al test.

I test sono stati effettuati nel tunnel di prova di Hagerbach secondo gli scenari sopra descritti. Le misurazioni sono iniziate nel momento della comparsa del danneggiamento e sono state terminate dopo che i moduli batteria avevano reagito completamente.

I risultati sono riassunti nella seguente tabella attraverso valori medi della durata dei test.

Tabella 29: Elementi tossici misurati durante i quattro test.

Parametri	Test 1 "Wedge"	Test 2 "Plate"	Test 3 "Puncture"	Test 4 "Fire"
PH <sub>3</sub> [g]	<0.4	---	<0.4	---
F <sup>-</sup> as HF [g]	1.1	3.1	<1	<0.5
PO <sub>4</sub> -P as H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> [g]	<1.5	<1.5	11.3	<1
Co [g]	457	567	190	364
Li [g]	107	124	42	92
Mn [g]	445	536	184	349
F <sup>-</sup> Aerosol [g]	152	160	68	126
NO [g]	<1	1.1	<1	1.5
NO <sub>2</sub> [g]	<1	<1	<1	<1
CO [g]	76	181	97	141
CO <sub>2</sub> [g]	8500	6000	2000	7800
TVOC [g]	20	196	93	32
Σ Aromate [g]	1.6	8.6	3.2	3.1
Benzene [g]	1.1	3	1.6	1.7
Toluene [g]	0.2	1.1	0.5	0.4
Xylene [g]	0.1	0.6	0.3	0.2
Styrene [g]	0.1	3.0	0.5	0.6
<b>Duration</b>	16 min	21 min	16 min	26 min

All'inizio di tutti gli scenari, i moduli batteria danneggiati emettevano grandi quantità di fumo nero e molto denso. Le emissioni sono salite direttamente sulla volta del tunnel, stabilizzandosi poi in strati stabili dove grazie alla ventola la turbolenza ha stratificato gli strati di fumo. Infine, al crescere dei processi di combustione si sono gradualmente ridotte le emissioni di fumo in tutti gli scenari.

Oltre ai tipici gas di combustione, come CO e CO<sub>2</sub>, sono stati rilevati altri inquinanti “nuovi”, non usualmente presenti negli incendi di veicoli ICE.

Le misurazioni, riportate nella sovrastante tabella, indicano la presenza di quantità aumentate di metalli pesanti tossici: cobalto, manganese e litio (aerosol legati alla polvere).

È stato osservato che la causa del danno (4 scenari) non influenza significativamente le quantità di inquinanti rilasciate: nel caso peggiore l'intero potenziale chimico a disposizione della batteria è stato rilasciato.

Contrariamente alle aspettative non sono state trovate quantità rilevanti di HF (Acido Fluoridrico).

Non tutti gli scenari si sono comportati allo stesso modo: quelli legati ad un danno meccanico hanno portato a fughe termiche quasi simultanee di tutte le celle, mentre quello legato a stress termico non ha comportato un'azione uniforme all'interno del modulo. In quest'ultimo scenario si potrebbe osservare una reazione a catena distinta da una cella all'altra vista la durata maggiore (26 min).

Alla fine del test i moduli avevano esaurito la tensione a disposizione. Così è stato dimostrato che gravi danni meccanici e termici alle batterie di un EV, portano istantaneamente a ad incendi incontrollati con rilasci ad alti tassi energetici.

I risultati derivanti dalla sperimentazione illustrano che le batterie degli EV non portano ad un aggravamento, ma ad un cambiamento dei rischi nelle gallerie stradali.

Dai test è emerso che i rischi di natura termica tra un EV e un ICE in un incendio in galleria stradale non sembrano cambiare. Durante le osservazioni non è stato riscontrato nessun fenomeno esplosivo o di altra natura che si differenziasse in modo significativo dagli incendi convenzionali dei veicoli ICE. Le misurazioni mostrano il raggiungimento di temperature molto elevate, fino a 750°C all'interno delle batterie, ma ad una distanza di 2 m non sono stati registrati aumenti di temperatura significativi. Inoltre, non è stato possibile fare una dichiarazione affidabile sulla velocità di rilascio del calore (HRR) dell'incendio di batterie sulla base delle misurazioni effettuate. Le temperature osservate, maggiori di 700 °C, durante gli esperimenti suggeriscono che le batterie agli ioni di litio sono fonti di fuoco estremamente ricche di energia e che un incendio scaturito dalle batterie si diffonderà rapidamente a tutte le parti del veicolo. Al verificarsi dell'incendio completo del mezzo

elettrico le sue caratteristiche termiche non si differenzieranno da quelle di un incendio di un veicolo ICE.

#### 2.7.4.2 Prove antincendio con veicoli elettrici a batterie agli ioni di litio nelle gallerie stradali P.Sturm, P.Fobleitner, D. Fruhwirt, R.Gallec, R. Wenighofer, S.F. Heindl, S. Krausbar, O.Heger del 2022.

L'Austria, con la sua topografia montuosa, presenta un notevole interesse verso gli incidenti che generano incendio nei tunnel stradali. Con 175 gallerie e ulteriori sviluppi in corso, il paese affronta una serie di sfide in materia di sicurezza. L'aumento delle tecnologie di propulsione alternative, come i veicoli elettrici a batteria, sta modificando la natura dei rischi stradali. La crescente diffusione di tali veicoli richiede un'attenzione specifica ai rischi di incidenti significativi, inclusi quelli legati agli incendi in galleria.

Le batterie agli ioni di litio, comuni nelle moderne tecnologie di accumulo di energia, presentano comportamenti di combustione e rischi diversi rispetto alle fonti di energia convenzionali, soprattutto in ambienti chiusi come i tunnel. Mentre le ricerche su singole celle batteriche sono state ampie, i test su larga scala su veicoli elettrici rimangono limitati e spesso confinati ai laboratori di prova.

Per affrontare queste sfide, è stato avviato il progetto BRAFA per investigare il comportamento degli incendi dei veicoli elettrici e i loro effetti sulla sicurezza dei tunnel. Il progetto coinvolge diverse istituzioni e si propone di esaminare vari aspetti: delle emergenze da incendio, compresi i metodi di spegnimento, l'impatto sull'infrastruttura del tunnel e la valutazione complessiva del rischio.

Le indagini sperimentali comprendono test di fuoco su celle e moduli batteria, nonché sui veicoli stessi, con particolare attenzione alle tecniche di spegnimento. I dati raccolti vengono, quindi, utilizzati per calibrare modelli di simulazione e condurre analisi del rischio. Tuttavia, il progetto deve bilanciare obiettivi diversi, come lo studio del comportamento del fuoco e le strategie di spegnimento, trovando un compromesso tra le esigenze delle diverse parti coinvolte.

Gli esperimenti di test antincendio sono stati condotti presso la struttura di ricerca del tunnel Zentrum am Berg. Questa struttura comprende due gallerie autostradali e due ferroviarie, ciascuna lunga circa 400 metri, oltre a un tunnel di prova di 1000 metri con una sezione trasversale ridotta di circa 25 m<sup>2</sup>. La struttura fornisce una varietà di configurazioni per testare le risposte al fuoco. Mentre un'autostrada e un tunnel ferroviario sono stati completati con tutte le attrezzature necessarie, altri tubi presentano solo il rivestimento in "shot-crete", ossia in calcestruzzo proiettato. Tutte le corsie del tunnel sono asfaltate. A seconda delle fonti di fuoco e delle dimensioni del fuoco, sono state utilizzate diverse configurazioni di prova.



Figura 37: Tunnel di prova dei test

Durante lo studio dei moduli della batteria, sono stati esaminati diversi aspetti, tra cui le modalità di innescamento dell'incendio, il comportamento di combustione e le tecniche di misurazione dei gas e delle particelle. È emerso che il metodo più efficace per causare una fuga termica è l'uso di un fuoco esterno per coinvolgere le batterie. Altri metodi di innescamento, come sovraccarico e penetrazione delle celle, non erano praticabili nell'ambiente di prova. È stata osservata una netta differenza nel comportamento di combustione tra le batterie NMC (Nichel-Manganese-Cobalto) e LFP (Litio-ferro-fosfato), con le prime più suscettibili agli incendi e influenzate dallo stato di carica. Le celle NMC hanno causato un incendio di circa 30 minuti, mentre quelle LFP hanno bruciato per oltre 3 ore, con una fuga termica che è iniziata dopo 40 minuti di esposizione al calore esterno.

La maggior parte dei test antincendio con veicoli elettrici sono stati condotti in laboratori di prova antincendio, caratterizzati da bassa velocità di ventilazione e strutture chiuse. Sebbene questo approccio consenta misurazioni precise dei parametri critici, come le emissioni di gas e il rilascio di calore, non permette di esaminare le caratteristiche specifiche dei tunnel, come il comportamento del fumo e i profili di temperatura, con tassi di ventilazione realistici. Nel progetto BRAFA, i test sono stati condotti in un tunnel su vasta scala con condizioni di ventilazione realistiche per creare situazioni di tunnel più realistiche. Tuttavia, questo approccio ha comportato alcuni svantaggi nella misurazione delle concentrazioni di gas e nel rilascio di calore, poiché le misurazioni dei profili dovevano essere effettuate in vari punti della sezione trasversale del tunnel anziché in un unico punto.

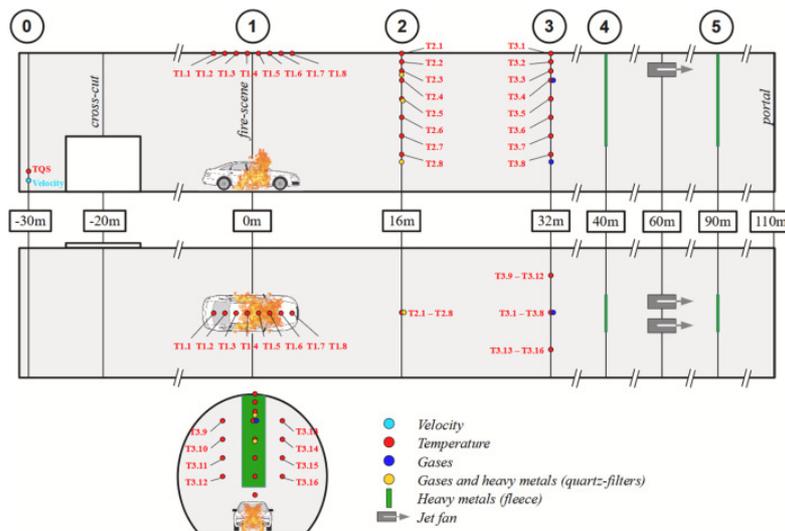


Figura 38: Set-up di prova per gli incendi dei veicoli

Le misurazioni durante gli esperimenti comprendevano la temperatura, monitorata tramite sensori di tipo K, classe 1, e la concentrazione di gas ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$ ), misurata con analizzatori Horiba. Il  $\text{CO}$  è stato monitorato anche con un analizzatore IR ABB Uras 26. Gli acidi fluoridrico, cloridrico e fosforico sono stati rilevati tramite pile di filtri con filtri al quarzo, così come i metalli pesanti. Tutte le misurazioni, ad eccezione di quelle online per i gas, sono state mediate nel tempo per ottenere materiale sufficiente per le analisi. La velocità dell'aria è stata misurata prima dell'incendio con un misuratore ultrasonico DURAG D-FL.

La velocità di rilascio del calore è stata determinata osservando l'entalpia del flusso di massa a monte e a valle dell'incendio. Tuttavia, la stima della portata dell'entalpia a valle è stata influenzata dai profili di temperatura e velocità dell'aria non uniformi, il che ha reso necessario un aggiustamento basato sulla conservazione della massa. Questo metodo ha limitazioni e i risultati devono essere considerati indicativi. Altri approcci, come il calcolo basato sull'esaurimento dell' $\text{O}_2$ , non erano applicabili a causa dei livelli di ventilazione nel tunnel. Ulteriori dettagli sull'impostazione delle misurazioni e sulle apparecchiature utilizzate sono disponibili nell'archivio dati e nella relazione finale del progetto.

Tabella 30: Panoramica dei veicoli testati e HRR stimato

Prova	Veicolo (anno modello)	Tipo di batteria/carburante	Capacità	Fonte di accensione
BV01	BEV, auto compatta (2020)	NMC	80 kWh	Fuga termica innescata dall'iniezione di NaClaq liquido
BV02	BEV, furgone di utilità (2016)	LMO	24 kWh	Brucciatori a gas sotto la piastra del pavimento

BV03	ICEV, (2020)	SUV	Diesel	sconosciuto	Il fuoco parte dall'interno in fiamme
BV04	ICEV, di (2010)	furgone utilità	Diesel	50 l	Avviamento di fuoco dal vano motore (equivalente a BEV 02)
BV05	BEV, (2020)	SUV	NMC	80 kWh	Inizio del fuoco dall'interno, attivazione esterna della fuga termica dopo 10 minuti di incendio del veicolo mediante iniezione di NaClaq nella custodia della batteria (veicolo equivalente a BEV 03)

I test antincendio su larga scala hanno coinvolto cinque diversi veicoli, come indicato nella Tabella 1. I test BV01, BV03 e BV05 hanno utilizzato veicoli compatti e SUV, sia a propulsione elettrica che a motore a combustione interna. I furgoni impiegati nei test BV02 e BV04 erano simili, con la differenza nell'unità di propulsione. Questa varietà di veicoli è stata scelta per soddisfare diversi interessi di ricerca dei vigili del fuoco e dei ricercatori, garantendo un programma di test che coprisse diverse situazioni di incendio. Le fonti di accensione e i siti di origine del fuoco sono stati variati tra i test, con il BV01 che ha utilizzato una soluzione salina per causare un cortocircuito interno nel pacco batteria, mentre per altri test sono stati utilizzati bruciatori a propano per accendere sedili interni o vani motore. Questa diversità ha arricchito le conoscenze sugli incendi dei veicoli, anche se ha reso più complesso il confronto diretto tra i test.

I vigili del fuoco hanno indagato diverse strategie di estinzione degli incendi dei veicoli elettrici a batteria. Oltre all'uso tradizionale di acqua per raffreddare il veicolo e controllare la temperatura, sono stati esaminati approcci alternativi come l'impiego di coperte antincendio per ridurre il rilascio di calore e l'utilizzo di lance per iniettare acqua direttamente nell'involucro della batteria. Per garantire uno scenario realistico, i vigili del fuoco hanno atteso 10 minuti prima di intervenire, corrispondente al tempo impiegato dai soccorritori per arrivare sul luogo dell'incidente.

Inoltre, oltre alle misurazioni di gas e temperatura, sono state esaminate anche le contaminazioni dell'acqua di scarico e delle pareti del tunnel. Dopo il test, l'acqua della fognatura è stata analizzata per rilevare gli inquinanti, mentre sono stati raccolti i campioni di contaminanti dalle pareti del tunnel tramite tessuto non tessuto, per valutare la presenza di metalli pesanti e composti organici.

Gli studi condotti da Golubkov et al. hanno evidenziato l'effetto del livello di carica delle celle agli ioni di litio sul rilascio termico. È emerso che era necessaria una carica minima per innescare la fuga termica: a carica completa, un surriscaldamento di 140 °C ha generato un riscaldamento significativo, mentre a celle completamente scariche, il surriscaldamento fino a 250 °C non ha causato la fuga. Questi risultati sono stati confermati da Larsen et al., infatti una maggiore carica corrisponde a un rilascio energetico più rapido. I test full-scale condotti da Lecocq et al. e Willstrand et al. su veicoli

ICEV e BEV hanno rivelato che, nonostante le caratteristiche di combustione simili, i BEV hanno avuto un tasso di rilascio termico massimo superiore, compreso tra 1,0 e 1,5 MW rispetto agli ICEV. Queste differenze, come dimostrato dai test di Willstrand et al., sono principalmente dovute allo sviluppo del fuoco all'interno del veicolo.

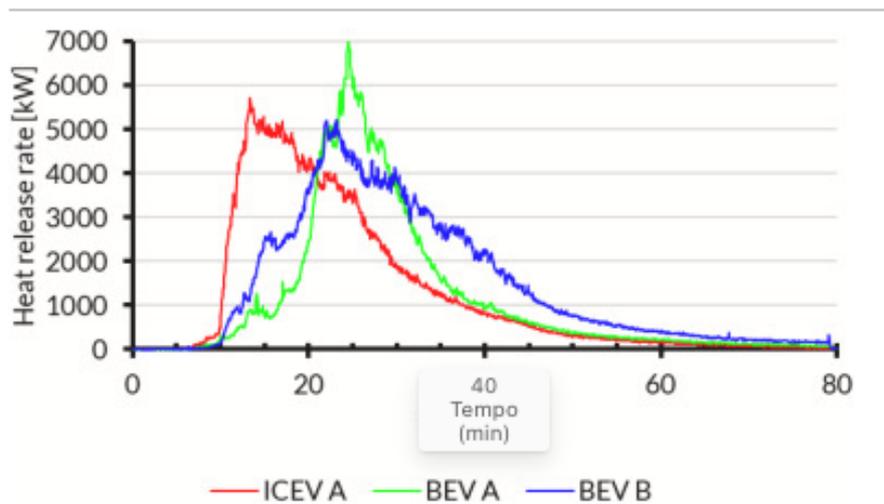


Figura 39: HRR di un'auto convenzionale ICEV (rosso) e BEV (verde e blu)

I test BRAFA, eseguiti in un tunnel su larga scala con ventilazione meccanica, hanno mostrato situazioni in tunnel reali con flussi d'aria variabili. Nonostante la ventilazione a valle, con un flusso d'aria di 52-104 m<sup>3</sup>/s, fosse inferiore alle velocità standard, i risultati hanno dimostrato un rapido aumento dell'HRR quando è stata innescata la fuga termica nella batteria del BEV, con una rapida crescita della temperatura interna. Tuttavia, l'introduzione dell'acqua direttamente nell'involucro della batteria ha provocato un repentino calo della temperatura, evidenziando l'efficacia delle strategie di estinzione.

Nel caso dei test su veicoli a batteria (BEV), l'analisi ha rivelato picchi nel tasso di rilascio del calore (HRR) significativamente superiori rispetto ai veicoli a combustione interna (ICEV). Mentre nel caso degli ICEV l'HRR massimo non ha superato i 5 MW, per i BEV è stato registrato un picco da 9-10 MW. Occorre notare che l'accensione esterna di più celle della batteria ha causato un aumento estremamente rapido dell'HRR, mostrando il potenziale di un incendio BEV quando la batteria è coinvolta. Tuttavia, è stato osservato che anche dopo più di 10 minuti dall'inizio dell'incendio, la batteria non era ancora coinvolta e la temperatura interna era sotto i 50°C, indicando un miglioramento significativo nel raffreddamento delle batterie dei moderni BEV.

Un SUV BEV del 2020 con batteria da 80 kWh (BV05) è stato testato accendendo il fuoco nel vano posteriore. Dopo un breve periodo, il fuoco ha raggiunto un picco di HRR di circa 4-5 MW, accelerato dallo scoppio del lunotto posteriore che ha fornito maggiore aria. Successivamente, un cortocircuito esterno della batteria ha aumentato l'HRR di circa 3 MW. Tuttavia, va detto che l'inizio di una fuga termica che colpisce quasi tutte le celle contemporaneamente non è ragionevolmente prevedibile nella realtà.

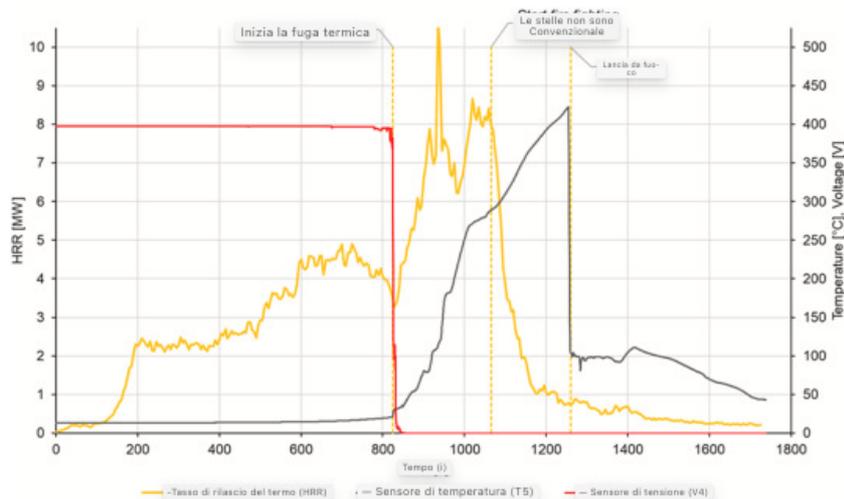


Figura 40: HRR, tensione e temperatura in batterie da 80 kWh

La tabella 19 contiene i valori calcolati per l'HRR massimo e medio, nonché quelli per il contenuto energetico del fuoco. Come già accennato in precedenza, i valori sono soggetti a un grado relativamente alto di incertezza a causa delle incertezze nel calcolo del flusso di entalpia a valle del sito dell'incendio.

Tabella 31: HRR massimo e medio dei singoli test

Test n.	HRR [MW]	max	HRR [MW]	avg	Contenuto energetico [MJ]	Osservazioni
BV01 (BEV)	7,0	3.5	2893			Prova di estinzione con coperta antincendio dopo 500 s
BV02 (BEV)	6.1	3.4	n/a			Brevi periodi con perdita di dati di misurazione
BV03 (ICEV)	4.9	2.5	3792			Quantità esatta di carburante sconosciuta
BV04 (ICEV)	2.3	1.5	1540			Utility van, spazio di carico completamente vuoto (equivalente al veicolo BV02)
BV05 (BEV)	4.9/8.6*	3/5*	4454			Accensione della batteria dopo 10 minuti; * solo auto/auto + batteria

### 2.7.4.3 Problemi e Limiti degli scenari di incendio di batterie

Gli incendi dei veicoli elettrici (EV) comportano rischi chimici significativi dovuti alla decomposizione esotermica delle batterie agli ioni di litio, che rilasciano gas altamente reattivi. Tuttavia, su larga scala, si può presumere che il rischio chimico a cui gli utenti della galleria sono potenzialmente soggetti diminuirà con l'aumentare della distanza dall'incendio: i sistemi di ventilazione e i flussi d'aria fresca provenienti dall'esterno diluiscono le concentrazioni di gas inquinanti, rendendole così meno pericolose per la salute umana.

In conseguenza ai risultati sperimentali sembrano non essere necessari adattamenti tecnici alle gallerie stradali soggette al traffico di EV, questo perché nella maggior parte dei paesi sviluppati, come la Svizzera, l'Italia, la Francia, la Norvegia, le gallerie stradali sono progettate per grandi incendi (30 MW) con notevoli emissioni di gas inquinanti. Si presume, quindi, che gli incendi di EV possano essere adeguatamente gestiti mediante l'attrezzatura tecnica di sicurezza esistente in gallerie stradali all'avanguardia.

L'acqua resta il miglior refrigerante per gli incendi delle batterie agli ioni di litio, anche se non estingue completamente il fuoco. Sarà quindi essenziale un'adeguata fornitura d'acqua per il controllo dell'incendio. Tuttavia, l'acqua contaminata con sostanze nocive come l'acido fluoridrico rappresenta un rischio aggiuntivo se non viene gestita correttamente.

Durante un incendio, le batterie danneggiate possono emettere sostanze nocive e riaccendersi. Attualmente non ci sono procedure uniformi per gestire questi rischi, ma alcuni nuovi metodi esplosivi potrebbero essere utilizzati per neutralizzare le batterie danneggiate sul posto.

Ulteriori test sono necessari per comprendere meglio i fenomeni legati agli incendi dei veicoli elettrici nelle gallerie stradali, incluso l'effetto della composizione delle batterie, la velocità di propagazione delle fiamme e i parametri di deflagrazione. È importante anche valutare il comportamento di diverse classi di veicoli EV e sviluppare procedure per la gestione dei rischi associati agli incendi delle batterie.

# Capitolo 3 Incendi in galleria e sistema di gestione della sicurezza

Nel seguente capitolo si introducono le problematiche di un incendio in galleria e i sistemi di gestione della sicurezza come la prevenzione incendio, vie di esodo, etc...

## 3.1 Incendi in galleria

Appena un'automobilista pensa ad un incidente in galleria, gli balenano le immagini dei grandi disastri del passato, caratterizzati da scenari apocalittici, incendi la cui estinzione necessitava di giorni e giorni, ed un numero di morti da far accapponare la pelle. Nonostante questo passato infausto, oggi l'uso e la diffusione delle gallerie è in forte ascesa grazie alle decisamente migliorate condizioni di sicurezza che questi straordinari collegamenti possono offrire.

La maggior parte degli incidenti nei tunnel sono però eventi relativamente piccoli che possono potenzialmente trasformarsi, grazie al confinamento dello spazio, in eventi più gravi a seconda dei parametri che influenzano l'evento stesso.

Ad oggi esistono pratiche diversa da paese a paese nel registrare quale evento sia definibile e registrabile come incendio in galleria. Per motivi di semplificazione riportiamo la definizione di incendio di PIARC, ossia il Permanent International Association of road Congresses.

Secondo la definizione PIARC è da considerarsi un incendio: “un evento anormale e non pianificato (inclusi gli incidenti) che influisce negativamente sulle operazioni ordinarie e sulla sicurezza della galleria”.

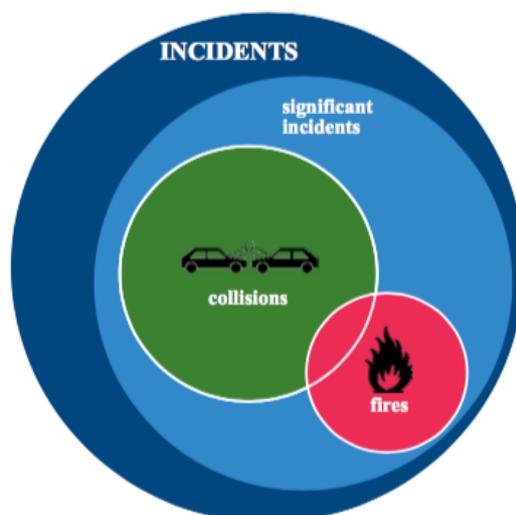


Figura 41: Illustrazione che mostra il rapporto tra: incidente, incidente rilevante, collisione e fuoco. PIARC

Esistono anche pratiche diverse su come vengono rilevati gli incendi e sulla registrazione o meno delle cause. La dimensione del fuoco spesso non viene stimata e neppure registrata, quindi in molti casi la dimensione del fuoco deve essere stimata sulla base di indicatori statistici e/o tabellari.

Le diverse pratiche nella raccolta dei dati possono essere spiegate da diversi fattori, come le diverse ubicazioni delle gallerie (urbane o rurali), la densità del traffico, il livello variabile di monitoraggio dovuto alla lunghezza del tunnel, etc.

Per una migliore comprensione della frequenza e della magnitudo degli incendi nei tunnel potrebbe e dovrebbe essere necessario analizzare gli eventi che hanno portato all'incendio attraverso il carico d'incendio, la velocità di rilascio del calore, la durata e lo sviluppo dell'incendio ed eventualmente anche le cause scatenanti e le relative conseguenze.

Fattori chiave relativi alla caratterizzazione degli incidenti in galleria:

- 1 Sviluppo del fuoco (Velocità):
  - a. Sviluppo lento con fumo;
  - b. Sviluppo rapido;
  - c. Sviluppo ultra-rapido o esplosivo;
- 2 Dimensioni del fuoco:
  - a. Sviluppato;
  - b. Completamente sviluppato;
  - c. Non completamente sviluppato;
- 3 Cause dell'incendio:
  - a. Collisione;
  - b. Difetto nel veicolo che causa l'incendio (motore surriscaldato, rotture, etc);

La velocità di sviluppo dell'incendio e le dimensioni dell'incendio sono di notevole importanza per la sicurezza in galleria. Tali fattori sono influenzati dalla natura del carico d'incendio, dalle caratteristiche tecniche dei veicoli coinvolti, dal flusso d'aria nella galleria durante lo sviluppo dell'incendio e dalla progettazione tecnica della sicurezza antincendio della galleria.

La velocità massima di rilascio di calore di un incendio dipende dalla quantità e dal tipo di materiale del carico d'incendio, nonché dalle condizioni di fornitura dell'ossigeno, dalle caratteristiche del tunnel e dalla risposta dei sistemi, etc.

Occorre distinguere tra due tipi di incendi in galleria: innescati da una collisione o da un difetto del veicolo. I primi derivano da un difetto del veicolo tipicamente sono innescati dal motore, dal sistema

di scarico o dal sistema frenante. Questi incendi hanno uno sviluppo lento nella prima fase. Questo tipo di sviluppo aumenta le possibilità di estinguere l'incendio o di ritardarlo mediante l'uso di estintori manuali, sistemi fissi antincendio e squadre di soccorso ausiliarie di pronto intervento prima che il principio d'incendio possa minacciare la salute e la sicurezza delle persone e delle cose in galleria.

I secondi sono causati da collisioni, i quali sono spesso accelerati da carburante fuoriuscito a seguito del tamponamento e quindi il loro sviluppo risulta tipicamente più veloce.

Dal punto di vista della sicurezza antincendio, gli incidenti di auto adibite al trasporto di persone sono raramente un problema (5-8 MW), mentre i camion pesanti con il relativo carico costituiscono un rischio d'incendio ben maggiore (100-200 MW) a causa dei tassi di rilascio del calore decisamente più elevati.

Il rischio d'incendio dei veicoli alimentati a combustibili alternativi, in base a quanto trattato dalla letteratura di settore, sembra attestarsi a livelli equiparabili a quello dei veicoli tradizionali.

Nella maggior parte dei tunnel la sola ventilazione, naturale o meccanica, garantisce un grado di diluizione dei gas in caso di rilascio e dei fumi in caso d'incendio, sufficiente ad impedire che eventuali incendi di piccoli autoveicoli diventino problematici per l'intera struttura.

## 3.2 Sistemi di Prevenzione in Galleria

Di seguito si riportano i sistemi di prevenzione usati nelle gallerie stradali.

### 3.2.1 Illuminazione

Nella maggior parte delle gallerie, la penetrazione naturale della luce non assicura condizioni soddisfacenti di visibilità per gli utenti. Risulta, quindi, necessario installare un'illuminazione artificiale che garantisca condizioni soddisfacenti di visibilità e confort per gli automobilisti.

In termini di funzionalità, il sistema d'illuminazione deve fornire:

- Un'illuminazione normale tale da assicurare un'adeguata visibilità per gli utenti, sia di giorno che di notte;
- Un'illuminazione ausiliaria che garantisca una visibilità minima agli utenti, così da consentire loro di lasciare la galleria in caso di mancanza dell'alimentazione elettrica.

Un sistema d'illuminazione deve essere progettato tenendo conto di diversi criteri:

- Livello di luminosità e illuminazione della pavimentazione;
- Livello di luminosità e illuminazione delle pareti laterali e delle colonne;
- Valori d'uniformità per i diversi regimi operativi;
- Valori di riverbero;

Esistono in commercio diversi tipi di sistemi d'illuminazione, ma i più comuni sono:

- L'illuminazione simmetrica;
- L'illuminazione controcorrente;

in base poi alle caratteristiche della galleria e agli obiettivi definiti dall'ente gestore e dalla normativa, i sistemi d'illuminazione possono essere installati in una o più linee, sopra la strada, in sommità alle pareti, etc.

Dal punto di vista normativo i sistemi d'illuminazione in gallerie sono affrontati all'interno della norma UNI 11095:2021 intitolata "luce e illuminazione – illuminazione delle gallerie stradali" elaborata dalle commissioni tecniche luce e Illuminazione ed Illuminazione gallerie.

Tale norma trova applicazione per gli impianti d'illuminazione di gallerie stradali ed autostradali indipendentemente dalla loro forma e lunghezza, tuttavia non ci si occupa degli aspetti relativi all'illuminazione di evacuazione, aspetto regolamentato dalla UNI EN 16276:2013 "illuminazione di evacuazione nelle gallerie stradali di lunghezza maggiore di 500 m".

La UNI 11095:2021 specifica i requisiti illuminotecnici dell'impianto d'illuminazione al fine di assicurare al conducente di un veicolo, sia di giorno che di notte, l'entrata, l'attraversamento e l'uscita dal tratto coperto a velocità pari alla velocità massima legalmente consentita in quel tratto, ed in condizioni adeguate di confort visivo, con un grado di sicurezza non inferiore a quello della strada di cui fa parte la galleria.

Per le gallerie e i sottopassi l'illuminazione deve essere presente per l'intera durata del servizio, quindi sia durante la notte e sia durante il giorno, dato che per le gallerie con lunghezza maggiore di 500 m l'illuminazione naturale, proveniente dalle due imboccature della galleria, risulta insufficiente per permettere un buon grado di visibilità agli automobilisti.

Per la rete viaria Italiana esiste il D.M. 14 settembre 2005 "Norme d'illuminazione per le gallerie stradali" che regola le varie tipologie d'illuminazione.

Il decreto al suo interno distingue le seguenti tipologie d'illuminazione:

- Illuminazione ordinaria: è rappresentata dall'illuminazione permanente e da quella di rinforzo;
- Illuminazione d'emergenza: è costituita dall'illuminazione della galleria in condizioni di interruzione di erogazione dell'energia elettrica ed è in grado di garantire un livello minimo di luminanza di 1 cd/mq sull'intera galleria per un tempo minimo di 30 minuti. L'emergenza deve essere segnalata agli utenti della galleria tramite l'indicazione "galleria non illuminata";
- Illuminazione di sicurezza: è costituita dall'illuminazione delle vie di fuga;



*Figura 42: Tratto di galleria illuminato in sommità da illuminazione a led. Il sole 24 ore*

### 3.2.1.1 Illuminazione ordinaria

L'illuminazione ordinaria è costituita dall'illuminazione permanente e dall'illuminazione di rinforzo in conformità a quanto previsto dalla sopra citata UNI 11095:2021.

Nei tratti d'imbocco della galleria devono essere previste delle zone di rinforzo (zone d'entrata e di transizione) in cui la luminanza varia secondo la curva delle luminanze di adattamento così da favorire il passaggio agli utenti dall'ambiente esterno a quello interno.

L'illuminazione delle zone d'entrata e di transizione della galleria deve essere correlata con la luminanza di velo esterna, qualora la regolazione del livello d'illuminazione sia discontinua.

Il sensore di luminanza di velo deve essere installato in posizione quanto più prossima alla distanza di arresto dalla sezione d'ingresso, compatibilmente con i vincoli esistenti nel tratto di strada interessato.

Attraverso l'ausilio dei regolatori di flusso si potranno ridurre le luminanze di un livello, per poi passare a quello successivo spegnendo le lampade relative ad un circuito di rinforzo. Si deve pertanto variare con continuità e a gradini il livello di luminanza in galleria sino ad arrivare al valore di luminanza della zona interna, rispettando i valori di uniformità globale e longitudinale previsti dalla norma. La variazione a gradini verrà effettuata attraverso l'ausilio di teleruttori comandati da segnali provenienti dai moduli di controllo dei regolatori di flusso. Tali regolatori di flusso dovranno essere privi di parti in movimento.

Le indicazioni suddette relative alle zone di rinforzo dovranno essere estese ad entrambi gli imbocchi. I cavi alimentanti l'impianto d'illuminazione devono essere collocati per quanto possibile in sede protetta, se si dovessero usare canaline esterne queste dovrebbero essere in acciaio inox. I cavi inoltre devono essere conformi alle norme CEI relative alla non propagazione dell'incendio e a bassissima emissione di gas tossici nocivi e corrosivi.

Data l'utilizzo continuativo delle lampade dell'impianto d'illuminazione, esse devono essere ad alta efficienza luminosa nell'ottica di consentire un elevato risparmio energetico. I corpi illuminanti devono essere collocati in due file di armature, ciascuna sopra una corsia di marcia.

Le cassette di derivazione per l'alimentazione dei corpi illuminanti ordinari devono avere un grado di protezione non inferiore a IP 65 e grado di resistenza agli urti IK07.

### 3.2.1.2 Illuminazione di emergenza

L'illuminazione d'emergenza deve garantire nelle zone interne e nelle piazzole di sosta una luminanza non inferiore a 1 cd/m<sup>2</sup>.

Dal punto di vista delle caratteristiche tecniche dei corpi illuminanti d'emergenza, esse risultano le stesse dell'illuminazione ordinaria.

L'illuminazione d'emergenza, nelle gallerie di lunghezza superiore ai 500 metri, deve essere alimentata da un gruppo elettrogeno, comune magari ad altri impianti (ventilazione, impianti antincendio, etc) con un'autonomia di almeno 24 ore. Inoltre, dovrà essere prevista un'illuminazione di continuità (UPS) assoluta dedicata che possa sostenere l'impianto per almeno 30 minuti.

Nelle gallerie di lunghezza inferiore ai 500 metri, l'illuminazione d'emergenza deve essere alimentata mediante un sistema di continuità UPS con un'autonomia di almeno 30 minuti.

In tutte le tipologie di galleria il pannello variabile situato all'ingresso deve arrecare indicazioni agli automobilisti dello stato di malfunzionamento dell'impianto d'illuminazione.

Le cassette di derivazione per l'alimentazione dei corpi illuminanti d'emergenza devono avere un grado di protezione non inferiore a IP 65 e grado di resistenza agli urti IK07. Le cassette devono essere certificate per garantire una funzionalità, in caso d'incendio, almeno di 90 minuti a 850 °C.

### 3.2.1.3 Illuminazione di sicurezza

L'illuminazione di sicurezza deve permettere la messa in sicurezza degli utenti della galleria attraverso i rifugi, le vie di fuga e le porte d'emergenza, ovvero permettere l'individuazione da parte degli utenti e degli addetti al soccorso delle dotazioni di sicurezza antincendio e delle stazioni d'emergenza.

In generale, in fase di progetto e realizzazione della galleria, dovrà essere previsto un elemento luminoso a led su entrambi i lati del tunnel, con la duplice funzione di illuminare il camminamento in prossimità della barriera stessa e di segnalare il verso di percorrenza della galleria in caso d'emergenza.

A tale scopo l'ente gestore della galleria dovrà usare le tipologie d'illuminazione previste dalla norma: barriera direttiva a LED e corpo illuminante a LED per montaggio a paramento.

L'illuminazione di sicurezza deve essere in grado di garantire:

- Indicazioni chiare e non ambigue delle vie di fuga, garantendo anche la guida fisica e luminosa del corpo illuminante;
- Illuminazione delle vie di fuga;
- Individuazione delle dotazioni di sicurezza al servizio degli utenti;

Facilitare l'individuazione del verso di percorrenza, in allontanamento dal luogo d'incendio;

### 3.2.2 Ventilazione

Secondo l'associazione mondiale della strada (PIARC) la ventilazione nelle gallerie ha due funzioni:

- Un funzionamento normale che garantisce una sufficiente qualità dell'aria in galleria, attraverso la diluizione degli inquinanti;
- Un funzionamento in caso d'incendio che serve a rendere l'ambiente il più sicuro possibile attraverso un adeguato controllo del flusso dei fumi per l'evacuazione degli utenti e per i servizi di soccorso e salvataggio;

Il primo motivo per installare dei sistemi di ventilazione nelle gallerie è stata la riduzione dei livelli d'inquinanti. In alcuni casi, la ventilazione naturale dovuta all'effetto pistone dei veicoli in movimento può essere sufficiente a soddisfare i requisiti di qualità dell'aria durante il normale funzionamento. La necessità di un sistema di ventilazione meccanica viene valutato alla luce della lunghezza della galleria, del tipo e dalle condizioni del traffico (bidirezionale o monodirezionale, possibilità d'intasamento).

Gli stessi fattori determinano anche i requisiti di ventilazione nelle situazioni d'emergenza, specie in caso d'incendio. Occorre, inoltre, considerare la presenza di altri elementi, ad esempio le uscite d'emergenza. La ventilazione naturale può essere sufficiente in alcuni casi, ma quella meccanica è spesso richiesta dalla normativa moderna in risposta al progresso dello stato dell'arte.

Nelle gallerie si possono usare diverse strategie di ventilazione. La scelta fra tali strategie dipende, in generale, dalle considerazioni di sicurezza relative agli incendi.

I parametri strutturali e di traffico rilevanti nella scelta della tipologia e nel dimensionamento del sistema di ventilazione sono:

- Lunghezza della galleria;
- Area della sezione trasversale;
- Andamento altimetrico della galleria;
- Volume di traffico equivalente;
- Frequenza di regime di traffico congestionato,
- Condizioni meteo-climatiche prevalenti sul sito;

Quindi, il sistema di ventilazione deve essere realizzato secondo il più recente stato dell'arte così da garantire il livello di sicurezza fissato dall'applicazione della metodologia probabilistica di analisi del rischio applicata al sistema galleria.

La progettazione del sistema di ventilazione deve portare alla definizione di una configurazione impiantistica ottimale in grado di garantire:

- La diluizione delle emissioni dei veicoli all'interno della galleria in condizioni di esercizio (ventilazione sanitaria);
- La gestione e il controllo dei fumi in caso di possibili incidenti rilevanti (ventilazione d'emergenza);
- La compatibilità ambientale della struttura;

Per determinare il tipo di ventilazione devono essere fatte diverse valutazioni tenendo del volume d'aria necessario per la diluizione degli inquinanti, nonché di altri fattori come la lunghezza della galleria, la sua ubicazione, il tipo di traffico, le leggi in materia ambientale e fattore fondamentale la sicurezza. È quindi possibile scegliere un sistema di ventilazione diverso in ogni galleria.

I possibili sistemi di ventilazione sono:

1. Ventilazione Naturale che può essere:
  - Indotta dalla temperatura dell'aria e dalle condizioni metereologiche;
  - Indotta dal traffico (effetto pistone);
2. Ventilazione Meccanica che può essere:
  - Longitudinale;
  - Completamente Trasversale;
  - Semi-trasversale (e semi-trasversale reversibile);
  - Trasversale parziale;
3. Trattamento (depurazione) dell'aria abbinato con la ventilazione meccanica.

I principi di ciascun metodo sono descritti di seguito. I metodi non sono tra loro indipendenti, le combinazioni sono possibili se non in certi casi addirittura inevitabili.

In tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia deve essere installato un impianto di ventilazione meccanica. La verifica della necessità d'installare un impianto di ventilazione meccanica deve essere estesa a gallerie di lunghezza inferiore ai 1000 m quando i parametri strutturali e di traffico che influenzano la sicurezza del sistema galleria risultino anomali. Esempi di parametri anomali sono: la sezione trasversale sia inferiore a 45 m<sup>2</sup> per una galleria 2 corsie di marcia, la pendenza superi il 3%, il volume di traffico previsto sia

superiore a 10000 veicoli/giorno, regimi di traffico congestionato si verifichino per almeno 5 giorni in una settimana per un tempo pari ad almeno 30 minuti consecutivi.

Tabella 32: Tipo del sistema di ventilazione consigliato in base alla lunghezza della galleria.

<b>Sistema di ventilazioni raccomandati per le gallerie stradali</b>	
<b>Sistemi di Ventilazione</b>	<b>Lunghezza della galleria bidirezionale [m]</b>
Ventilazione naturale	≤ 500 m
Ventilazione longitudinale con jet-fans	≤ 1500 m
Ventilazione longitudinale con jet-fans ed estrazione dei fumi	≤ 3000 m
Ventilazione semi-trasversale	≥ 1000 m
Ventilazione trasversale	≥ 1000 m

La scelta della tipologia del sistema di ventilazione trasversale o semi-trasversale, oltre che essere basata sulle caratteristiche geometriche, architettoniche e del traffico, deve essere suffragata dai risultati forniti dalla metodologia di analisi probabilistica del rischio, quando prevista.

Nelle gallerie con traffico bidirezionale di lunghezza maggiore a 1000m, l'adozione della ventilazione longitudinale richiede l'analisi del rischio da cui emerge l'accettabilità della soluzione adottata o l'adozione di misure compensative specifiche, quali ad esempio un'adeguata gestione del traffico, idonee distanze tra le uscite d'emergenza, postazioni intermedie di estrazione dei fumi, etc. Il sistema di ventilazione longitudinale può essere utilizzato fino a lunghezze pari a 1500 m, quando l'analisi del rischio fornisca risultati compatibili con i vincoli ambientali ed i vincoli di sicurezza.

Per gallerie di lunghezza superiore ai 1500 m deve essere valutata, applicando caso per caso la metodologia dell'analisi del rischio, l'adozione di un sistema di tipo longitudinale integrato da idonee misure compensative in luogo della realizzazione di un sistema di ventilazione semi-trasversale, trasversale, ibrido.

Nelle gallerie di lunghezza superiore a 3000 m con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli/giorno, un centro di controllo e ventilazione trasversale e/o semi-trasversale, devono essere adottate le seguenti misure minime per quanto concerne la ventilazione:

- Installazione di dispositivi di estrazione dell'aria e dei fumi azionabile separatamente o a gruppi;
- Controllo costante della velocità longitudinale dell'aria e conseguente regolazione del processo di controllo dell'impianto di ventilazione (estrattori, ventilatori, etc.)

La velocità di ventilazione può considerarsi sotto controllo quando essa oscilla tra i -1 m/s e 1 m/s in una zona di lunghezza fissata, situata a cavallo del focolaio.

Il sistema di ventilazione deve conservare la stratificazione di fumi generati da un evento di incendio rappresentativo degli eventi critici possibili in una galleria stradale per un tempo sufficiente a garantire il processo di esodo degli utenti verso la prima uscita d'emergenza disponibile.

Il sistema di ventilazione deve essere in grado d'invertire il verso del flusso d'aria in ogni posizione della galleria in un tempo compatibile con la dinamica dell'evento d'incendio e la salvabilità degli utenti.

### 3.2.2.1 Ventilazione naturale

Il tunnel è ventilato in modo naturale quando non è dotato di ventilatori per il controllo meccanico del flusso d'aria nella zona di circolazione. Esiste una certa ventilazione naturale in ogni tunnel e in tutte le condizioni: il rinnovo dell'aria è comunque sempre indotto da una combinazione di fattori come le condizioni metereologiche e il traffico stradale.

Effetti metereologici: una galleria può essere sufficientemente ventilata dal vento, da una diversa pressione atmosferica tra le sue due estremità ed eventualmente da un effetto di convezione o camino. La ventilazione naturale di gallerie con testate ad altitudini differenti è fondamentalmente un effetto camino e sebbene non sia generalmente possibile prevedere testate di tunnel ad altezze diverse, possono sussistere situazioni in zone montuose dove questo effetto potrebbe essere vantaggioso considerarlo.

Ventilazione indotta dalla circolazione stradale: le ferrovie sotterranee sono ventilate principalmente dall'effetto pistone dei treni che aspirano l'aria lungo il tunnel. Tale effetto permette di ventilare i tunnel stradali unidirezionali sebbene la velocità dell'aria indotta dagli autoveicoli sia inferiore rispetto a quella dei treni poiché i veicoli non riempiono la sezione trasversale tanto quanto i treni. Tuttavia, all'aumentare del diametro del tunnel, il guadagno in volume d'aria è marginalmente maggiore della riduzione indotta della velocità dell'aria; di conseguenza la diluizione degli inquinanti aumenta leggermente con la sezione della galleria. Sebbene la ventilazione indotta dal traffico sia adatta per diluire gli inquinanti in condizioni normali di traffico, spesso sono previsti ventilatori per quando il traffico è fermo o a flusso lento o il vento esterno è avverso al senso di marcia.

La ventilazione in gran parte delle gallerie del mondo si basa sul vento e sul traffico. Generalmente queste gallerie non superano le centinaia di metri di lunghezza, tranne nel caso di volumi di traffico assai ridotti. Le gallerie ventilate dal traffico e lunghe 500 m sono generalmente unidirezionali. La ventilazione di questo tipo è comune nelle zone montuose. Questa situazione risulta non sicura per il controllo del fumo specialmente nel caso di tunnel con lunghezza maggiore dei 500 m sopra citati.

### 3.2.2.2 Ventilazione meccanica

Un sistema di ventilazione in una galleria deve mantenere una qualità dell'aria accettabile durante il normale funzionamento. In caso d'incendio, deve garantire la sicurezza degli utenti facilitandone le operazioni di esodo e messa in sicurezza così da permettere un soccorso agevole alle unità d'emergenza. Inoltre, la ventilazione deve impedire la formazione di possibili miscele esplosive. Una miscela esplosiva non dovrebbe mai formarsi, ma può comunque accadere che venga generata a causa di rilasci incidentali e/o di combustioni incomplete di gas caldi durante un eventuale incendio.

In commercio esistono diverse tipologie d'impianti a ventilazione meccanica, i principali sono:

**Sistema longitudinale.** La ventilazione longitudinale è il modo più semplice ed economico per ventilare le gallerie. In questo caso, la ventilazione crea un flusso d'aria uniforme e longitudinale lungo tutto il tunnel. In un tale sistema l'aria, quasi pura, entra attraverso uno dei due ingressi e viene progressivamente inquinata dalle sostanze emesse dai veicoli, raggiunge l'uscita con un elevato grado d'inquinamento dove infine viene rilasciata all'esterno. Questo sistema è relativamente economico e di facile installazione, risulta particolarmente adatto per gallerie unidirezionali dove l'effetto pistone può ulteriormente aiutare.

Dal punto di vista della diluizione, la ventilazione è considerata sufficiente quando il sistema è in grado di mantenere la concentrazione degli inquinanti al di sotto della soglia nociva per gli utenti che transitano nella galleria. Un sistema di ventilazione progettato esclusivamente sulla base del criterio di diluizione potrebbe essere sufficiente dal punto di vista del controllo degli inquinanti ma risulterebbe insufficiente per il controllo dei fumi causati da un incendio.

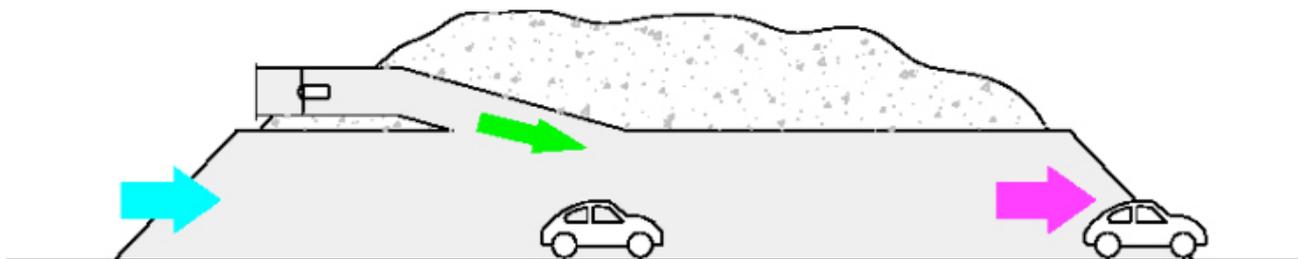


Figura 43: Schema di funzionamento di un tunnel a ventilazione longitudinale. PIARC

Nelle gallerie con ventilazione longitudinale, la concentrazione di sostanze nocive aumenta nella direzione del flusso d'aria e diminuisce al crescere del flusso d'aria pulita. La concentrazione massima aumenta con la lunghezza del tunnel.

La portata necessaria alla ventilazione varia con la lunghezza e la pendenza della galleria: all'aumentare della lunghezza e della pendenza della galleria sarà necessaria una portata maggiore.

Per un dato traffico e pendenza, l'uso della ventilazione longitudinale è limitato dalla lunghezza della galleria. Il limite superiore della ventilazione nella galleria trasversale può essere valutato conoscendo la sezione trasversale della galleria e la velocità massima dell'aria (circa 10 m/s), che è conveniente e non interferisce con i veicoli e il personale di servizio che lavora nella galleria.

Inoltre, la potenza meccanica del sistema di ventilazione aumenta effettivamente con la potenza di tre (3-6-9-...etc) al crescere della lunghezza della galleria in caso di traffico bidirezionale.

Per le gallerie che richiedono un flusso d'aria superiore alle soglie già citate, la ventilazione longitudinale è ancora possibile, ma deve essere integrata da pozzi che assicurino lo scambio tra aria viziata e aria pulita.



*Figura 44: Coppia di Jet Fan installati in una galleria. FlaktGroup*

La ventilazione longitudinale è solitamente ottenuta mediante ventilatori assiali detti “acceleratori” o “jet fan” distribuiti lungo il tunnel e all'esterno dello spazio di circolazione. Le dimensioni e la distribuzione degli acceleratori lungo il tunnel non hanno praticamente alcun effetto sulla velocità dell'aria, a condizione che vengano rispettate le regole tecniche minime. A volte viene utilizzata anche la ventilazione ad iniezione longitudinale.

È meno costoso concentrare gli acceleratori in prossimità degli ingressi. In questo modo la lunghezza dei cavi è la più corta possibile. Tuttavia, da un punto di vista aerodinamico se le manette fossero poste troppo vicine all'uscita, la loro efficienza si ridurrebbe notevolmente. Pertanto, la prima e l'ultima serie di acceleratori sono installate almeno a 80 – 100 metri all'interno della galleria.

Negli impianti di ventilazione meccanica diversi da quelli longitudinali, l'aria ventilata viene immessa e/o estratta da canalizzazioni appositamente realizzate. Tali sistemi sono classificati in base alla percentuale di aria fresca immessa e alla percentuale di aria viziata scaricata attraverso condotti aggiuntivi, mentre la restante parte viene fornita o scaricata tramite le testate.

Tabella 33: Utilità dei sistemi di ventilazione non longitudinale nell'immettere aria fresca ed estrarre aria viziata.

Sistemi di ventilazione non longitudinale	Aria Fresca	Aria Viziata
Completamente Trasversale	100%	100%
Parziale – Trasversale	100%(possibile intermedia)	Intermedia
Semi - Trasversale	100%	0%
Semi – Trasversale Reversibile: In condizioni normali In condizioni d'incendio	100% 0% ≤ flusso ≤ 100%	0% 0% ≤ flusso ≤ 100%

**Completamente Trasversale.** In un sistema di ventilazione incrociata pura, ci sono uno o più condotte d'aria fresca parallele al tubo di circolazione. L'aria fresca viene iniettata attraverso le prese d'aria distribuite lungo la galleria. L'aria viziata, invece, viene aspirata allo stesso modo dall'altro lato della galleria utilizzando uno o più condotti di scarico. In questo sistema, la qualità d'aria estratta per metro di galleria è equivalente alla quantità di aria iniettata. Nel caso di trincee coperte non sono sempre presenti canalizzazioni: l'aria fresca viene iniettata direttamente dall'esterno da piccoli ventilatori, e l'aria viziata viene espulsa all'esterno allo stesso modo. I due flussi d'aria (aria fresca iniettata e aria viziata estratta) creano una corrente d'aria nel tubo principale, dunque la direzione di questo flusso d'aria risulta trasversale rispetto all'asse longitudinale del tunnel.

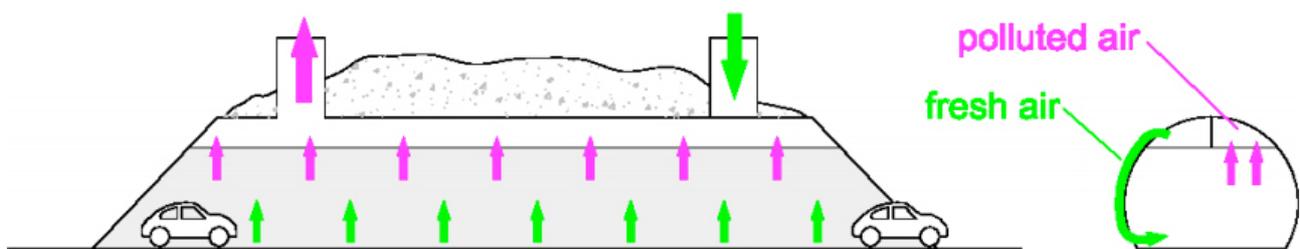


Figura 45: Schema di funzionamento sistema di ventilazione completamente trasversale. PIARC

Una tale corrente d'aria è disturbata da altri fattori (differenze di pressione del vento alle testate del tunnel, differenze di pressione atmosferica, incendio nella galleria, etc.) che creano un tiraggio longitudinale. Ciò significa che nella pratica sarà impossibile un pescaggio puramente perpendicolare all'asse longitudinale del tunnel.

Un secondo aspetto da notare è che il flusso d'aria longitudinale è difficile da controllare, anche se la capacità del sistema di ventilazione incrociata è grande, perché non ci sono forze di compensazione in direzione longitudinale. Il modo più comune per avere qualsiasi controllo su questo flusso d'aria

longitudinale è creare sezioni di ventilazione indipendenti e successive in cui l'iniezione e l'estrazione dell'aria possono essere effettuate separatamente.

La concentrazione d'inquinamento nell'aria è costante in tutto il tunnel (in assenza di flusso d'aria longitudinale). Questo sistema è quindi applicabile in grandi gallerie. In linea di principio, non c'è limite alla lunghezza del tunnel quando si tratta di scaricare l'inquinamento, ma ovviamente entrano in gioco limiti economici e tecnici.

L'aria ventilata viene immessa ed estratta tramite canalizzazioni appositamente realizzate. Il volume totale d'aria ventilata richiesta è significativo, soprattutto nelle grandi gallerie. In effetti, le condotte sono grandi e costose. La capacità dei ventilatori è in gran parte determinata dalla velocità dell'aria nelle condotte. Nelle gallerie di grandi dimensioni, i condotti sono quindi suddivisi longitudinalmente in blocchi, l'aria viene fornita in punti diversi in modo da limitare la velocità dell'aria nei diversi blocchi. La velocità varia tra i 15 e i 25 m/s nelle condotte d'aria comuni.

Come già accennato, la creazione di più blocchi di ventilazione indipendenti consente anche un certo flusso d'aria longitudinale. I ventilatori vengono solitamente installati vicino agli ingressi dei tunnel per una migliore accessibilità, o in piani sotterranei alla careggiata.

In caso d'incendio il condotto d'aspirazione dell'aria viziata nella zona dell'incendio funziona come uno scarico completo e le sezioni di ventilazione adiacenti sono controllate in modo che la velocità dell'aria longitudinale al centro dell'incendio spinga il fumo nella direzione giusta.

Tuttavia, l'esperienza dimostra che in piccole gallerie, sotto l'influenza del vento, non è facile controllare la direzione e la velocità dell'aria nell'area interessata dall'incendio a causa dell'effetto camino dei fumi caldi.

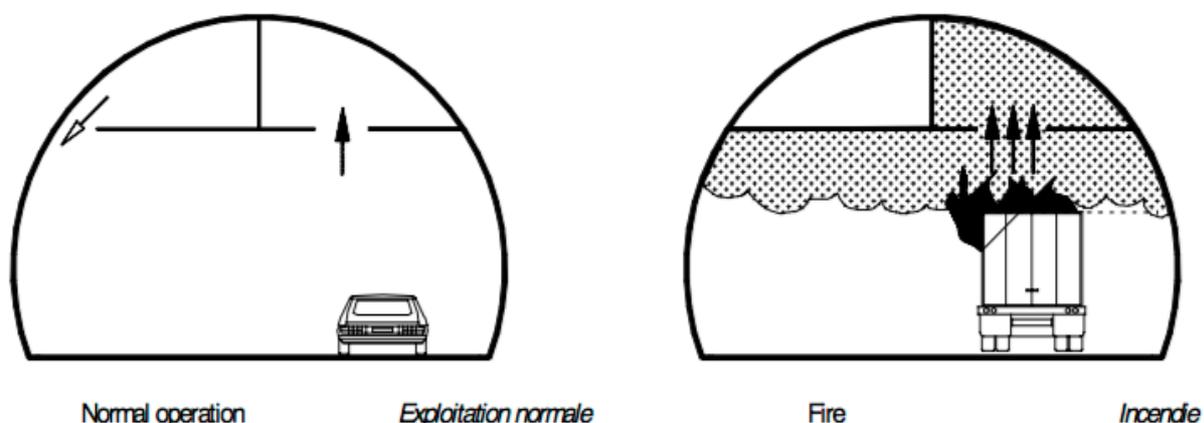


Figura 46: Modalità di funzionamento ordinaria e di emergenza di un sistema a ventilazione completamente trasversale. PIARC

**Semi – Trasversale (e semi trasversale reversibile).** In un sistema di ventilazione semi-trasversale, l'aria esterna viene iniettata in modo uniforme lungo il tunnel, generalmente attraverso un condotto di ventilazione, ma non c'è estrazione dell'aria viziata: l'aria fresca viene fornita trasversalmente all'asse longitudinale del tunnel, mentre l'aria viziata scorre longitudinalmente verso le uscite.

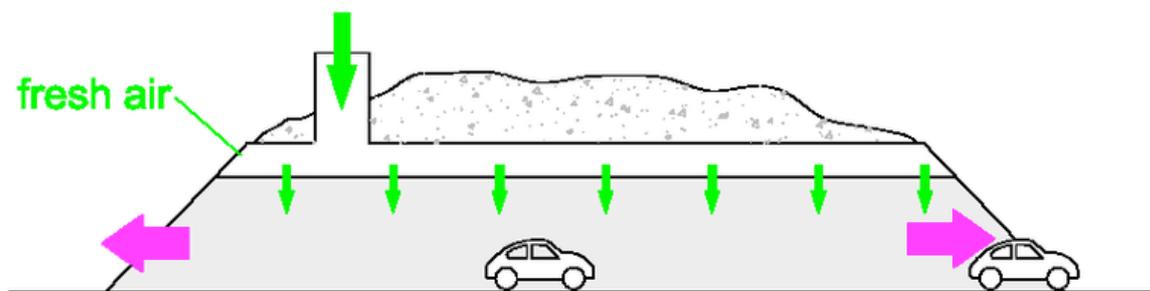


Figura 47: Schema di funzionamento sistema di ventilazione semi-trasversale. PIARC

In un sistema di ventilazione semi-trasversale reversibile, è possibile invertire il senso della corrente nelle condotte: l'aria fresca entra nel tunnel attraverso le testate (parallele all'asse longitudinale), mentre l'aria viziata viene estratta tramite bocchette reversibili e condotti. L'estrazione induce, quindi, un flusso d'aria reversibile che proviene dalle due testate o sezioni di ventilazione adiacenti che forniscono sempre aria. Questa modalità di funzionamento è generalmente riservata ai casi di incendio in galleria. È, inoltre, possibile avere un condotto separato per l'estrazione dei fummi, che viene utilizzato solo in caso d'incendio.

Come per la ventilazione trasversale, in quella semi-trasversale è possibile che si instaurino dei fattori esterni che possono creare un flusso d'aria longitudinale difficile da controllare.

**Trasversale – Parziale.** I sistemi di ventilazione trasversale parziale (detti anche pseudo trasversali) sono intermedi tra i sistemi trasversali e semi - trasversali ed hanno, quindi, caratteristiche intermedie che possono essere più simili al primo o al secondo a seconda di quale percentuale del flusso di ventilazione viene iniettato o estratto.

In ogni caso le opere d'ingegneria sono simili al sistema trasversale, essendo necessarie per trattare sia l'aria fresca che quella di scarico (anche se nei sistemi trasversali parziali, i condotti di fresco e di scarico sono solitamente non bilanciati). È anche possibile aggiungere al tunnel ventilatori a getto (jet fans) per creare e sostenere il flusso d'aria longitudinale desiderato, soprattutto in caso d'incendio.

Osservazione: in Svizzera esistono alcuni tunnel con solo pozzi di scarico.

### 3.2.2.3 Ventilazione mediante depurazione

L'aria di scarico dei veicoli all'interno del tunnel può essere pulita riducendo il relativo livello d'inquinamento al fine di:

- Diminuire la portata d'aria necessaria per la ventilazione del tunnel;
- Ridurre l'inquinamento complessivo rilasciato alle testate e ai pozzi delle gallerie;

Le attuali applicazioni si basano principalmente su precipitatori elettrostatici in grado di raccogliere polveri e particolato dall'aria del tunnel.

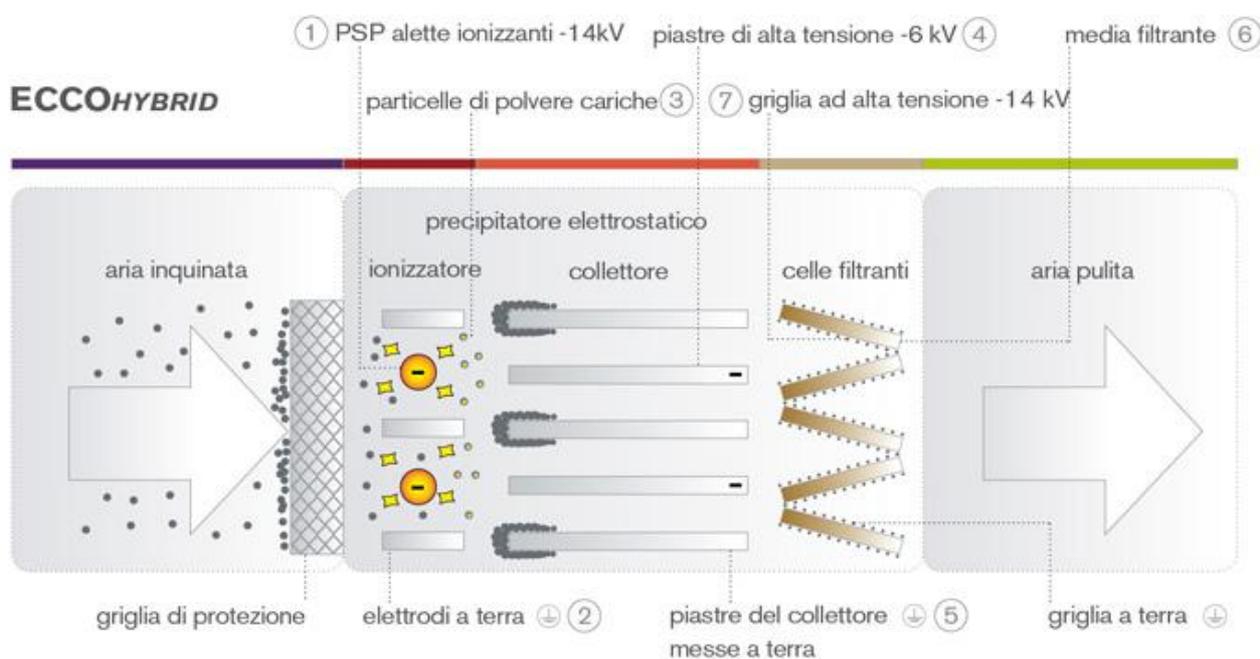


Figura 48: Schema del principio di filtrazione elettrostatica. Aignertunnel

In caso di un'elevata frequentazione di mezzi pesanti nella galleria è stato sviluppato, per esempio in Giappone, un sistema in grado di ridurre la concentrazione di particelle solide all'interno dell'aria.

Anche diverse gallerie in Norvegia sono dotate di un sistema per la pulizia dell'aria poiché nel periodo invernale, quando i veicoli sono dotati di pneumatici chiodati, aumenta la concentrazione di polvere nel tunnel influenzando notevolmente la qualità dell'aria.

Attualmente sono in sviluppo programmi di ricerca in diversi paesi ad alta densità di gallerie come l'Austria (Tunnel del Plabutsch) e la Germania (Tunnel sull'Elba). Alcuni programmi oltre a ridurre le polveri e il particolato mirano a rimuovere CO, CO<sub>2</sub> e gli idrocarburi.

Sono, invece, recenti gli studi che si occupano della depurazione biologica dell'aria a fini ambientali. Esiste anche un filone di ricerche che si occupa di filtri elettrostatici in grado di raccogliere polvere e fuliggine dal fumo caldo di un incendio, per migliorare la visibilità degli utenti durante le fasi di

esodo e arrivo dei soccorritori. Ci sono risultati incoraggianti che dimostrano che la visibilità può essere migliorata facendo precipitare le particelle contenute nei fumi caldi dell'incendio. Tuttavia, questa tecnologia non è mai stata applicata come unica misura di controllo del fuoco in galleria.

#### 3.2.2.4 Ventilazione sanitaria

La ventilazione sanitaria si pone come compiti:

- Diluire gli inquinanti emessi dagli autoveicoli in ogni regime di traffico;
- Diluire gli inquinanti emessi dagli autoveicoli in caso d'arresto del traffico conseguente all'accadimento di un incidente non rilevate;

La ventilazione sanitaria deve mantenere la concentrazione degli inquinanti, all'interno della struttura, a livelli tali da non compromettere la visibilità e contenere la dose d'inquinante assunta dagli utenti al di sotto della soglia di legge.

La diluizione degli inquinanti da parte dell'impianto di ventilazione dovrà essere effettuata sulla base delle stime più recenti delle emissioni dei veicoli e delle normative EU vigenti.

La ventilazione sanitaria deve essere dimensionata sulla base dei volumi di traffico e delle emissioni dei veicoli stimati per i primi 20 anni di esercizio.

La determinazione delle condizioni meteo-climatiche ai portali per le quali attuare la chiusura al traffico della galleria devono essere determinate mediante l'uso dell'analisi del rischio probabilistica. Il livello massimo degli inquinanti deve essere conforme alle indicazioni riportate nelle guide PIARC (World road Association) vigenti al momento della progettazione dell'impianto di ventilazione.

#### 3.2.2.5 Ventilazione di emergenza

La ventilazione d'emergenza è preposta a:

- Disperdere l'energia termica generata dal focolaio d'incendio;
- Gestire e controllare il moto dei fumi;
- Diluire le sostanze tossiche ed infiammabili.

La ventilazione d'emergenza deve garantire l'esodo degli utenti e facilitarne le operazioni di soccorso e di spegnimento nonché prevenire la formazione di miscele esplosive nel corso di un evento di rilascio e/o sversamento.

Il dimensionamento dell'impianto di ventilazione, per condizioni d'emergenza, deve essere effettuato preliminarmente almeno in conformità ai dettami dell'analisi del rischio considerando l'influenza dei parametri di sicurezza in particolare il profilo longitudinale e le condizioni meteo-climatiche ai portali che determinano la ventilazione naturale.

### 3.2.3 Vie d'esodo

Le uscite d'emergenza sono previste in tutte le tipologie di tunnel, fatto salvo nelle gallerie più corte, per permettere agli automobilisti di evacuare a piedi dalla canna del traffico verso un luogo sicuro nel caso si verifichi uno scenario di emergenza. Nel caso delle gallerie più brevi sono gli imbocchi stessi a rappresentare delle adeguate uscite d'emergenza. Escluse le appena citate gallerie brevi, nella gran parte delle gallerie sono necessarie ulteriori uscite d'emergenza per limitare il tragitto a piedi che gli utenti devono percorrere per raggiungere un luogo sicuro.

Si definisce uscita d'emergenza un'apertura realizzata sull'involucro della struttura della galleria finalizzata a favorire l'esodo degli utenti verso vie di fuga e luoghi sicuri.

Gli esempi più emblematici di uscite d'emergenza sono le uscite dirette verso l'esterno della galleria, le uscite verso una galleria o un cunicolo d'emergenza, inoltre, per definizione i portali della galleria sono uscite d'emergenza.

Le uscite d'emergenza devono essere corredate ad idonei dispositivi di sicurezza atti ad impedire la propagazione dei fumi, e quindi dell'energia termica, all'interno delle vie di fuga, consentendo agli utenti di usufruire delle vie d'esodo in maniera sicura e agli addetti del servizio di pronto soccorso di accedere in sicurezza all'interno della galleria.

L'accesso all'esterno della galleria deve essere realizzato creando una zona di filtro a prova di fumo con un livello di compartimentazione non inferiore a REI 120.

Le uscite di sicurezza possono configurarsi in vari modi:

- Gallerie di comunicazione o passaggi tra le canne (usati sia dai veicoli che dai pedoni). In alcune gallerie il passaggio tra una canna e l'altra può essere rappresentato semplicemente da una porta REI 120. Per le gallerie scavate nella roccia invece, le canne sono solitamente un po' distanziate, così vengono creati dei cunicoli di passaggio che fungono sia da uscita d'emergenza e sia da filtro per i fumi.
- Le uscite d'emergenza possono condurre gli utenti a ripari dove rimanere al sicuro durante l'emergenza. Questi ripari devono a loro volta essere collegati direttamente all'esterno o attraverso cunicoli di fuga, così da facilitare l'esodo in un secondo momento sotto la supervisione dei vigili del fuoco. I ripari sono ambienti provvisti di dotazioni specifiche atte ad ospitare gli utenti durante l'emergenza offrendo loro alimentazione separata, aria fresca, telefono d'emergenza e servizi base di pronto soccorso;
- Cunicoli di sicurezza (passaggi) costruiti lungo le canne del traffico o magari sotto la carreggiata che conducono o in superficie o ad un luogo sicuro.;

- Passaggi di fuga che collegano direttamente l'uscita d'emergenza alla superficie a ad un altro luogo sicuro. Tali passaggi sono generalmente possibili solo nelle gallerie con poca copertura;

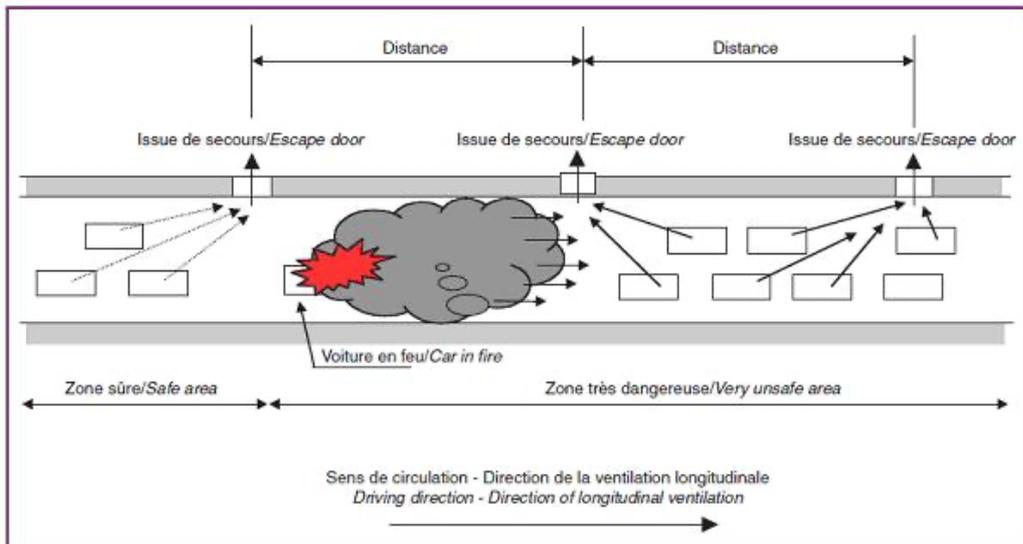


Figura 49: Schema funzionamento vie d'esodo in caso di incendio in galleria. PIARC

La distanza appropriata tra uscite d'emergenza successive dipende da diversi fattori, tra cui:

- Le tipologie di veicolo che utilizzano la galleria, determinano la natura degli eventi e quindi degli scenari che potrebbero verificarsi;
- Il volume del traffico e il numero di utenti che potrebbero dover utilizzare contemporaneamente le uscite d'emergenza;
- La capacità del sistema di ventilazione della galleria di mantenere condizioni accettabili per permettere l'evacuazione in sicurezza della galleria;
- I sistemi di allarme e rilevamento degli incidenti;
- La morfologia dei percorsi protetti fuori dalle uscite d'emergenza (dimensioni, pendenza, presenza di scale, etc);
- Il comportamento umano;

La distanza ottimale tra due uscite d'emergenza nella gran parte dei paesi del mondo è compresa tra i 100 e i 500 metri; in Italia la distanza tra due uscite d'emergenza consecutive non deve superare i 300 metri.

Dal punto di vista progettuale, le uscite d'emergenza necessitano di particolari accorgimenti:

- Le uscite d'emergenza devono essere ben segnalate in modo da distinguerle dall'accesso ai vani tecnici. A tal fine il colore raccomandato per le porte d'emergenza, solitamente il verde, deve essere considerato in combinazione con il tipo di illuminazione presente in galleria;

- Le porte e i passaggi devono essere dimensionati in modo da supportare un elevato numero di persone in un breve lasso di tempo, nonché il passaggio dei soccorritori con le attrezzature necessarie (bombole, respiratori, barelle, etc);
- Le uscite d'emergenza devono essere direttamente individuabili, oppure attraverso segnali visibili e riconoscibili, da ogni parte del tunnel;
- I vani al di là delle uscite d'emergenza devono essere "invitanti" e progettati per impedire che le persone possano subire incidenti legati all'ansia e alla paura, come cadute, inciampi, scivolamenti, etc;
- L'illuminazione e la segnalazione dei cordoli non devono costituire un ostacolo per le persone che camminano in direzione delle vie d'esodo;
- Le porte delle uscite d'emergenza non devono mai essere chiuse a chiave.



*Figura 50: Esempio di via d'esodo che conduce ad un "Armadio di soccorso", ossia ad un rifugio sicuro.*

*Tunnel Valik SOS*

### 3.2.4 Cartelli segnaletici

La cartellonistica segnaletica costituisce uno dei mezzi principali a disposizione dell'operatore per comunicare con gli automobilisti. La comunicazione tra operatore ed utente può avvenire sia attraverso cartellonistica dedicata, sia con cartelli, luci, sbarre e semafori più tradizionali.



Figura 51: Cartello digitale che permette la comunicazione tra gli utenti e il gestore del tunnel. Il Salvagente

Nelle gallerie si possono vedere cartelli indicatori di: direzione fissa, di polizia fissi (pericolo, limiti di velocità, direzioni obbligatorie, etc) e variabili (assegnazione di corsia, messaggi variabili, etc). La presenza di dispositivi di sicurezza specifici a disposizione degli automobilisti in galleria (telefoni di emergenza, estintori, rifugi, uscite d'emergenza, etc) richiede l'utilizzo di cartellonistica dedicata. Il problema principale della cartellonistica in galleria è la collocazione. A differenza delle strade non in galleria i cartelli qui sono ubicati prevalentemente in sommità e non a bordo strada rendendone così più difficile la lettura. Le gallerie sotterranee presentano caratteristiche geometriche ottimizzate, quindi aumentare la sezione trasversale per ospitare la cartellonistica stradale comporterebbe dei costi di gran lunga superiori rispetto all'utilità marginale. Dunque nella pratica bisogna trovare un compromesso tra la necessità di garantire una buona visibilità dei segnali (pannelli sufficientemente grandi) e lo spazio a disposizione.



Figura 52: Esempio di cartello indicante le uscite di emergenza presenti in galleria. Tecnotun

### 3.2.5 Barriere Semoventi e Semafori

Non appena si verifica uno scenario avverso all'interno di una galleria stradale (incidente, incendio, allagamento, etc), deve essere immediatamente possibile impedire l'accesso alla galleria ad altri utenti. Questo si realizza mediante alcuni dispositivi capaci di bloccare in modo rapido ed efficace l'accesso al tunnel come le barriere semoventi o i semafori alle imboccature. Il tempestivo intervento di questi sistemi può evitare agli utenti che si trovano in procinto di entrare nella galleria di finire in una situazione potenzialmente pericolosa, oltre a facilitare l'accesso al personale di emergenza.

L'esperienza, in molti paesi, mostra che le barriere rispetto ai soli segnali di stop (semafori rossi), per bloccare l'accesso alla galleria sono da preferire perché più persuasive. Tuttavia, per motivi di ridondanza il segnale di stop viene spesso usato in combinazione con le barriere e i segnali a messaggio variabile che servono ad informare gli automobilisti delle cause della chiusura della galleria.

Il dispositivo di chiusura del tunnel può essere attivato sia dal centro di comando e controllo dell'ente gestore della galleria e sia automaticamente attraverso la sensoristica installata (rilevatori di fumo e calore, etc) qualora il tunnel non sia costantemente monitorato.

Tale dispositivo di chiusura risulta utile non soltanto durante le situazioni d'emergenza ma anche durante le chiusure programmate della galleria per compiere le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria.



*Figura 53: Semaforo segnalante lo stato di servizio di ciascuna carreggiata della galleria. Alibaba*

## 3.3 Sistemi di Protezione

### 3.3.1 Sistemi antincendio

Un incendio che divampa all'interno di un ambiente chiuso, come è una galleria, può crescere rapidamente creando una quantità di fumo capace di compromettere in breve tempo la capacità di auto-salvataggio degli utenti, mentre il rapido aumento della temperatura può rendere l'atmosfera insostenibile e mettere fuori uso i sistemi di sicurezza.

Un sistema fisso antincendio è in grado di ridurre sensibilmente la velocità di sviluppo e propagazione del fuoco, favorendo la sicurezza degli automobilisti e dei servizi d'emergenza durante le fasi di auto-salvataggio e di salvataggio assistito da un incendio.

Altri potenziali vantaggi forniti da un sistema fisso antincendio sono la protezione sia della struttura (rivestimento calcestruzzo armato) e sia delle dotazioni impiantistiche (impianto d'illuminazione, impianti di ventilazione, segnaletica, etc) dai danni provocati dagli incendi e dalla capacità di mitigare le eventuali interruzioni della rete viaria che potrebbero verificarsi durante la riparazione o il ripristino della galleria in seguito ad un incendio catastrofico.

Escluse le gallerie nelle quali la presenza degli impianti fissi antincendio è prevista da normativa, per decidere se installare o meno questi impianti costosi e complessi nelle altre gallerie è buona norma seguire alcune raccomandazioni figlie di: uno studio di fattibilità, un'analisi dei rischi svolta in linea con la direttiva europea 2004/54/CE e un'analisi costi-benefici.

L'efficacia operativa dei sistemi fissi antincendio può essere valutata per mezzo di un approccio ingegneristico (FSE, Fire Safety Engineering), comprendente regimi di manutenzione, prova e formazione. Occorre tuttavia prestare particolare attenzione alle procedure operative e ai budget per la manutenzione di cui questi sistemi hanno necessità.

I sistemi a pioggia sono il modello d'impianto più largamente diffuso nelle gallerie, tra quelli fissi antincendio presenti sul mercato. Tali sistemi sono disponibili sia a bassa che ad alta pressione, questi si differenziano per la dimensione delle gocce d'acqua, nei primi più grandi mentre nei secondi più piccole. Tra gli altri sistemi utilizzati come impianti fissi antincendio ricordiamo quelli a schiuma. La selezione del sistema antincendio più adatto alle esigenze della propria galleria deve basarsi sulle analisi sopra citate, soprattutto nell'analisi costi-benefici.

Nonostante i sistemi fissi antincendio in galleria siano usati con sempre maggiore regolarità e diffusione nei paesi sviluppati, essi rimangono comunque un'eccezione piuttosto che la norma, nelle gallerie del resto del mondo, a causa degli elevati costi di progettazione, installazione e specialmente manutenzione. È noto che tali sistemi possono ridurre sensibilmente la velocità di sviluppo e

propagazione degli incendi ma è ugualmente vero che necessitano di un livello di manutenzione e professionalità superiore per garantirne il loro funzionamento ottimale.

L'obiettivo principale dell'impianto antincendio, all'interno di una galleria stradale, è quello di fornire i mezzi per contrastare un incendio nelle sue fasi iniziali, cercando di limitarne la diffusione e la crescita così da permettere agli utenti il tempo di venire soccorsi dalle squadre d'emergenza.

Le tecnologie critiche in grado di contrastare un incendio in galleria stradale sono: il rilevamento, l'allarme, la comunicazione radio, i telefoni per le emergenze, le telecamere a circuito chiuso, gli altoparlanti, l'alimentazione e la distribuzione d'acqua, i sistemi fissi antincendio, gli estintori portatili e la ventilazione d'emergenza. Questa serie di sistemi deve essere pianificata, valutata e progettata di concerto tra loro, al fine di costituire una reale compatibilità tra di essi e garantendo gli standard di sicurezza più elevati all'attuale stato dell'arte.

I sistemi discussi in questo paragrafo includono i sistemi forniti agli utenti (automobilisti), agli operatori e ai soccorritori (vigili del fuoco, personale d'emergenza, etc) per contrastare gli incendi nelle gallerie nei primi stadi.



*Figura 54: Cartello indicante un sito SOS con estintore ed idrante. Tecnotun*

### **Forniture d'acqua**

La fornitura d'acqua, all'interno della galleria, necessita di un impianto ad essa dedicata, costituito da: rete idrica, linee di alimentazione in caso d'incendio o colonne montanti e vasca o cisterna come riserva d'acqua. La fornitura d'acqua è necessaria per alimentare i sistemi antincendio fissi (sprinkler, sistemi a pioggia, impianti a diluvio, etc) e mobili (idranti e manichette). La fonte d'acqua può essere

la rete idrica principale o una cisterna di sola pertinenza dell'ente gestore della galleria, entrambe le fonti devono garantire una pressione sufficiente per rispettare i requisiti imposti dai vigili del fuoco.

### **Sistemi antincendio fissi: Sprinkler, a Diluvio, Water Mist, etc**

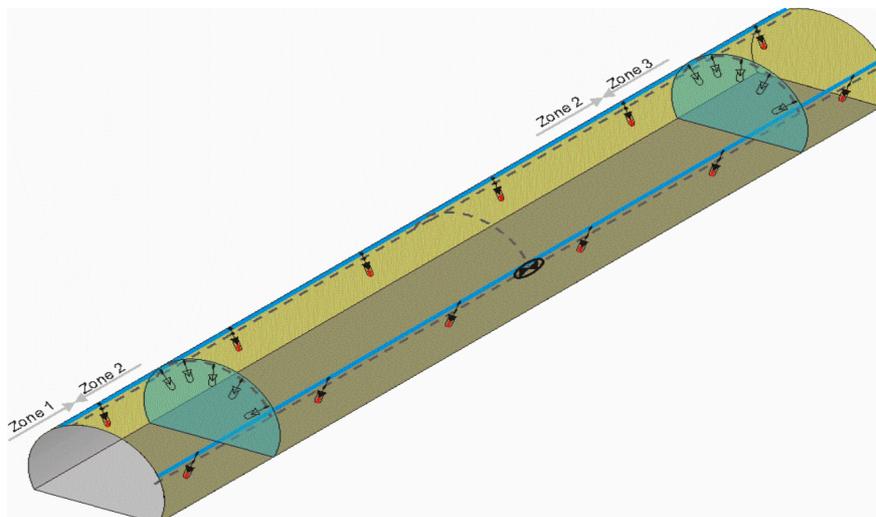
Nelle gallerie più moderne, o recentemente adeguate, sono presenti i seguenti sistemi di controllo ed eventuale estinzione:

- Sistemi automatici sprinkler ad acqua e ad acqua schiuma;
- Sistemi automatici a diluvio ad acqua e ad acqua schiuma;
- Sistemi a schiuma a media/alta pressione;
- Sistemi ad acqua finemente suddivisa "water mist";

#### Sistemi sprinkler ad acqua e ad acqua schiuma

Vantaggi: ottimo controllo dell'incendio soprattutto a livello di temperature massime raggiungibili.

Svantaggi: potenziale apertura di un gran numero di teste in aree anche non direttamente collegate con l'incendio a causa del movimento del calore nella direzione longitudinale che porta a falsare la corrispondenza fra testine che si aprono ed ubicazione del focolaio.



*Figura 55: Sezione tunnel equipaggiato con impianto Sprinkler. Marioff Srl*

#### Sistemi a diluvio ad acqua e ad acqua schiuma

Vantaggi: risultano tra i sistemi più adeguati al rischio incendio in galleria, in particolare in tutti i tunnel che ammettono il passaggio di veicoli che trasportano liquidi combustibili.

Svantaggi: un grosso limite alla loro diffusione è costituito dal fatto che il loro azionamento deve essere necessariamente manuale, a seguito dell'intervento dei sistemi di rilevazione e confermato da

parte degli operatori che possano sorvegliare il tunnel con apposite telecamere. Tale sistema risulta particolarmente complesso e oneroso per gallerie che superino alcune centinaia di metri.

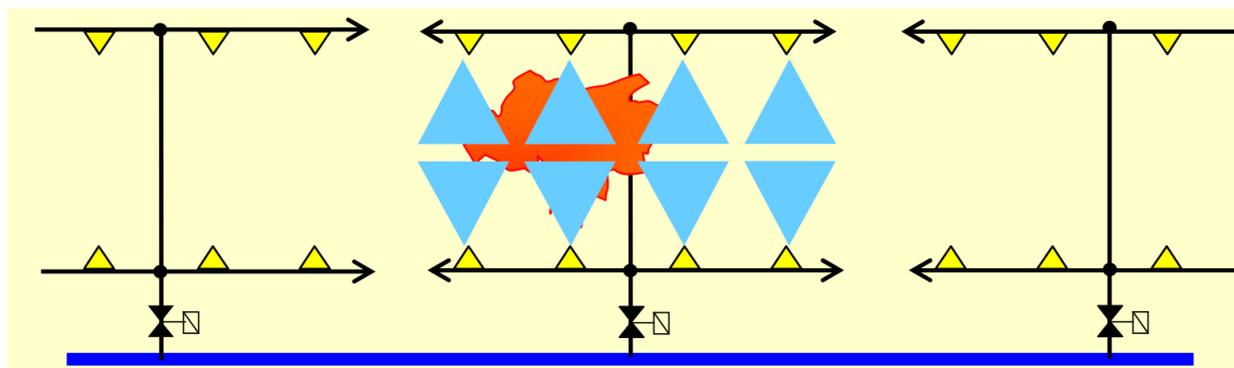


Figura 56: Schema Impianto a diluvio. Marioff Srl

#### Sistemi a schiuma a media/alta pressione

Vantaggi: l'applicazione a schiuma a media ed alta espansione risulta adatta al controllo ed efficace alla completa estinzione degli incendi nei tunnel stradali.

Svantaggi: la gestione degli impianti e delle scorte di schiumogeno può risultare problematica soprattutto per gallerie di lunghezza di alcuni chilometri.

#### Sistemi ad acqua finemente suddivisa "water mist"

Vantaggi: tali sistemi sono in grado di asportare una significativa quantità di calore con l'uso di quantità di acqua molto contenute. La possibilità di nebulizzare l'acqua rende possibile la sottrazione di calore a livelli di 1-2 Mw per Kg di acqua erogato per secondo. Ne consegue che anche un tipico incendio d'autocarro, che può raggiungere i 50 Mw, potrebbe essere contrastato con 25-50 litri al secondo di acqua.

Svantaggi: i limiti di questa applicazione sono rappresentati dall'onerosità e dalla difficoltà di definire le caratteristiche di progetto solo attraverso prove su scala reale per la verifica delle condizioni operative.

#### **Idranti**

Gli idranti servono all'interno della galleria per fornire un punto di raccordo al quale il personale di soccorso possa collegare le manichette, ottenendo così un accesso facilitato alla fornitura d'acqua, in prossimità del punto in cui è andato a svilupparsi l'incendio.

Gli idranti devono essere installati a distanze regolari nel tunnel.

I raccordi degli idranti devono essere compatibili con lo standard utilizzato dai vigili del fuoco che interverranno. Tipico esempio sono i tunnel in prossimità delle zone di confine che per facilitare l'accesso ai servizi d'emergenza di entrambi i paesi, ospitano per ogni idrante due diversi raccordi. In Italia, per galleria di lunghezza superiore a 500 metri, i punti di erogazione idrica (idranti) devono essere installati almeno ogni 250 m, garantire una pressione di mandata di 0.6 MPa ed una portata di 120 l/min per i DN45 e 300 l/min per i DN70.

### **Estintori portatili**

Gli estintori portatili sono messi a disposizione all'interno della galleria a distanze regolari, per fornire un primo aiuto agli automobilisti e al personale operativo, nella lotta al contrasto degli incendi nelle primissime fasi fino al sopraggiungere del servizio antincendio.

## **3.4 Sistemi di Gestione**

Affinché le comunicazioni tra operatore ed utente, all'interno della galleria, avvengano in modo biunivoco è necessario che siano installati apparecchi che permettano la comunicazione dall'operatore verso l'utente e dall'utente verso l'operatore. Questi scambi devono essere possibili in qualunque tipo di scenario, dal più innocuo (foratura di uno pneumatico) al più critico (incendio di veicoli).

Vi sono diversi dispositivi che rendono possibile questa funzione di comunicazione. Tuttavia non tutti questi dispositivi rendono possibile le stesse funzionalità: alcuni apparecchi permettono di instaurare soltanto trasmissioni dall'utente all'operatore, come pulsanti d'allarme, allarmi automatici con determinati sistemi d'evacuazione; mentre altri apparecchi consentono una comunicazione dall'operatore all'utente, come messaggi trasmessi su frequenze FM, altoparlanti, etc; soltanto uno specifico strumento garantisce uno scambio completo tra operatore ed utente, ossia il telefono d'emergenza.

### **3.4.1 Telefono di emergenza**

Gli apparecchi telefonici per le emergenze permettono ad un utente, che sia rimasto vittima di un incidente nel tunnel, di contattate tempestivamente il centro di comando e controllo responsabile della gestione della sicurezza della galleria. Oltre a stabilire il collegamento verbale, il sollevamento della cornetta del telefono d'emergenza da parte dell'incidentato ne permette anche la sua esatta localizzazione.

I telefoni d'emergenza sono installati a distanze fisse in cabine o presso stazioni d'emergenza di vario tipo. La distanza tra due telefoni d'emergenza successivi è spesso specificata dai regolamenti nazionali e può quindi variare da paese a paese.

In Italia le stazioni d'emergenza devono essere posizionate ad intervalli non superiori a 150 m per le gallerie nuove e non superiori a 250 m per le gallerie esistenti.

La struttura del telefono d'emergenza è piuttosto basica, esso infatti è collegato ad un centro che riceve le chiamate effettuate dalla galleria. Solitamente questo centro si trova presso il centro di comando e controllo dell'ente gestore della galleria oppure talvolta può trovarsi presso i locali dei servizi di polizia sotto cui ricade la giurisdizione del tunnel.



Figura 57: Esempio di apparecchio telefonico di soccorso da galleria stradale polivalente. Tecnotun

### 3.4.2 Pulsante di allarme

I pulsanti d'allarme consentono ad un utente d'inviare un allarme al centro di comando e controllo in caso si verifichi un'incidente. Non essendo dispositivi troppo costosi, possono essere installati ad intervalli di frequenza maggiore.

Questa tipologia di dispositivo non è molto usata in quanto costituisce una ridondanza con il telefono d'emergenza ed inoltre non consente una comunicazione bidirezionale tra l'utente e l'operatore del centro di comando e controllo.

### 3.4.3 Allarme automatico “passivo”

L'utente, all'interno della galleria, ha accesso a diversi dispositivi che può utilizzare in caso d'emergenza: telefono d'emergenza e talvolta pulsanti d'allarme. Vi sono inoltre gli estintori e, nella maggior parte delle gallerie, le uscite d'emergenza o i rifugi.

È fondamentale che l'operatore sia informato in maniera tempestiva quando l'utente utilizza uno di questi dispositivi, così da poter avviare le azioni di soccorso. Questo risulta immediato quando a ricevere le telefonate d'emergenza è il centro di comando e controllo dell'ente gestore della galleria, qualora a ricevere la chiamata sia un posto diverso (ad esempio la centrale di polizia) occorre definire delle procedure affinché il servizio ausiliario che riceve la chiamata informi tempestivamente il centro di comando e controllo.

Per determinare la collocazione di un incidente spesso gli estintori e le porte delle uscite d'emergenza ospitano dei sensori capaci di rilevare un cambiamento di condizione e comunicarlo al centro di comando e controllo. L'operatore viene così informato che un utente in galleria sta richiedendo assistenza.

Per quanto riguarda gli estintori, il sensore viene attivato non appena l'utente lo rimuove dall'apposito sostegno. Per le uscite d'emergenza l'informazione è attivata dall'apertura della porta o dal rilevamento di una presenza all'uscita o da entrambi.

### **3.4.4 Rilevazione automatica dell'incendio mediante videosorveglianza**

Quando una galleria è dotata di un sistema di videosorveglianza del traffico le immagini provenienti dalla galleria e dalle sue vicinanze sono monitorate dal centro di comando e controllo 24/24h. Tuttavia è difficile che l'operatore monitori più telecamere contemporaneamente, con un livello d'allerta costantemente elevato e per diverse ore consecutive.

Per venire incontro a queste necessità, i centri di comando e controllo stanno sempre più facendo uso di sistemi automatici per la rilevazione degli incidenti. Addirittura in alcuni paesi questo tipo di monitoraggio è obbligatorio per legge, nella fattispecie per le categorie di gallerie con livelli di rischio più elevati.

La rilevazione automatica d'incidenti (AID Automatic Accident Detection) si basa generalmente su un'analisi numerica dei flussi delle immagini video generati dal sistema di videosorveglianza montato all'interno della galleria per monitorare il traffico viario. A seconda del tipo di algoritmo scelto per l'analisi è possibile rilevare diversi fattori: veicoli fermi, veicoli che procedono nel senso di marcia sbagliato, calo di velocità, veicolo lento, pedoni, detriti in galleria, fumo, fiamme, accesso ad aree riservate, etc.

Poiché gli incendi gravi che divampano in galleria si verificano solitamente dopo che il traffico si è arrestato, ad esempio in seguito ad un incidente, ne consegue che un allarme da "veicolo fermo in panne" trasmesso dal sistema AID può anticipare altri sistemi attivi utilizzati per il rilevamento di temperatura e di fumo. Questo allarme tempestivo fornito dal sistema AID agli operatori della galleria, permette di assicurare con un'adeguata precisione la natura e l'ubicazione dell'evento, così da intervenire in modo efficace.

Le modalità d'intervento sono molteplici e possono variare dalla scelta di una configurazione di ventilazione ottimale, dalla prevenzione d'incidenti secondari attraverso l'adozione di misure operative fino ad arrivare all'avviso tempestivo degli automobilisti a monte dell'evento. L'allarme "anticipato" fornito dal sistema AID da inoltre la possibilità di chiamare i servizi d'emergenza, chiudere gli accessi, trasmettere messaggi tramite i segnali radio e cartellonistica dedicata, indicare le uscite d'emergenza, chiamare il carroattrezzi, etc.

Gli impianti AID sono in grado di fornire informazioni in tempo reale sul flusso, il volume e la velocità del traffico. I sistemi AID possono registrare le immagini all'origine dell'evento ed interagire

con altri sistemi come il sistema di supervisione, controllo e acquisizione dei dati (SCADA Supervisory Control And Data Acquisition System).

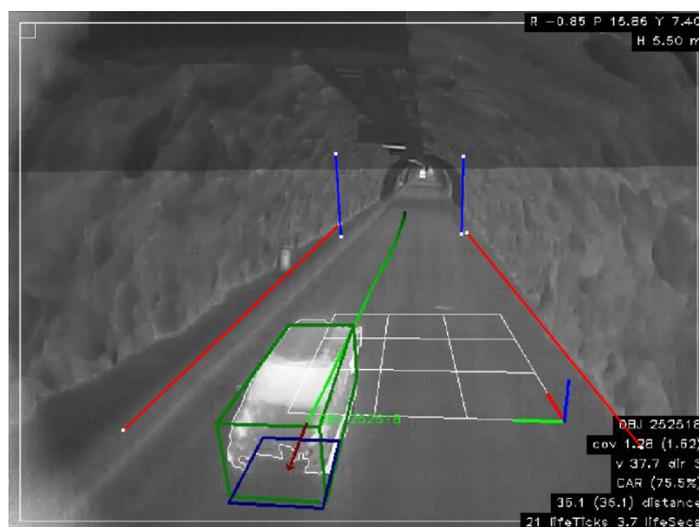


Figura 58: Fermo immagine trasmesso da un sistema AID. Scanmatic

Nel progettare e mettere in funzione un sistema AID è necessario prestare attenzioni al problema delle ostruzioni, per ovviare a questo la maggior parte dei fabbricanti di rilevatori consiglia l'utilizzo di due rilevatori che coprono la stessa area da angolazioni diverse, ad esempio installando un rilevatore per ciascuna direzione della galleria. Possono anche essere necessarie più telecamere per scopi di ridondanza ad esempio per evitare le problematiche relative al gusto di una telecamera. In generale, i campi visivi delle telecamere sono progettati per sovrapporsi, così che l'eventuale guasto di una telecamera possa essere compensato dalle immagini delle telecamere adiacenti.

È buona norma collocare le telecamere, se usate per il rilevamento degli incidenti, ad un interasse variabile tra 30 e 150 metri.

Le performance finali di un sistema AID dipendono in larga misura da un'efficace messa in funzione e taratura prima dell'utilizzo vero e proprio. L'esperienza relativa all'installazione dei sistemi AID indica che una messa in funzione e taratura può richiedere diversi mesi.

### 3.4.5 Rilevamento fumo-calore

I sistemi di rilevamento fumo-incendio nelle gallerie stradali sono dimensionati per rilevare il più rapidamente possibile la produzione di fumo e calore, così da attivare tempestivamente l'impianto antincendio e le procedure di sicurezza.

Gli obiettivi principali dei sistemi di allarme fumo-incendio devono essere: informare prima possibile gli utenti della galleria così da consentire loro di organizzare l'auto-evacuazione e l'auto-salvataggio, comunicare al personale operativo tecnico della galleria tutti i possibili parametri relativi all'incendio

così da consentire loro di modificare gli interventi in galleria in base alle procedure d'emergenza e di contattare il personale di soccorso, individuare l'ubicazione dell'incendio o dell'evento allo scopo di fornire indicazioni quanto più precise possibili sia agli utenti e sia al personale di soccorso.

I principi di rilevamento degli incendi si basano sui parametri percepiti e determinati dall'incendio stesso, vale a dire calore, fumo, radiazione e produzione di sostanze chimiche durante la combustione.

Quindi, i sensori di rilevamento di fumo-incendio possono essere classificati in:

- Rilevatori di Calore: tutti i materiali le cui caratteristiche siano sensibili ad un aumento dell'energia termica, ogniqualvolta sia implicato un aumento di temperatura;
- Rilevatori di Fumo: rilevatori che misurano l'estinzione di un raggio luminoso ad infrarossi attraverso aree di ionizzazione CO e CO<sub>2</sub>;
- Rilevatori di Fiamma: rilevatori basati sulla base della loro sensibilità allo spettro di lunghezze d'onda infrarosse e/o ultraviolette;
- Rilevatori Combinati: rilevatori che combinano diversi tipi di sensori;

Ciascuno di questi sensori ha un proprio campo di applicazione specifico, associato ad un tempo di risposta, robustezza, affidabilità, etc.

Generalmente, i rilevatori di incendi nelle gallerie stradali devono essere progettati per resistere a condizioni ambientali disagiati: velocità dell'aria fino a 10 m/s, visibilità ridotta dovuta ai fumi degli scarichi dei veicoli e all'abrasione dei pneumatici con il manto stradale, concentrazioni più elevate di inquinanti (CO, CO<sub>2</sub>, ossidi di azoto, idrocarburi, etc), intensità variabile dei proiettori dei veicoli, calore dei motori e gas di scarico dei veicoli che rilasciano fumi caldi, interferenze elettromagnetiche, traffico veicolare misto che determina ostruzioni variabili e non prevedibili nelle varie sezioni della galleria.

Risulta, inoltre fondamentale che i rilevatori d'incendio debbano avere un elevato livello di ridondanza e di durabilità contro i guasti. È consigliabile che i sistemi di rilevamento incendi possiedano un certo grado d'intelligenza per evitare falsi allarmi (positivi e negativi), in quanto i falsi allarmi possono comportare una spesa elevata per la loro rettifica e, ancora peggio, possono scoraggiare gli operatori dal prestare loro attenzione.

È altrettanto indispensabile che l'installazione d'allarmi e di rilevamento incendio abbiano un prezzo ragionevole, bassi costi operativi e siano di facile manutenzione.

L'efficienza del rilevamento incendi non dipende soltanto dal tipo di dispositivi (temperatura, estinzione del raggio luminoso, ionizzazione, etc), ma anche dalla strategia del rilevamento che è stata sviluppata e che include il numero di sensori e il loro livello di sorveglianza nella galleria.

La maggior parte dei rilevatori in uso si basano sul calore e sul tasso di aumento della temperatura. Se ben tarato, questo sistema di rilevamento genera solo pochi falsi allarmi, ma può avere una velocità di reazione lenta. I rilevatori basati sull'oscuramento da fumo danno segnali tempestivi, ma sono più esposti ai falsi allarmi a causa dei fumi di scarico dei veicoli in particolare quelli diesel.

### **3.4.6 Ritrasmissione radio**

Le gallerie sono spazi chiusi confinati e sotterranei che molto spesso non consentono la propagazione delle onde radio dalle emittenti esterne. Per ristabilirne la propagazione, occorre che il tunnel ospiti al suo interno un sistema che permetta la ritrasmissione delle frequenze richieste. Possono quindi essere ritrasmessi: servizi di salvataggio, comunicazioni operative, emittenti pubbliche FM, emittenti pubbliche DAB e frequenze degli operatori di rete cellulare.

Quando si ritrasmettono una o più frequenze radio, viene installato in galleria un dispositivo che permette l'inserimento di messaggi preregistrati. In caso di emergenza, queste emittenti radio sono interrotte e vengono trasmessi dei messaggi riguardanti la galleria, così da fornire agli utenti indicazioni sulle procedure da attuare per salvaguardare la propria e l'altrui vita.

Un impianto di ritrasmissione radio in galleria è composto dalle seguenti componenti: un'antenna, un'unità di trasmissione/ricezione che permette la trasmissione dall'esterno all'interno, un'unità di trasmissione/ricezione che permetta la trasmissione dall'interno all'esterno (solo per i servizi di emergenza) e un'unità radiante in galleria.

### **3.4.7 Altoparlanti**

All'interno delle gallerie stradali non vi sono molti dispositivi che permettono di rivolgersi direttamente all'utente per comunicare informazioni o per chiedere agli utenti della galleria di comportarsi in un certo modo. Per ovviare a questo ostacolo, alcune gallerie ospitano degli altoparlanti. Nella pratica gli altoparlanti offrono diverse funzionalità, in particolare: altoparlanti installati a distanze fisse in galleria per fornire informazioni e istruzioni agli utenti il cui veicolo sia finito in panne all'interno del tunnel, altoparlanti o sirene installati a distanze fisse all'interno della galleria che emettono un segnale acustico di pericolo, e altoparlanti o segnali acustici installati in prossimità delle uscite d'emergenza, che forniscono agli utenti indicazioni agli avventori sull'utilizzo di un'uscita o sulla sua collocazione.

Al momento, tuttavia, questo tipo di dispositivi non sono ampiamente utilizzati, poiché il loro utilizzo deve essere studiato per ogni singolo caso e spesso risultano e spesso il loro uso è indicato per gallerie molto specifiche (traffico intenso, lunghezza significativa, etc).

## 3.5 Sistemi di Soccorso

Un incidente, a prescindere da dove si verifichi, che coinvolge un veicolo alimentato da carburante alternativo dovrebbe essere gestito dal personale di emergenza in modo del tutto simile a qualsiasi altro incidente, tuttavia è necessario che il personale che provvede a portare i soccorsi sia formato per poter facilmente riconoscere il tipo di alimentazione così da applicare le tecniche più idonee alla soppressione dell'incendio e alla messa in sicurezza delle persone e delle cose.

A tale scopo, per accertare che il veicolo sia alimentato da carburante non convenzionale, sono state sviluppate alcune applicazioni per smartphone, come la svedese “Fordonskoll” e la svizzera “CRS-Crash Recovery System” per permettere ai soccorritori di determinare rapidamente l'alimentazione del veicolo tramite la lettura della targa attraverso, l'accesso alle banche dati della motorizzazione nazionale e extra nazionale. Tuttavia, il loro utilizzo richiede che la targa di immatricolazione sia visibile e ben identificabile, il che non è sempre possibile nel caso di incidenti particolarmente gravi. Ciononostante molti servizi di soccorso sparsi per il mondo non godono ancora di questo tipo di tecnologia smart, quindi sarà compito dei vari legislatori, nel prossimo futuro, introdurre delle norme per contrassegnare le auto in base ai carburanti che utilizzano, come già prevede lo standard volontario ISO 17840 “veicoli stradali - informazioni per il primo e secondo soccorritore”.

L'ISO 17840 è implementato in quattro parti: le prime due riguardano la progettazione di un foglio di salvataggio contenente informazioni per assistere i servizi di soccorso nello svolgimento rapido e sicuro delle operazioni sia per le auto (Parte 1) che per i mezzi pesanti (Parte 2). La Parte 3 ha forma di una guida estesa alla risposta delle emergenze che funziona come un'estensione del foglio di salvataggio, mentre la Parte 4 specifica tramite una legenda i simboli che vengono utilizzati per aiutare i servizi di soccorso ad identificare rapidamente il tipo di carburante utilizzato dal veicolo.

Le gallerie stradali più grandi sono spesso monitorate da personale specializzato addetto alla gestione del traffico e alla gestione del coordinamento dei soccorsi, in un centro di comando e controllo dedicato, che esegue la sorveglianza con l'ausilio di algoritmi capaci di monitorare il traffico e gli eventuali eventi avversi. Tale servizio può fungere da appoggio ai soccorritori, attraverso la pronta comunicazione di informazioni che l'operatore può dare, per esempio suggerendo il tipo di veicoli coinvolti (autovetture, mezzi commerciali, pullman, combustibili convenzionali e non, etc).

Il responsabile dell'intervento di soccorso in loco dovrebbe sempre eseguire una valutazione dei rischi prima di qualunque autorizzazione a procedere così da identificare la migliore strategia d'intervento.

Spesso nelle gallerie nelle situazioni d'emergenza siamo davanti ad un paradosso, in quanto in caso di scenario avverso (avarie, incidenti, incendi, etc) gli utenti sono chiamati all'auto-salvataggio mettendosi in salvo da soli, sapendo tuttavia che l'eventuale loro apporto nel limitare, per esempio, un incendio nelle sue prime fasi potrebbe fare un'enorme differenza in termini di limitazione dei danni, permettendo al personale di soccorso di arrivare in loco in tempo per estinguere l'incendio senza che esso si sia sviluppato all'interno tunnel con esiti catastrofici.

Allo stesso tempo è durante le prime fasi di un incendio che il suo sviluppo può essere maggiormente contrastato. A tale scopo, oltre all'uso degli estintori a mano, sono state introdotte sul mercato delle coperte antincendio per veicoli, che consentano agli automobilisti di rallentare lo sviluppo dell'incendio, facilitando l'intervento dei servizi di soccorso al loro arrivo. Le coperte antincendio per veicoli sono realizzate utilizzando materiali in grado di resistere al fuoco e le schegge. Queste possono essere ugualmente utilizzate in diversi scenari tra cui parcheggi e gallerie.

Il personale che non è addestrato professionalmente per agire in situazioni di emergenza, può essere comunque formato all'impiego delle coperte durante le emergenze; a prescindere da questo, nelle aree d'emergenza dovrebbero essere sempre disponibili chiare istruzioni in modo che anche gli utenti più inesperti e meno formati possano facilmente farne uso degli strumenti di primo soccorso disponibili.

### **3.5.1 Soccorso di un veicolo a gas**

Durante gli incidenti di veicoli a gas, i servizi di soccorso spesso non osano adottare una strategia aggressiva di soccorso, ovvero avvicinarsi al fuoco ed iniziare a spegnerlo, a causa dei rischi che comportano i contenitori di gas in pressione, invece generalmente adottano una strategia difensiva basata sul distanziamento dall'area soggetta all'incendio così da attendere che il fuoco si esaurisca da solo. Questa strategia risulta fallace nel caso di gallerie e parcheggi sotterranei, dove esiste il rischio concreto che l'incendio si propaghi ad altri veicoli o a parti della struttura in tempi relativamente brevi.

Per ridurre sensibilmente il rischio di esplosione, le auto alimentate a gas sono dotate di valvole di sicurezza che permettono il rilascio del gas raggiunti i 110°C. Questi sistemi sono posizionati vicino alle valvole delle bombole e forniscono una protezione abbastanza affidabile dall'eventuale pericolo di un'esplosione, causata dal riscaldamento del recipiente a pressione.

Quando interviene la valvola di rilascio permettendo il rilascio del gas, può verificarsi una fiamma a getto capace di incendiare gli oggetti nelle vicinanze. Se questa fiamma di rilascio dovesse colpire il serbatoio di gas di un altro veicolo a gas adiacente, potrebbe verificarsi un effetto domino con la

conseguente esplosione del serbatoio investito dalla fiammata aumentando la portata dell'incendio. Lo scenario appena proposto è comunque un evento assai improbabile a causa del numero esiguo di autoveicoli a gas attualmente in circolazione, quindi la probabilità che due di essi siano parcheggiati vicini o siano uno di seguito all'altro durante il transito in galleria è davvero minima.

Inoltre, la valvola limitatrice di pressione di un serbatoio a gas dovrebbe essere orientata in modo tale da non costituire una fonte di rischio per i veicoli adiacenti, così da impedire la propagazione dell'incendio. Eventuali scenari di questo tipo possono verificarsi con minore rarità in caso di grandi veicoli come autobus o camion pesanti.

Come per i veicoli elettrici anche i veicoli alimentati a gas necessitano di un diverso approccio per provvederne lo spegnimento in caso d'incidente che causi incendio. Le linee guida in materia sono simili da paese a paese, di seguito elencheremo le procedure adottate dall'MSB (Swedish Civil Contingencies Agency) per trattare le auto a gas nei siti soggetti ad incidenti interni ed esterni:

1. Delimitare una zona "calda" di 10 m intorno al veicolo durante un incidente stradale esterno, estendere a 50 m il raggio in un ambiente interno.
2. Equipaggiarsi per l'intervento indossando indumenti protettivi, respiratore ad aria compressa ed esplosimetro.
3. Utilizzare apparecchiature di comunicazione ed illuminazione adatte alle zone Atex (EX).
4. Nel caso l'incendio coinvolga veicoli in ambienti interni (gallerie, garage, etc), è raccomandato che le operazioni di soccorso siano apportate principalmente dall'esterno della struttura, a meno che non sia necessario intervenire direttamente sul mezzo per salvare vite umane.
5. In caso di operazione interna è necessario che tutte le aperture della struttura siano aperte in modo tale da dissipare i fumi e le sostanze di combustione.
6. Negli ambienti interni è consigliato l'uso di dispositivi di protezione supplementari come l'autopompa corazzata che possiede maggiore resistenza al calore, alle onde d'urto e alla proiezione di schegge.
7. Nel caso di parcheggio multipiano il sistema di drenaggio in cui si sta verificando l'incendio andrebbe possibilmente spento.
8. L'estinzione consigliata deve essere eseguita raffreddando con acqua il veicolo. L'uso di estintori a polvere secca e i sistemi a schiuma possono risultare idonei in un primo momento per estinguere l'incendio sul nascere, ma risultano inefficaci per il raffreddamento.

9. Le fiamme a getto non devono mai essere estinte ma lasciate libere di bruciare e fatte esaurire da sole; è importante che venga misurata la concentrazione di gas nei punti più alti, ossia sul lato posteriore del veicolo e all'interno del vano motore.
10. È buona norma prestare attenzione ad eventuali suoni sibilanti che possano confermare la presenza di una perdita.
11. Evitare di raffreddare le valvole di rilascio perché si potrebbe impedire di farle scattare, portando il serbatoio a livelli critici, aumentando la probabilità che si verifichi un'esplosione.
12. Mettere in sicurezza eventuali contenitori di gas che sono stati esposti al fuoco, ma le cui valvole di rilascio di massima pressione non siano entrate in azione.

### 3.5.2 Soccorso di un veicolo elettrico

Le operazioni di soccorso che coinvolgono veicoli elettrici si riconducono ai rischi riferiti ai sistemi ad alta tensione, sia nel caso di veicoli ibridi sia in quello di veicoli totalmente elettrici.

Questi rischi “diversi” rispetto ai tradizionali rischi legati ai mezzi a combustibile tradizionale necessitano di procedure dedicate. Ciascuno paese negli ultimi anni ha messo insieme protocolli e procedure d'intervento specifiche per questi nuovi scenari.

Il CFSL (la commissione federale svizzera sul coordinamento per la sicurezza sul lavoro) fornisce delle linee guida al fine di operare con il miglior livello di sicurezza possibile in veicoli con sistema di alimentazione di alta tensione. In particolare, di seguito, vedremo le raccomandazioni che devono adottare i soccorritori nel caso di incidente che coinvolga un veicolo elettrico:

1. Identificare i veicoli dotati di sistemi ad alta tensione: localizzare le denominazioni del tipo Hybrid, Electric Drive, Plug – in, etc. Consultare le schede di soccorso delle diverse marche di veicoli, se disponibili sono visualizzabili con il codice QR o sul sito [www.schede-di-soccorso.ch](http://www.schede-di-soccorso.ch). Oppure identificare mediante targa di immatricolazione.
2. Impedire qualsiasi contatto con il veicolo. Sbarrare l'area, contrassegnare il veicolo e avvertire gli interessati.
3. Predisporre una triplice protezione antincendio (Acqua, schiume, polvere).
4. Sfilare la chiave di accensione e rimuoverla dall'abitacolo.
5. Immobilizzare il veicolo utilizzando le calzatoie.
6. Staccare la batteria a 12V e isolare i morsetti così da impedire che il veicolo “si muova da solo”.
7. Disinserire il sistema ad alta tensione, in conformità alle istruzioni del fabbricante e/o alla scheda di soccorso.

8. Controllare lo stato meccanico della batteria ad alta tensione e rilevare la formazione di calore con la telecamera termica.
9. Non toccare i cavi arancioni e i componenti ad alta tensione senza protezioni.
10. Istruire il personale di soccorso su come operare correttamente con i veicoli dotati di sistemi ad alta tensione.
11. Indossare i DPI specifici.
12. In caso di consegna a terzi, comunicare le misure prese e farle confermare per iscritto (verbale di consegna).
13. Trasportare il veicolo con batteria danneggiata all'officina specializzata più vicina e, se possibile, far scaricare la batteria. Monitoraggio permanente all'aumento di temperatura tramite telecamera termica poiché esiste il rischio di riaccensione della batteria. Se la temperatura nelle celle della batteria supera i 190°C e continua a salire, può verificarsi un'a fuga termica.
14. Non inalare fumo e gas combustibili. Utilizzare un apparecchio di protezione delle vie respiratorie.
15. Spegnere l'incendio preferibilmente con acqua (effetto raffreddante ed estinguente sull'accumulatore ad alta tensione). Distanze da rispettare: 3m per il getto polverizzato e 5m per il getto pieno.

La differenza sostanziale tra un incendio di un veicolo a elettrico ed uno tradizionale risiede nella maggiore quantità di agente estinguente. Inoltre, gli agenti estinguenti utilizzati sono contaminati dai prodotti della combustione delle batterie agli ioni di litio e quindi necessitano di essere smaltiti correttamente in modo da non causare danni all'ambiente.

Un'area poco esplorata è il livello di tossicità dei gas d'incendio e il conseguente livello di protezione che l'abbigliamento protettivo dei vigili del fuoco può garantire da questo "nuovo fuoco tossico". Al momento, nessuna prova mostra che il fumo proveniente da un veicolo elettrico in fiamme sia più tossico di quello di un veicolo tradizionale; d'altra parte, nulla suggerisce che gli attuali indumenti protettivi siano sufficienti per proteggere i vigili del fuoco dai fumi tossici creati dai veicoli convenzionali. Prodotti tossici come il fluoruro di idrogeno, che si forma durante gli incendi di veicoli elettrici, vengono rilasciati anche durante la fuga termica nelle batterie e può risultare difficile da rilevare.

# Capitolo 4 Analisi Quantitativa

## 4.1 HRR - Heat Release Rate

La curva HRR (Heat Release Rate) che in italiano si traduce in Curva di Rilascio Termico è la variazione della potenza di rilascio termico in una reazione di combustione, espressa in KW, e calcolata in relazione al combustibile, alle condizioni di ventilazione e alle caratteristiche geometriche del materiale.

HRR può anche essere definita come la velocità di bruciamento/combustione in quanto il KW equivale al MJ/s.

Maggiore è il valore di  $HRR_{MAX}$ , più il materiale combustibile brucia velocemente e, di conseguenza, maggiore sarà la produzione di fumo e calore. Con l'esaurirsi della combustione, l'HRR inizia a decrescere.

L'HRR prevede due tipi di rappresentazione sul diagramma cartesiano:

1. Trapezio Scaleno (la base è l'ascissa): l'incendio prevede una fase stazionaria;
2. Curva: l'incendio non prevede una fase stazionaria;

l'HRR possiede comunque un andamento generale caratterizzato da una prima fase di crescita (innesco - crescita - flashover) e da una seguente fase di picco o stazionaria e da una susseguente fase di decadimento.

L'Euro Codice 1 nel caso dell'incendio di un edificio, controllato dalla ventilazione, fornisce l'espressione matematica per calcolare l'HRR. Tale grandezza non è influenzata solamente dalle proprietà intrinseche del materiale, ma anche da molte altre caratteristiche.

Dal punto di vista fisico l'HRR è la grandezza deputata a determinare il calore rilasciato dalla combustione di un materiale per unità di tempo, per unità d'area (unità di peso/unità di volume) e può essere calcolato in base alla seguente unità di misura:

$$\frac{1W}{cm^2} = \frac{24cal}{cm^2 * s} = \frac{10 KW}{m^2} = \frac{0.88 Btu}{ft^2 * s}$$

### 4.1.1 Stima della Curva HRR-tempo

Il codice di prevenzione incendi, entrato in vigore tramite il D.M. 3 agosto 2015, descrive il metodo per costruire le curve HRR da utilizzare con un modello d'incendio numerico avanzato, per valutare le capacità portanti, in condizioni d'incendio, delle opere da costruzione oppure per valutare la portata

di fumo emessa durante l'incendio per la progettazione dei sistemi SEFC (sistemi di evacuazione fumo e calore).

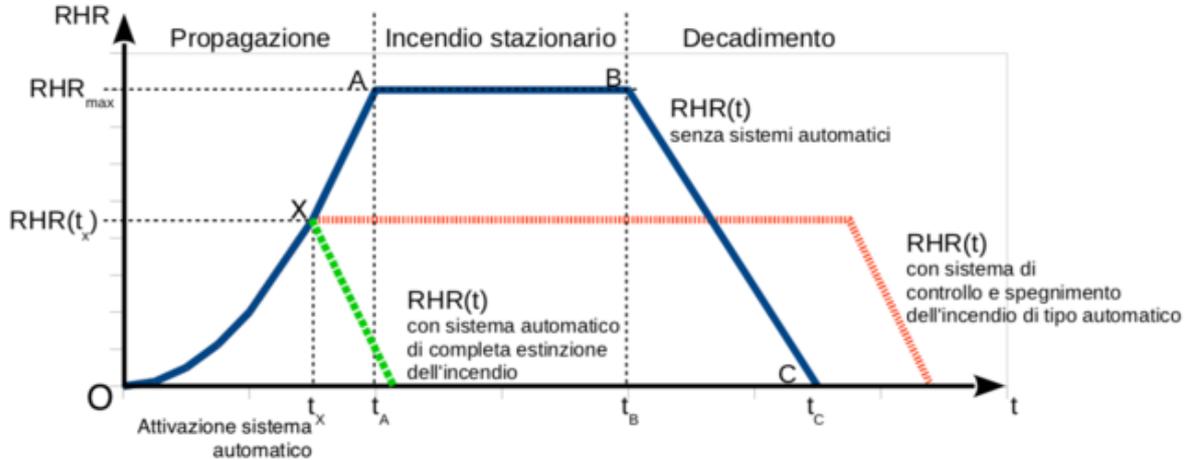


Illustrazione M.2-1: Fasi dell'incendio

Figura 59: Grafico dell'andamento tipico di un incendio: propagazione, incendio stazionario e decadimento. FSE VVF

La curva HRR, come prima anticipato, può essere descritta per fasi:

### FASE 1-Propagazione dell'Incendio:

Durante la fase di propagazione, la potenza rilasciata dall'incendio al variare del tempo rappresenta la HRR(t), e può essere definita dalla seguente espressione:

$$HRR(t) = 1000 \left( \frac{t}{t_0} \right)^2 \text{ per } t < t_A \quad [\text{KW}]$$

t = tempo, [s];

$t_0$  = tempo necessario affinché la potenza termica rilasciata raggiunga il valore di 1000 KW, [s];

Per alcune attività, il valore  $t_0$  può essere estrapolato dalle tabelle dell'Appendice E dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2; Per attività non rientranti nell'appendice si può determinare il  $t_0$  attraverso considerazioni basate sul giudizio esperto per analogia.

Effetto dei sistemi automatici di controllo ed estinzione dell'incendio:

1. Se presso l'attività sono previsti sistemi di controllo e spegnimento dell'incendio di tipo automatico (es. impianti sprinkler, etc), l'andamento della potenza termica di rilascio HRR(t) non raggiunge il valore massimo HRR<sub>MAX</sub>, che avrebbe potuto raggiungere in relazione alle condizioni del combustibile ed a quelle ambientali, ma può essere assunta costante e pari

- al valore di HRR ( $t_x$ ) raggiunto all'istante  $t_x$  di entrata in funzione dell'impianto automatico. Tale valore permane per un intervallo di tempo pari alla durata di alimentazione prevista per l'impianto, entro cui si presume che l'incendio controllato venga definitivamente estinto mediante l'intervento manuale.
2. Se nell'attività sono invece previsti sistemi automatici di estinzione completa dell'incendio (es. ESFR, Water Mist, etc), il loro effetto deve essere valutato caso per caso in relazione alla loro efficacia e all'affidabilità di funzionamento.
  3. A differenza dell'attivazione dei sistemi automatici, l'intervento manuale effettuato dalle squadre di soccorso antincendio non può essere considerato in fase progettuale ai fini della modifica dell'andamento della curva HRR(t).

#### **FASE 2-Fase dell'Incendio Stazionario:**

1. Nella maggior parte dei casi l'energia termica presente nel compartimento antincendio è sufficiente a produrre la condizione di flashover e si ipotizza che, anche dopo il flashover, la curva cresca con andamento ancora proporzionale a  $t^2$  fino al tempo  $t_A$  che corrisponde alla potenza massima ( $HRR_{MAX}$ ) rilasciata dall'incendio nello specifico compartimento antincendio.
2. Se nell'attività non sono previsti sistemi per lo spegnimento automatico, si suppone che dal tempo  $t_A$  fino a  $t_B$  la potenza termica prodotta dall'incendio si stabilizzi al valore massimo  $HRR_{MAX}$ :

$$HRR(t) = HRR_{MAX} \quad \text{per } t_A \leq t \leq t_B$$

3. Se lo sviluppo dell'incendio risulta controllato dal combustibile, come accade all'aperto o in edifici con elevata superficie di ventilazione, il valore di  $HRR_{MAX}$  può essere fornito dalla seguente espressione:

$$HRR_{MAX} = HRR_f A_f$$

4. Se lo sviluppo dell'incendio risulta limitato dal valore della superficie di ventilazione, come generalmente si verifica in edifici con superficie di

ventilazione ordinaria, allora il valore di  $HRR_{MAX}$  deve essere ridotto in conseguenza della qualità di comburente disponibile che può affluire dalle superfici di ventilazione presenti nella fase post-flashover. In tal caso, se le pareti dei compartimenti presentano solo aperture verticali, è possibile determinare il valore di  $HRR_{MAX}$  ridotto tramite la seguente espressione semplificata:

$$HRR_{MAX} = 0.10 m H_u A_v \sqrt{h_{eq}}$$

dove:

m: fattore di partecipazione alla combustione di cui al punto S.2 del D.M. 3/8/2015;

$H_u$ : potere calorifico inferiore del legno pari a 17500 KJ/Kg;

$A_v$ : area totale delle aperture verticali su tutte le pareti del compartimento [m<sup>2</sup>];

$h_{eq}$ : l'altezza equivalente delle aperture verticali  $h_{eq}$  si calcola con:  $h_{eq} = \frac{\sum i A_{v,i} h_i}{\sum i A_{v,i}}$

$A_{v,i}$ : area dell'apertura verticale i-esima [m<sup>2</sup>]

$h_i$ : altezza dell'apertura verticale i-esima [m]

Se invece, le pareti del compartimento presentano anche aperture orizzontali (ad es. SEFC), l'eventuale riduzione del valore di  $HRR_{max}$  deve essere valutata con modelli più sofisticati, ad esempio i modelli di campo di simulazione dell'incendio considerando tutte le superfici di ventilazione aperte sin dall'innesco dell'incendio.

$$t_A = \sqrt{HRR_{MAX} \frac{t_a^2}{1000}}$$

5. La fase d'incendio stazionaria termina al tempo  $t_B$ , tempo d'inizio della fase di decadimento, in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile  $q_{f,d} * A_f$  è stata rilasciata nel compartimento antincendio. Il valore dell'energia  $q_{f,d}$  è il carico d'incendio specifico di progetto.
6. Se l'energia termica iniziale disponibile è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione e raggiunga la potenza massima  $HRR_{MAX}$ , cioè:

$$70\% q_{f,d} A_f \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^2$$

il secondo termine indica l'area sottesa (integrale) alla curva nel tratto iniziale quadratico in questo caso il tempo  $t_B$  di fine della fase di incendio stazionario si calcola con la seguente espressione:

$$t_A t_A + \frac{70\% q_{f,d} A_f - \frac{1}{3} \frac{1000 \cdot 2}{t_A^2} t_A}{HRR_{MAX}} \quad [s]$$

$q_{f,d}$ : è il carico d'incendio specifico di progetto.

7. Se l'energia termica iniziale disponibile non è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione, la curva HRR raggiunge il valore massimo per qualche secondo per poi passare direttamente alla fase di decadimento.

### FASE 3-Fase di decadimento:

1. Il tempo  $t_C$  trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento è consumato il restante 30% dell'energia termica disponibile:

$$t_C = t_B + \frac{2 \times 30\% q_{f,d} A_f}{HRR_{MAX}} \quad [s]$$

2. Durante la fase di decadimento l'andamento della potenza prodotta dall'incendio è lineare e quindi:

$$HRR(t) = HRR_{MAX} \frac{t_C - t}{t_C - t_B} \quad \text{per } t_B \leq t \leq t_C \quad [kW]$$

Qualora la definizione della fase di propagazione della curva HRR(t) fosse basata esclusivamente sul tempo caratteristico  $\alpha$ , ritenuta non rappresentativa della reale evoluzione dell'incendio durante la fase di propagazione (in particolare negli edifici civili), si renderà necessaria una più dettagliata definizione della curva di crescita dell'incendio, con specifica attenzione alla propagazione dell'incendio e poi della combustione, che rappresentano fenomeni di maggiore interesse per i problemi di salvaguardia della vita.

Il progettista può quindi valutare le possibilità che l'incendio si propaghi dagli oggetti già coinvolti dalle fiamme ad altri elementi combustibili, per mezzo di un'appropriata valutazione del rischio d'incendio. Tale valutazione deve essere giustificata da un'analisi quantitativa. Esempi di tale approccio sono affrontati nella NFPA 92B e NFPA 555, questi documenti riportano alcune correlazioni impiegabili per verificare se, nelle prime fasi di sviluppo di un incendio, la potenza termica rilasciata da un oggetto incendiato possa provocare la propagazione dell'incendio ad altri oggetti per effetto dell'irraggiamento termico, in relazione alla tipologia dei materiali e alla distanza che li separa dagli oggetti già innescati.

La Curva HRR può essere così ricostruita nel seguente modo:

1. Ipotizzare il materiale combustibile iniziatore dell'incendio;
2. Valutare la sequenza con la quale i diversi elementi combustibili presenti nell'ambiente vengono coinvolti nella propagazione dell'incendio;
3. Calcolare la Curva HRR(t) complessiva, per somma dei contributi nel tempo dei singoli oggetti;

Le curve HRR(t) di molte tipologie di oggetti combustibili presenti negli edifici civili possono essere facilmente reperite in letteratura.

#### **4.1.2 Curve HRR-tempo in base al combustibile alternativo**

Mediante il supporto dei limitati esempi presenti in letteratura, di seguito si cercherà, mediante un approccio qualitativo, di determinare almeno gli ordini di grandezza delle curve HRR degli incendi di veicoli in galleria per ciascun tipo di carburante, dai più acclarati benzina e gasolio, fino ad arrivare ai gas compressi e liquefatti (GPL, CNG, LNG, H<sub>2</sub>) e alle batterie degli EV.

Le curve sotto descritte sono il frutto di una ricerca scrupolosa dell'attuale stato dell'arte degli scenari di incendio in ambienti confinati, come sono le gallerie stradali e i parcheggi sotterranei.

A tal proposito è necessario sottolineare che i grafici provengono da indagini molto diverse: raccolte di campagne sperimentali in tunnel in scala reale, simulazioni CFD, esperimenti in scala, etc. inoltre, la ricerca si è incentrata sugli HRR che avevano come evento iniziatore una collisione tra veicoli capace di causare perdite e rilasci così da valutare l'influenza alla curva d'incendio a seconda del tipo di combustibile.

Questa diversa natura e provenienza dei dati rende non molto attendibili i successivi confronti ma permette comunque di quantificare i rischi a cui gli utenti di una galleria o di un parcheggio sotterraneo potrebbero essere esposti.

Le cause principali che possono innescare un incendio in galleria sono quattro:

- Difetto del veicolo;
- Atti di negligenza;
- Incendio Doloso;
- Collisione;

È bene ricordare che la Curva HRR è influenzata dal carico d'incendio e quindi dalla quantità di materiale infiammabile che ogni mezzo intrinsecamente possiede. A tal proposito è necessario ricordare che i rischi d'incendio e la loro pericolosità sono influenzati dal tipo dei veicoli coinvolti

nello scenario d'incidente. Per esempio, l'HRR di picco per un'auto può arrivare a 5-8 MW, per un autobus a 30 MW, e per un veicolo commerciale pesante (HGV) carico 70-200 MW.

In definitiva a seconda del tipo di veicolo coinvolto, della quantità e del tipo del carburante, della geometria e delle condizioni di ventilazione del tunnel, il tasso di rilascio di calore del veicolo può variare da 1.5 MW (moto) ai 200 MW (HGV).

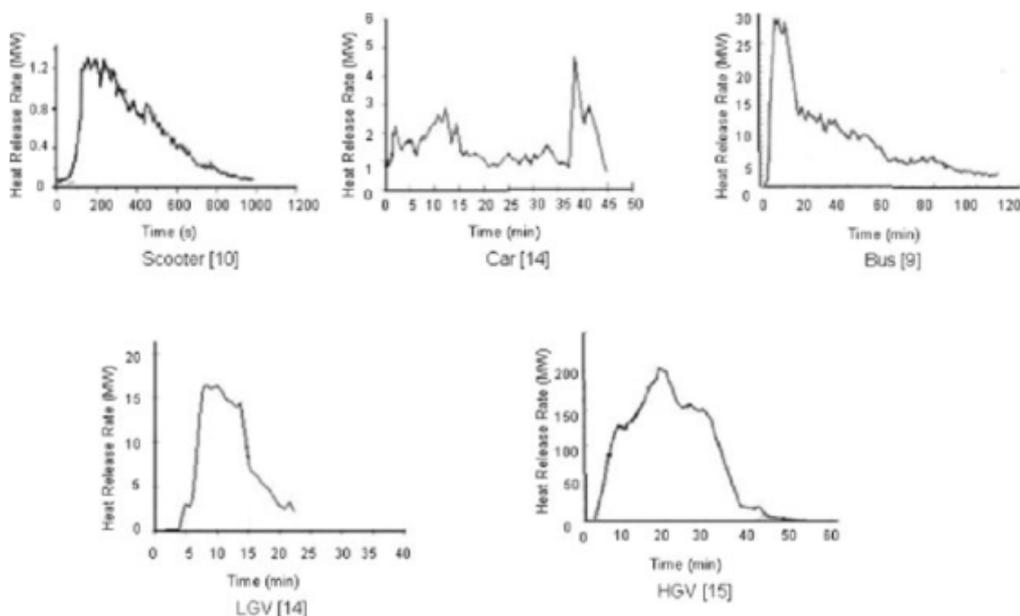


Figura 60: Curve HRR sperimentali dei più diffusi mezzi di trasporto: moto, auto, bus, camion medio e pesante.

Michael Spearpoint

In letteratura è difficile recuperare degli scenari d'incendio che coinvolgono più veicoli in fiamme, quindi per determinare l'HRR complessivo tra più veicoli a seguito di una collisione ci si limita a sommare gli HRR dei singoli veicoli ipotizzando che questi si inneschino nello stesso istante. Questa ipotesi potrebbe fornire dei risultati più prudenti rispetto al caso in cui l'incendio sia in grado di propagarsi da un veicolo all'altro.

Il grafico sottostante mostra possibili curve HRR frutto di collisioni tra mezzi diversi, ottenute sommando le curve HRR dei singoli veicoli:

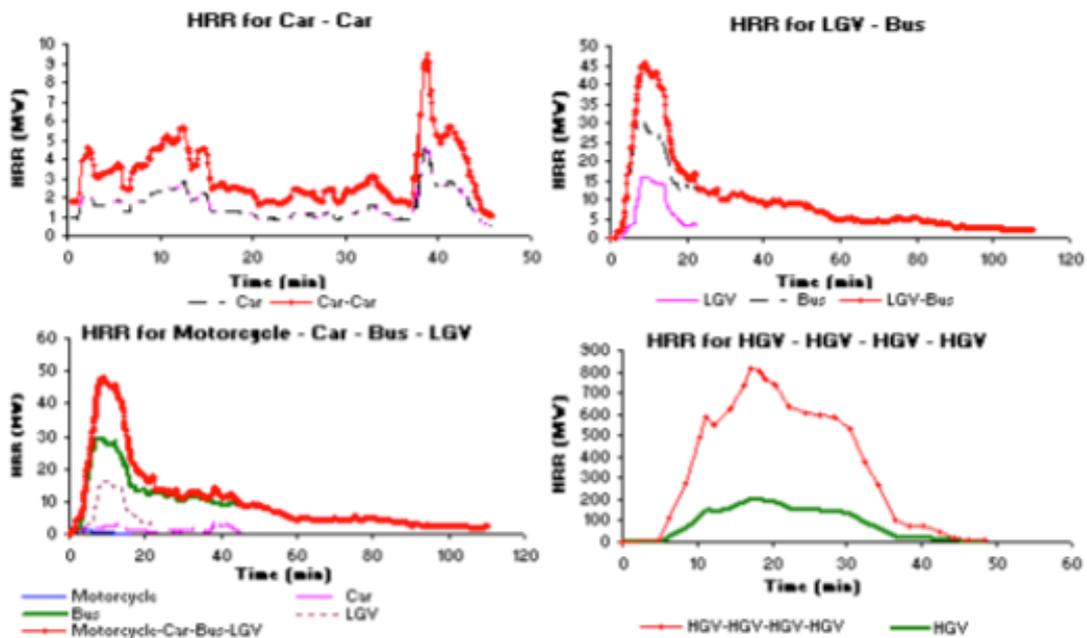


Figura 61: Grafici di simulazioni di incendi con più mezzi coinvolti. Design Fires for Vehicles in Road Tunnels

Il grafico della Figura sopra mostra quattro casi di collisione frutto delle combinazioni tra diversi mezzi: nel primo caso si vede uno scontro tra auto dove  $HRR_{MAX}$  è di circa 9 MW dopo 40 minuti dall'innesco dell'incendio; nel secondo caso è simulata l'incidente tra un autobus e un veicolo commerciale leggero, qui l' $HRR_{MAX}$  è di 45 MW dopo appena 20 minuti dall'accensione del fuoco; nel terzo caso si ipotizza un incidente tra una moto, un'auto, un autobus e un veicolo commerciale leggero, l' $HRR_{MAX}$  è di circa 50 MW dopo 10 minuti dall'innesco; infine nel quarto caso si realizza una collisione tra quattro veicoli commerciali leggeri, qui l' $HRR_{MAX}$  è di 800 MW dopo 20 minuti dall'accensione.

### 4.1.3 HRR Veicoli a combustione interna

Per veicoli a combustione interna (ICE) si intendono i mezzi alimentati da combustibili liquidi come la benzina e il gasolio. Questi combustibili, se pur entrambi infiammabili, se innescati presentano caratteristiche fisiche diverse. Il rischio caratterizzato da un rilascio di benzina, a seguito di una collisione in un'ambiente confinato, è notevolmente maggiore rispetto ad uno di gasolio, a causa dei vapori maggiormente infiammabili che la benzina genera una volta rilasciata.

Un HRR esemplificativo delle auto alimentate a combustibile liquido tradizionale è ricavabile dall'RTV (Regola Tecnica Verticale) del D.M. 15/05/2020 che revisiona la normativa in tema autorimesse. Nonostante le dinamiche di ventilazione tra un tunnel ed una autorimessa sotterranea

siano diverse, sono comunque due ambienti confinati sotterranei che limitano o amplificano l'incendio a seconda delle variabili in gioco.

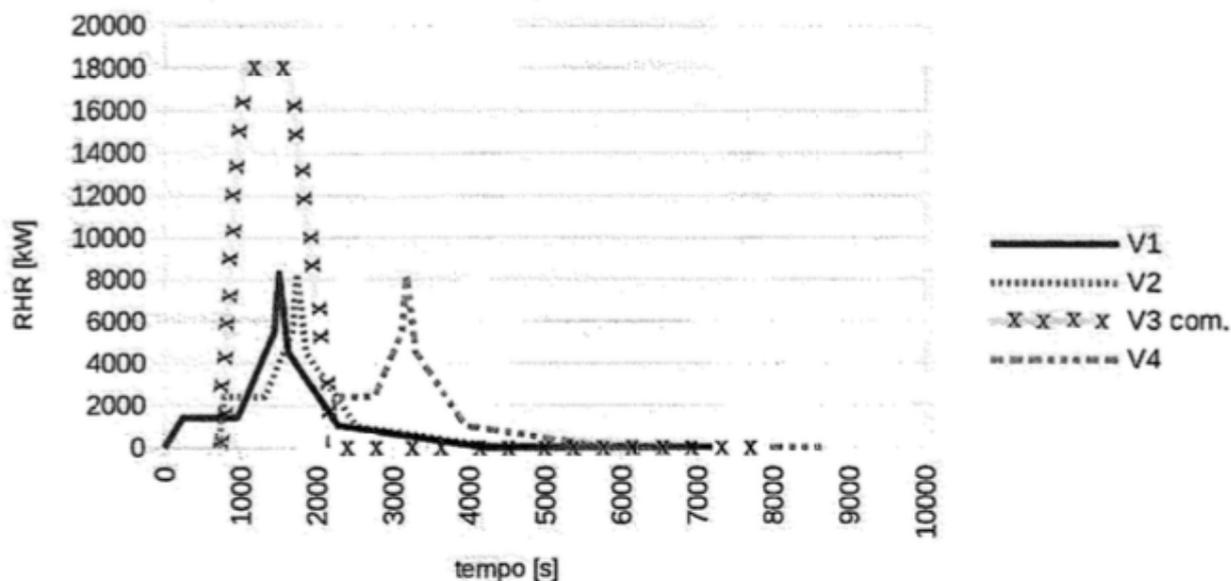
Le curve HRR qui considerate mostrano il rilascio di energia in relazione al tempo di una serie di veicoli, auto private e veicoli commerciali leggeri.

Per definire gli incendi naturali di progetto si considerano le curve HRR in cui il tempo è riferito all'istante d'innesco dei veicoli.

RTV autorimesse stabilisce come tempo di propagazione dell'incendio da veicolo a veicolo adiacente possa essere fissato a 12 minuti, data la tipica distribuzione di parcheggio all'interno dell'autorimessa, questa può risultare simile all'incolonnamento di auto in galleria a traffico bidirezionale in caso d'incidente.

Il carico d'incendio ipotizzato, a seconda del tipo di mezzo coinvolto nell'incendio, cambia: per un'auto è di circa 6789 MJ, mentre per un veicolo commerciale leggero è di 18900 MJ.

*Illustrazione V.6-1: Schematizzazione degli scenari di incendio di progetto*



*Illustrazione V.6.2 : Curve RHR(t) per lo scenario S3*

*Figura 62: Diagramma HRR veicoli a combustibile tradizionale nello specifico in una autorimessa. Fseng-Antincendio*

L'HRR sviluppato da un veicolo commerciale leggero risulta più del doppio rispetto ad un normale veicolo leggero: un'auto privata (V1-V2-V3) ha un  $HRR_{MAX}$  di 8 MW dopo circa 20 minuti dall'innesco dell'incendio, mentre un veicolo commerciale leggero (V3) ha un  $HRR_{MAX}$  di 18 MW dopo l'innesco dell'incendio.

I tempi di primo innesco per la curva HRR relativa ad un'auto privata:

Tabella 34: Relazione che lega i tempi di primo innesco con la curva HRR di un'auto privata.

<b>Tempo dopo l'innesco [s]</b>	0	240	960	1440	1500	1620	2280	4200
<b>HRR (t) [MW]</b>	0	1400	1400	5500	8300	4500	1000	0

I tempi di propagazione al successivo veicolo per la curva HRR relativa ad un'auto privata:

Tabella 35: Relazione che lega i tempi di propagazione con la curva HRR di un'auto privata.

<b>Tempo dopo l'innesco [s]</b>	0	60	600	960	1020	1140	1800	3720
<b>HRR (t) [MW]</b>	0	2400	2400	5500	8300	4500	1000	0

I tempi di primo innesco e propagazione al successivo veicolo per la curva HRR relativa ad un veicolo commerciale leggero:

Tabella 36: Relazione tra i tempi di primo innesco e di propagazione (curva HRR di un veicolo commerciale leggero).

<b>Tempo dopo l'innesco [s]</b>	0	300	900	1500
<b>HRR (t) [MW]</b>	0	18000	18000	0

#### 4.1.4 HRR Veicoli a gas compresso e liquefatto

La letteratura presenta una limitata offerta di ricerche e studi sulle curve HRR-tempo che i veicoli a gas compresso e liquefatto sottoposti ad incendio possono sviluppare. Di conseguenza andremo ad osservare diagrammi HRR provenienti da test di combustione non propriamente attinenti al tipo d'indagine di questa tesi. Questo, però, ci permetterà di ricavare dei dati indicativi sui valori di picco dell'HRR comparato tra auto a metano (CH<sub>4</sub>) e a benzina nel primo caso e tra veicoli a LPG e a benzina nel secondo caso.

Il primo grafico, estratto dall'articolo "Prestazioni ed emissioni di un motore a combustione interna a iniezione diretta concepito per il funzionamento congiunto con un sistema di recupero termochimico ad alta pressione" di A. Poran e L. Tartakovsky del 2017, mostra l'andamento delle curve HRR del metanolo, del metano, della benzina, e dell'etanolo.

Le curve HRR sottostanti mostrano l'andamento tipico per diverse varietà di combustibile all'interno del motore endotermico, tuttavia in caso di rilascio causato da un incidente possiamo pensare che la combustione non sia così diversa anche se il fuoco in tal caso è più facilmente governato dalla ventilazione anziché al combustibile.

A differenza delle precedenti curve HRR [MW] – tempo [s], qui le curve sono riportate in un grafico HRR [J/deg] – CAD [deg], e quindi gli HRR<sub>MAX</sub> non possono essere direttamente comparati. È comunque possibile osservare che le curve di rilascio termico tra un veicolo a benzina (verde) ed uno a metano (nera) risultano molto simili, con una leggera maggiorazione in quella a metano.

In definitiva se l' $HRR_{MAX}$  per un veicolo a combustibile tradizionale è di circa 6 MW, possiamo dedurre grazie all'osservazione del grafico, che l' $HRR_{MAX}$  di un veicolo a metano sia circa di 7 MW. Dai test presenti in letteratura sappiamo che l' $HRR_{max}$  di un veicolo a benzina si ha dopo circa 20 minuti dall'innesco, quindi dall'osservazione del grafico il tempo dell' $HRR_{max}$  di un mezzo a metano si ha a 15 minuti dall'innesco.

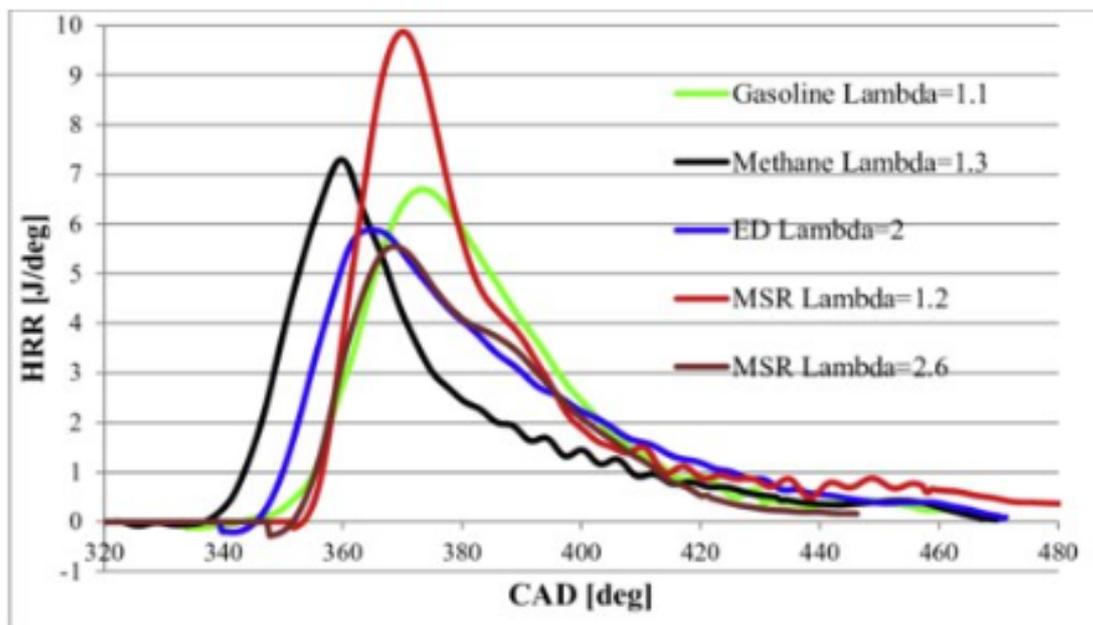


Figura 63: HRR di un motore a combustione interna alimentato da: metanolo, metano, benzina ed etanolo.

Performance and emissions of Direct injection internal combustion engine devised for joint operation with a high-pressure thermochemical recuperation system. A. Paran, L. Tartakovsky

Il secondo grafico confronta l'HRR della benzina con quello del GPL ed è ricavato dall'articolo intitolato "Studio sul miglioramento delle prestazioni e sulla riduzione delle emissioni di motocicli usati con iniezione di carburante che utilizzano bi-fuel benzina-GPL" di Khanh Nguyen Duc e Vinh Nguyen Duy del 2017. Anche qui vale quanto detto per il primo caso. Il grafico confronta le curve HRR di benzina e GPL nelle condizioni di combustione interne al motore endotermico. Per l'uso comparativo necessario in questa tesi facciamo l'ipotesi che l'HRR sviluppato internamente al motore possa mantenere lo stesso ordine di grandezza in caso di rilascio esterno a seguito di un incidente che causa fuoco in galleria.

Di conseguenza l' $HRR_{max}$  del GPL risulta minore di quello della benzina, quindi se l' $HRR_{max}$  di un veicolo a benzina è di circa 6 MW, quello di un veicolo a GPL potrebbe attestarsi a circa 4 MW, mantenendo però lo stesso tempo di 20 minuti dal momento dell'innesco.

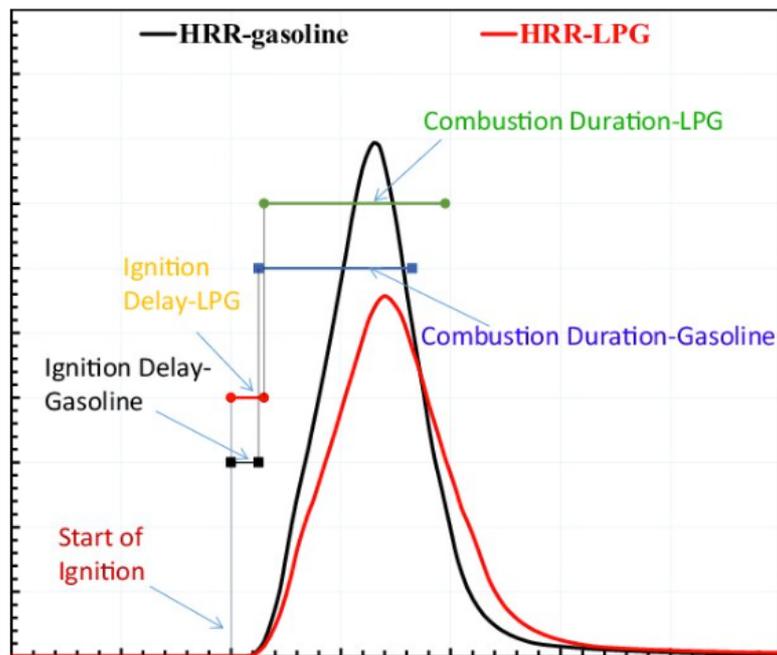


Figura 64:HRR della combustione di un motociclo alimentato a benzina e a GPL.

*Studio sul miglioramento delle prestazioni e sulla riduzione delle emissioni di motocicli usati con iniezione di carburante che utilizzano bi-fuel benzina-GPL” di Khanh Nguyen Duc e Vinh Nguyen Duy*

In conclusione l’HRR<sub>max</sub> di un veicolo a benzina si pone intermedio tra quello di un veicolo a metano, appena maggiore, e quello di uno a GPL, decisamente minore; cambia tuttavia il tempo, dopo l’accensione, in cui si registra l’HRR<sub>MAX</sub>; 20 minuti per i veicoli a benzina e a GPL, mentre si scende a circa 15 minuti per i veicoli a metano.

#### 4.1.5 HRR Veicoli ad idrogeno

Una buona stima per l’HRR di un veicolo ad idrogeno si può ricavare dagli esperimenti antincendio di una bisarca caricata con veicoli FCEV in un tunnel a grandezza naturale – Stima del HRR e del tasso di rilascio di fumi di M. Seike, Y. Ejiri, N. Kawabata e H. Tanaka del 2014. Questo studio si è concentrato sulla stima dell’HRR e dei tassi di rilascio dei fumi generati da una bisarca caricata di veicoli FCEV in una galleria stradale. Lo studio ha confrontato i risultati sperimentali con quelli di una simulazione CFT.

L’HRR di ciascun veicolo è stato calcolato e poi sommato per determinare l’HRR totale. Infine, l’HRR totale della simulazione numerica è stato confrontato con i risultati sperimentali.

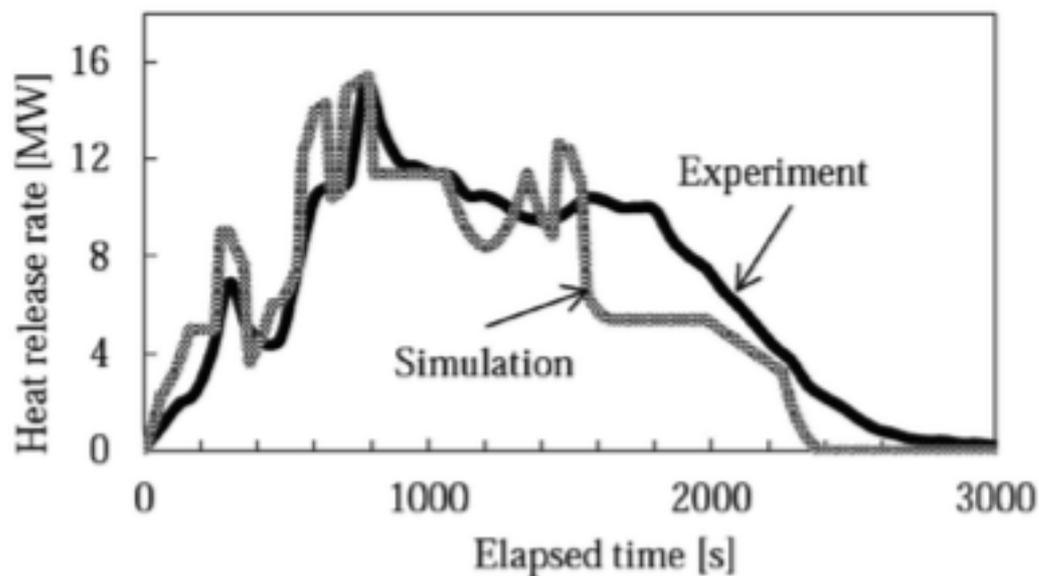


Figura 65: Curve HRR-tempo di un veicolo FCEV: Simulation and Experiment.

Stima del HRR e del tasso di rilascio di fumi di M. Seike, Y. Ejiri, N. Kawabata e H. Tanaka

L'HRR è stato stimato anche attraverso una simulazione numerica. L'HRR di ciascuna auto è stato calcolato e poi sommato per determinare l'HRR totale.

L'HRR totale della simulazione numerica è stato poi confrontato con i risultati sperimentali.

Lo studio di M. Seike, relativo ad un veicolo contenente 43.3 m<sup>3</sup> di idrogeno, ha portato alla quantificazione di una curva HRR che confronta i dati ottenuti dalla simulazione numerica con quelli raccolti sperimentalmente mostrando che in buona parte risultano sovrapponibili, ad esclusione di alcune zone in fase di decadimento.

Analizzando la curva HRR di un veicolo FCEV possiamo individuare un HRR<sub>MAX</sub> a circa 16 MW dopo circa 13 minuti dall'innescio.

La metodologia sopra descritta è stata poi estesa per prevedere l'HRR di una bisarca caricata con otto veicoli FCEV ad idrogeno. L'esperimento ha stabilito che dopo un incendio di 10 minuti, l'HRR della bisarca carica di veicoli FCEV risultava 1.5 volte maggiore dell'HRR di un autobus ad uso passeggeri.

#### 4.1.6 HRR Veicoli Elettrici

Data la recente diffusione dei veicoli a trazione parzialmente e/o totalmente elettrica, la letteratura presenta una limitata offerta d'informazioni soprattutto relative agli scenari incidentali di incendi in galleria stradale.

La tecnologia più venduta sul mercato delle auto elettriche e senza dubbio quella basata sulle batterie agli ioni di litio (Li-ion). A causa dei materiali attivi altamente energetici e degli elettroliti organici infiammabili, le batterie degli EV necessitano di indagini approfondite per indagare il loro comportamento al fuoco, l'impatto sulla crescita dell'incendio, la tossicità dei fumi in un ambiente confinato come è quello delle gallerie.

Per rispondere a queste domande due case automobilistiche francesi nel 2014 hanno condotto dei test per confrontare il comportamento di alcuni modelli di veicolo EV ed ICE di taglia simile sottoposti ad incendio. Lo studio "Comparazione delle conseguenze di un incendio in un veicolo EV e ICE" è stato condotto da A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot e G. Marlair per l'INERIS.

Lo studio ha quantificato i parametri di minaccia termica e tossica che regolano il rischio d'incendio. A tale scopo sono stati misurati sia per il veicolo EV che per quello ICE (di entrambe le case automobilistiche): la velocità di rilascio del calore, il calore effettivo della combustione e le emissioni di gas tossico.

La prova è stata condotta in tunnel di prova e quindi si è potuto regolare la ventilazione (25000 m<sup>3</sup>/h) durante il test simulando al meglio le condizioni di un'autentica galleria.

Lo sviluppo dell'incendio è stato simile per entrambe le tipologie di veicolo: l'incendio si è diffuso all'interno della cellula passeggeri per poi proseguire nella parte posteriore del veicolo e quindi nella parte anteriore del veicolo.

È bene sottolineare che durante il test non si è osservata nessuna esplosione o proiezione relativa alle batterie.

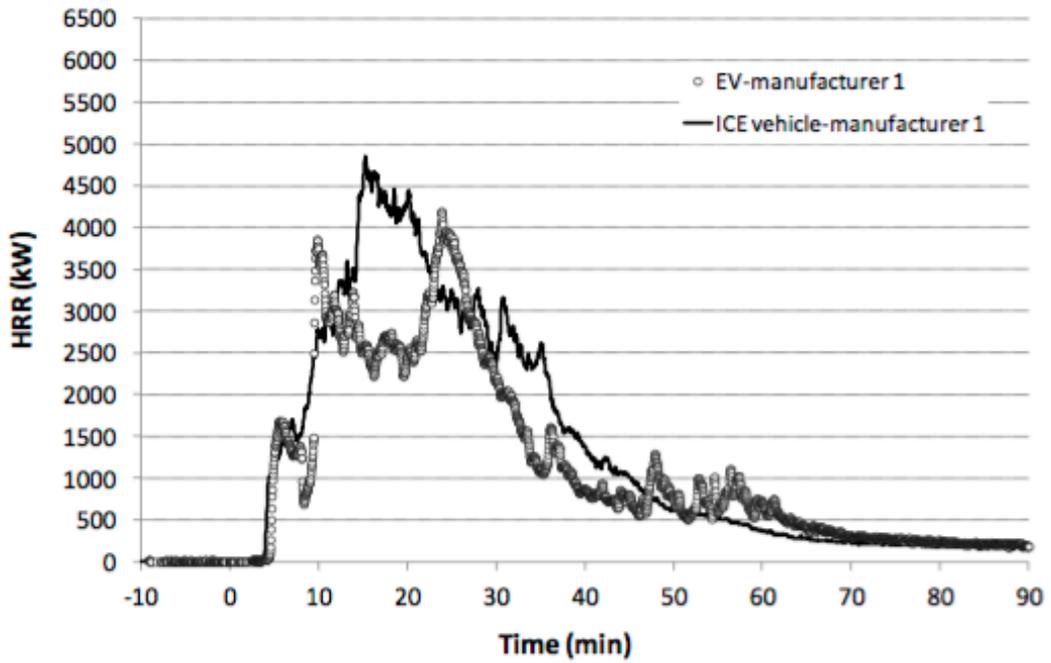


Figura 66: Curve HRR-tempo che confrontano un veicolo ICE ed uno EV di taglia simile.

Comparazione delle conseguenze di un incendio in un veicolo EV e ICE” è stato condotto da A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot e G. Marlairper l’INERIS

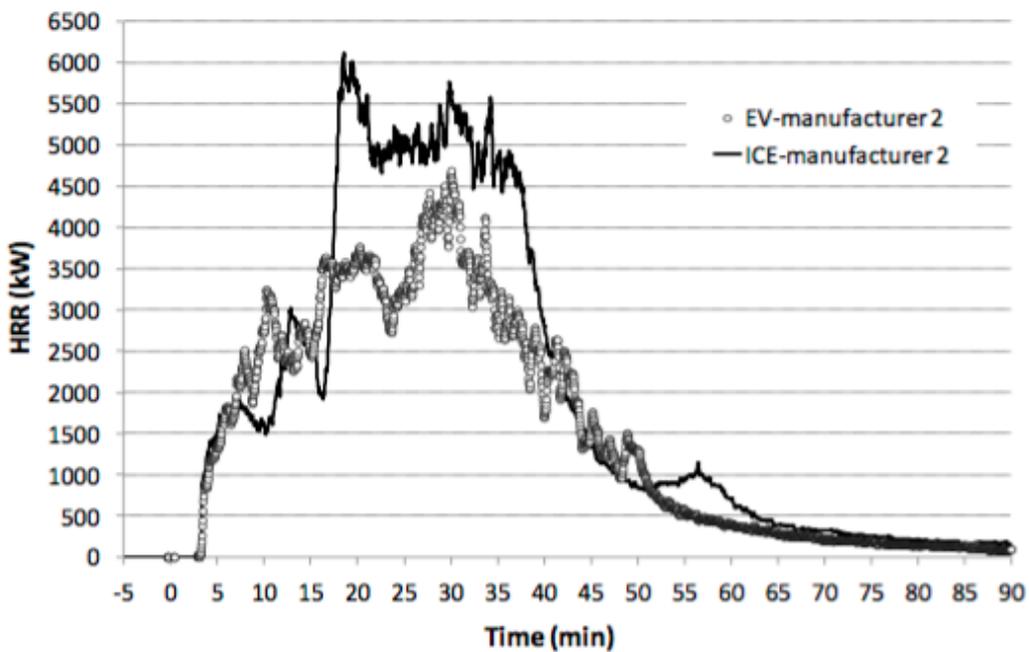


Figura 67: Curve HRR-tempo che confrontano un veicolo ICE ed uno EV di taglia simile.

Comparazione delle conseguenze di un incendio in un veicolo EV e ICE” è stato condotto da A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot e G. Marlairper l’INERIS

Come si può evincere dai due grafici di confronto, tra i veicoli EV e ICE di due diverse case automobilistiche francesi, l'HRR massimo e il calore di combustione efficace dissipato (integrazione del profilo HRR) risultavano simili per entrambe le tipologie di veicolo.

Il confronto tra la crescita dell'HRR rispetto al tempo per i veicoli EV e ICE per il costruttore 1 e per il costruttore 2 sono equivalenti: per la casa automobilistica 1 l'HRR<sub>MAX</sub> è di 4.2 MW per l'EV (i picchi attribuibili alla combustione del pacco batteria compaiono circa 35 minuti dopo l'accensione) e di 4.8 MW per il veicolo ICE dopo 40 minuti dall'innescio; per la casa automobilistica 2 l'HRR<sub>MAX</sub> è di 4.7 MW per l'EV dopo 30 minuti e di 6.8 MW per il veicolo ICE dopo 20 minuti.

I limiti delle curve HRR sperimentali sono da imputare al fatto che l'accensione dell'incendio non scaturisce da un malfunzionamento tecnico o da un incidente, per esempio un rilascio di carburante in un ICE o una fuga termica in un EV, ma da bruciatori a gas propano di circa 6 MW. Quindi, gli andamenti delle curve sono da considerare più attendibili nella parte centrale e conclusiva dello sviluppo dell'incendio e non in quella iniziale d'innescio.

Paradossalmente le curve HRR mostrano picchi maggiori nei veicoli ICE rispetto negli EV, sfatando in parte il mito che le batterie agli ioni di litio possano rappresentare un rischio maggiore per gli utenti dei veicoli elettrici.

I risultati dello studio evidenziano le seguenti dinamiche d'incendio:

- EV: Gli incendi nei veicoli elettrici presentano caratteristiche specifiche, in particolare legate alle batterie agli ioni di litio, che possono portare a una maggiore difficoltà nell'estinzione a causa della possibilità di reazioni di fuga termica. Questa reazione può causare esplosioni o ulteriori incendi all'interno delle celle della batteria, rendendo la gestione dell'incendio più complessa per i soccorritori.
- ICE: Gli incendi in veicoli ICE tendono a coinvolgere principalmente combustibili liquidi (benzina o diesel), che presentano un rischio più elevato di rapida propagazione del fuoco, ma generalmente non provocano esplosioni a meno che non siano coinvolti serbatoi di carburante o altre componenti pressurizzate.

## 4.2 Alberi degli Eventi - ETA

Il report “Fire and explosion hazard of alternative fuel vehicles in tunnel” di Y.Zhen Li del 2018 indaga gli scenari causati da un incidente di un veicolo a combustibile alternativo, di seguito si riporta quanto è emerso dalle analisi ETA per ciascun tipo di combustibile alternativo.

A causa di un incidente possono generarsi danni ai sistemi di stoccaggio del carburante sia nei veicoli a combustione interna (ICE) e sia in quelli elettrici.

Per indagare il tipo di scenario finale che potrebbe generare un incidente come evento iniziatore, viene in nostro soccorso l’ETA (Event Trees Analysis), ossia l’analisi dell’albero degli eventi.

L’albero degli eventi è un modello logico che consente di identificare e quantificare le possibili conseguenze determinate da un evento iniziatore. L’approccio è dunque di natura induttiva e fornisce delle sequenze incidentali. Le conseguenze possono essere dirette (incidente, esplosione, etc) oppure indirette (effetto domino, etc).

La tecnica ETA si distingue in due ambiti di applicazione: pre incidentale e post incidentale.

Gli steps principali nel realizzare una buona analisi ETA prevedono:

- L’identificazione dell’evento iniziatore di interesse;
- L’identificazione delle funzioni di protezione per l’evento iniziatore;
- Costruzione dell’albero degli eventi;
- Descrizione ed analisi delle sequenze incidentali risultanti;

La procedura segue l’evoluzione temporale dei fenomeni a partire da quello iniziatore.

Se sono disponibili dati numerici, la stessa procedura è anche usata per associare ai diversi eventi tassi di frequenza e probabilità. Risulta dunque possibile determinare la probabilità di certe sequenze di eventi allo scopo di decidere le migliori misure di riduzione del rischio.

## 4.2.1 Albero degli Eventi veicolo a combustibile liquido

L'albero degli eventi di un incidente a un veicolo alimentato a combustibile liquido mostra che, in assenza di un incendio esterno, un guasto al serbatoio non causerà né incendi né esplosioni. Tuttavia, in presenza di un incendio esterno, il rischio aumenta. Se si verifica una perdita di carburante da un piccolo foro o si attiva la valvola di rilascio della pressione (PRD), il carburante rilasciato può causare un incendio di pozza (Pool-Fire). Se il carburante è surriscaldato, può evaporare e creare un Jet-Fire. Se i vapori non si innescano subito, possono miscelarsi con l'aria e, in caso di innesco ritardato, causare un'esplosione. Sebbene una detonazione sia improbabile, una deflagrazione può diventare una detonazione in presenza di ostacoli come camion in galleria. All'aperto, il rischio di esplosione è minore.

In caso di malfunzionamento della valvola di sicurezza del serbatoio durante un incendio esterno, il combustibile può evaporare fino a far scoppiare il serbatoio, provocando un BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). Questo può generare una palla di fuoco e un incendio di pozza. Se i vapori non si accendono subito, possono causare una deflagrazione o una detonazione ritardata (DDT).

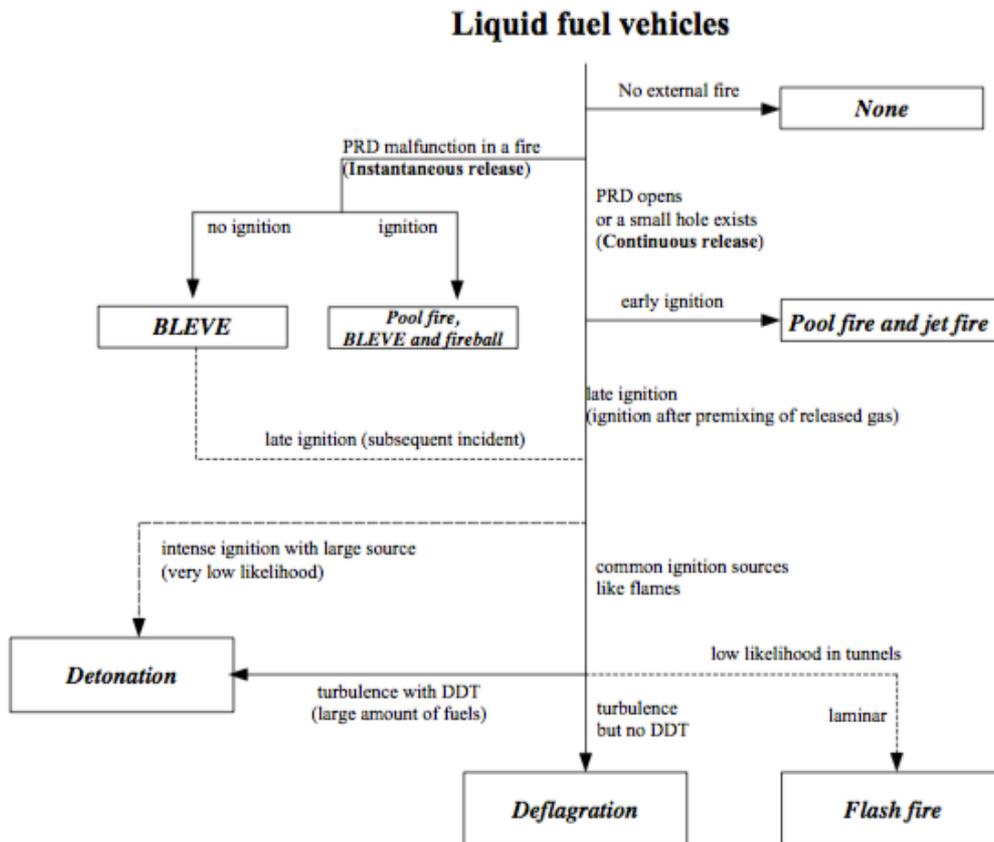


Figura 68: Albero degli eventi combustibili liquidi.

Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels Ying Zhen Li

## 4.2.2 Albero degli Eventi veicolo a combustibile liquefatto

L'albero degli eventi per gli incidenti di veicoli a gas liquefatti risulta molto simile a quello per i combustibili liquidi. Esistono due differenze significative tra questi due alberi. Nel primo caso, con una normale temperatura di funzionamento, un incidente che causi un rilascio di gas liquefatto può provocare un Jet-Fire o un Bleve a causa della bassa temperatura di ebollizione; tuttavia questo scenario non è riconducibile ai serbatoi con combustibile liquido. Nel secondo caso, i serbatoi di gas liquefatto sono generalmente soggetti ai rischi più gravi causati da Jet-Fire, Bleve e VCE, poiché tipicamente dopo il cedimento del serbatoio la maggior parte del combustibile evapora a temperatura ambiente, mentre per i combustibili liquidi almeno una parte resta liquido alimentando un incendio di pozza (Pool-Fire).

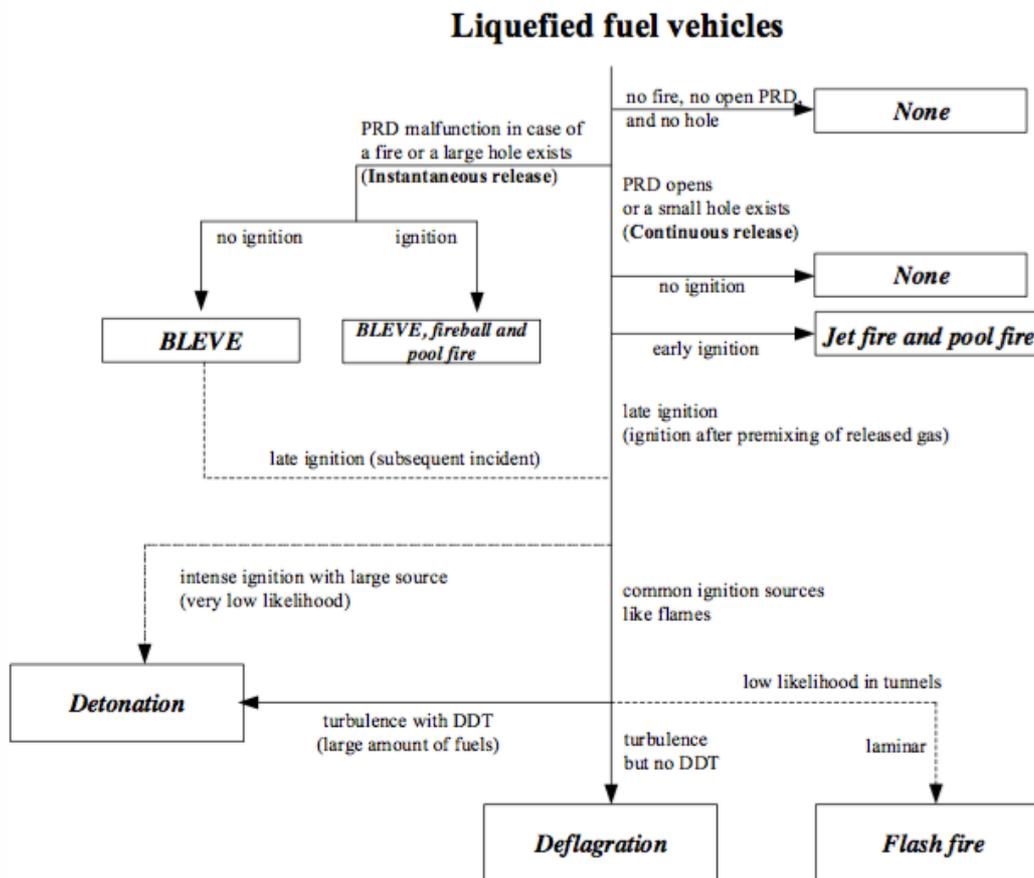


Figura 69: Albero degli eventi combustibili liquefatti.

*Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels Ying Zhen Li*

### 4.2.3 Albero degli Eventi veicolo a combustibile compresso

L'albero degli eventi per gli incidenti dei veicoli a gas compresso risulta molto simile all'albero degli eventi dei veicoli a gas liquefatto. Le principali differenze sono date dall'assenza di incendio di pozza, come pure nessun fenomeno di Bleve successivo alla rottura del serbatoio nei veicoli a gas compresso. Si possono verificare dei Jet-Fire soltanto in caso di immediato innesco del gas compresso dal serbatoio, che sia dal foro di rottura o dalla valvola di sicurezza (PRD).

Esiste la possibilità, anche se remota, nel caso il serbatoio sia surriscaldato dall'incendio circostante che l'apertura della valvola di sicurezza (PRD) risulti insufficiente a rilasciare il volume di gas necessario ad impedire l'esplosione del serbatoio e quindi causandone la rottura e infine un Bleve. Questo genere di problema viene classificato come un malfunzionamento del PRD, tuttavia un gusto di questo tipo è di difficile individuazione e comunque riscontrabile solo in caso di scenario avverso.

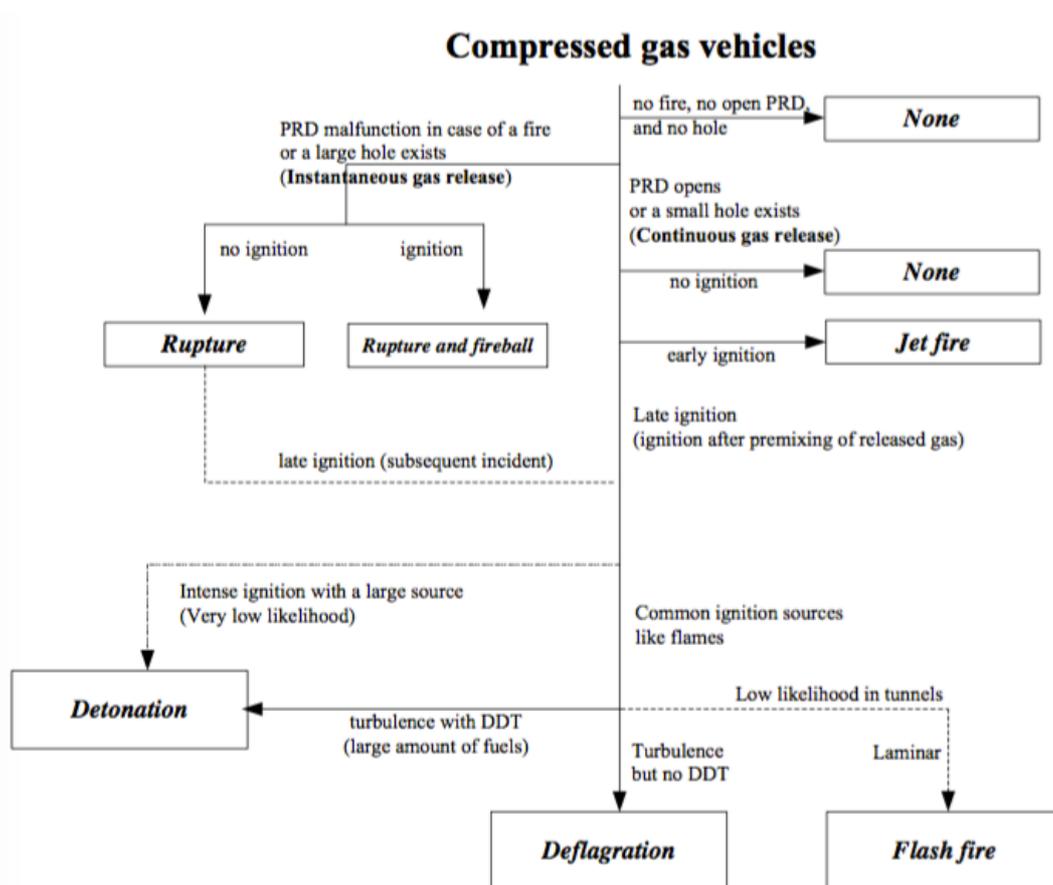


Figura 70: Albero degli eventi combustibili compressi.

*Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels Ying Zhen Li*

## 4.2.4 Albero degli Eventi veicolo a batteria

L'albero degli eventi per gli incidenti dei veicoli elettrici a batteria LIB risulta in parte simile a quello dei tradizionali combustibili, anzi forse presenta meno rischi poiché fenomeni come il Bleve o il VCE sono del tutto assenti. Se l'incidente avvia la fuga termica e le celle LIB iniziano a sfiatare gas caldi infiammabili, questi tendono ad innescarsi immediatamente causando un Jet-Fire e poi un più tradizionale incendio a corpo solido emittente. Questo Jet-Fire risulta però sensibilmente di minor portata ed estensione rispetto a quelli generati dai combustibili gassosi liquefatti o compressi.

Esiste comunque la possibilità che si verifichino delle esplosioni all'interno del vano batteria, per esempio in caso di fuga termica, innesco ritardato e ambiente confinato; tutte condizioni facilmente riscontrabili durante un incidente-incendio in galleria stradale.

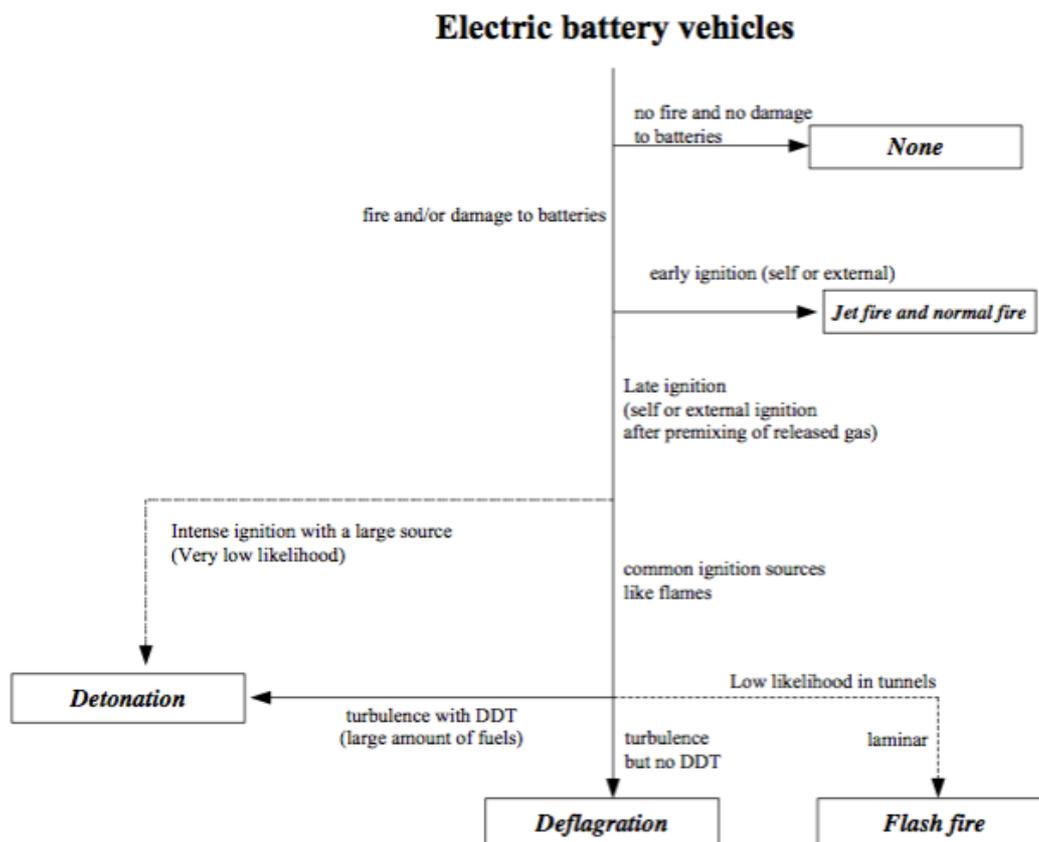


Figura 71: Albero degli eventi batterie.

*Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels Ying Zhen Li*

Ricapitolando, tutti i tipi di combustibile e/o alimentazione utilizzati dagli attuali veicoli in commercio possono generare un incendio improvviso e/o un'esplosione di gas. Tuttavia in una galleria stradale, in caso di perdita da un serbatoio è facile che si formino delle miscele di aria-gas infiammabili la cui combustione può facilmente generare dei fenomeni esplosivi oppure degli incendi istantanei (di pozza e a getto) che si esauriscono senza alcuna sovrappressione.

Al termine dell'analisi ETA, considerando sia i rischi causati da un incendio che quelli causati da un'esplosione, gli incidenti più probabili di veicoli a combustibile alternativo, all'interno di una galleria stradale, sono suddivisibili in:

- Veicoli a combustibile liquido: incendi di pozza (Pool-Fire);
- Veicoli a gas liquefatto: Jet-Fire con incendio di pozza, eventuale Bleve con Fireballs, rara VCE;
- Veicoli a gas compresso: Jet-Fire, in caso di rottura del serbatoio Fireballs, rara VCE;
- Veicoli a batteria: Incendio da corpo solido con Jet-Flames, rara VCE;

Statisticamente i rischi legati alle esplosioni sono più gravi e distruttivi (rottture e lancio di frammenti, Bleve, etc) rispetto a quelli legati ai soli incendi. Nel caso invece i combustibili non siano immediatamente innescati e vengano rilasciati al di fuori del serbatoio, è possibile la generazione di una nuvola di vapore infiammabile potenzialmente esplosiva e capace in caso di forte confinamento di causare una detonazione. Se, invece, il combustibile evapora a causa del surriscaldamento del serbatoio e non riesce a fuoriuscire, è possibile che si verifichi una rottura improvvisa e catastrofica del serbatoio con successivo Bleve.

## 4.3 Tipologia e scenari d'incendio

A seconda dell'origine in termini di combustibile, nonostante il dominio sia sempre rappresentato dalla galleria stradale, gli scenari d'incendio potenziale si diversificano. Queste diversificazioni nelle fasi d'incendio si concretizzano negli effetti, nella durata, nella produzione di calore e nella generazione di prodotti tossici da combustione.

Una prima classificazione può essere realizzata tra gli incendi causati da veicoli a motore endotermico (ICE) e quelli a motricità elettrica (EV); tra i mezzi a combustione tradizionale ricordiamo quelli a benzina, a gasolio, a GPL e a metano; mentre tra le nuove tecnologie per la mobilità stradale meritano una menzione i veicoli FCEV a celle ad idrogeno e i mezzi ibridi ed elettrici che montano prevalentemente batterie agli ioni di litio.

Di seguito per indagare il tipo e gli scenari relativi d'incendio considereremo quattro classi di veicoli:

1. Veicoli a combustibile liquido: benzina e gasolio;
2. Veicoli a combustibile gassoso liquefatto: GPL, LNG, etc;
3. Veicoli ad Idrogeno compresso: CNG, H<sub>2</sub>, etc;
4. Veicoli ibridi ed elettrici (Batterie agli ioni di litio);

L'obbiettivo al termine di questa analisi quantitativa sarà confrontare il tipo d'incendio con la quantità di calore irraggiato e l'influenza che questa ha nel propagare l'incendio ai veicoli vicini durante un incidente all'interno di una galleria stradale.

Gran parte dei fenomeni d'incendio che andremo ad analizzare è caratterizzato da fiamme di tipo diffusivo, ossia fiamme sviluppate da combustibile e comburente che inizialmente sono separati e solo in un secondo momento si miscelano.

A seconda della velocità di efflusso del combustibile, la fiamma che andrà a formarsi sarà governata dalle forze di inerzia (per alte velocità di efflusso) o dalle forze di galleggiabilità (per basse velocità di efflusso). Il numero adimensionale che regola il rapporto tra queste forze è il numero di Froude:

$$Fr = \frac{u^2}{g \cdot D}$$

Dove:

$u$  è la velocità di efflusso del combustibile,  $g$  è l'accelerazione di gravità;

$D$  la dimensione caratteristica della fiamma (diametro foro d'uscita nei Jet-fire e il diametro della pozza nei pool-fire).

Le fiamme generate da getti di combustibile gassoso (jet-fire) sono fiamme governate dalle forze d'inerzia e godono di un moto turbolento (elevati valori di Froude); invece, le fiamme originate da combustibili solidi o liquidi (pool-fire) sono solitamente governati dalle forze di galleggiamento poiché la velocità di evaporazione è modesta.

### 4.3.1 Scenari con veicoli a combustibile liquido

Un'incidente, che coinvolga uno o più veicoli a combustibile tradizionale e che causi un rilascio di combustibile al suolo, dal punto di vista degli scenari d'incendio può essere rappresentato schematicamente da un incendio di pozza (Pool - Fire).

L'effetto principale di un incendio di pozza, nel caso in cui una pozza di combustibile già formatasi subisca innesco, è quello radiante.

I modelli per la stima degli effetti di un incendio di pozza prevedono la valutazione di diverse componenti:

- Il burning rate, ossia il flusso massivo che lascia un'unità di superficie della pozza;
- La dimensione della pozza;
- La geometria della fiamma;
- L'energia emessa dalla superficie della fiamma;
- Il fattore di vista tra sorgente e target;
- Il flusso termico ricevuto dal target (modello a corpo solido emittente e/o modello emittente puntiforme);

I combustibili liquidi possono essere rilasciati in diversi modi: piccole perdite dai serbatoi o dai tubi di alimentazione, rotture dei serbatoi, etc. l'area di fuoriuscita è influenzata principalmente dalla quantità, dalla velocità del rilascio e dal tipo di carburante e dal materiale del serbatoio.

Si ipotizza che un veicolo a seguito di un incidente abbia una perdita dal serbatoio. Il serbatoio possiede una capacità di circa 67 litri di benzina (a pressione atmosferica e temperatura ambiente) e a seguito del danno meccanico subito si forma un'apertura nella parte inferiore che permette la fuoriuscita del combustibile a terra formando una pozza di carburante. Questo rilascio sarà continuo ed andrà a generare una pozza al di sotto del veicolo stesso. A contatto con l'ambiente esterno, il combustibile inizierà ad evaporare formando una potenziale nube infiammabile in combinazione con l'ossigeno presente nell'aria. A tal punto è sufficiente una fonte d'innesco (corto circuito batteria, superfici calde del veicolo -motore, marmitta, freni-, etc) capace di avviare la combustione.

Il serbatoio è stato modellato come un parallelepipedo con area di base (400 mm x 700 mm) ed alto 300mm al cui interno ospita 75 litri (0.075 m<sup>3</sup>), quindi ipotizzando il serbatoio pieno il pelo libero interno è di 240 mm. La misura del diametro del foro sul fondo del contenitore è di 10 mm ( $A_{\text{foro}} = 7.54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ).

Dalla teoria dei rilasci, nella fattispecie “efflusso di liquido da foro in un serbatoio”, la velocità di uscita della benzina [m/s] è:

$$u = c_D \sqrt{2 \left( \frac{P_{rel}}{\rho} + g h_L \right)} = 10.27 \text{ m/s}$$

Dove:

$c_D$ : Coefficiente adimensionale; 0.61 per foro irregolare;

$\rho$ : densità del liquido [Kg/m<sup>3</sup>]; benzina 720 Kg/m<sup>3</sup>;

$P_{rel}$ : pressione relativa; nulla perché la benzina nel serbatoio è a pressione atmosferica 100000 Pa;

$g$ : accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]; 9.81 m/s<sup>2</sup>

$h_L$ : differenza di quota dal foro di uscita al pelo libero del carburante nel serbatoio [m]; 0.24 m;

La portata massiva istantanea [m<sup>3</sup>/s] è:

$$Q = c_D A_f u = 8.07 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Dove:

$c_D$ : Coefficiente adimensionale; 0.61 per foro irregolare;

$A_f$ : area del foro di efflusso della benzina;  $D = 0.01\text{m}$ ,  $A_f = 7.54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ );

$u$ : velocità di uscita della benzina [m/s];

Il tempo di svuotamento del serbatoio viene determinato tra il rapporto del volume sulla portata [s]:

$$t_s = \frac{Vol}{Q} = 83 \text{ secondi} = 1.4 \text{ minuti}$$

Dove:

Vol: volume del liquido contenuto nel serbatoio [m<sup>3</sup>]; Vol = 0.067 m<sup>3</sup>;

Q: portata di efflusso [m<sup>3</sup>/s];

Dopo aver calcolato il tempo di svuotamento del serbatoio, che sarà utile in seguito per stimare se il rilascio è istantaneo o continuo, è necessario determinare gli le grandezze peculiari che caratterizzano l'incendio di pozza.

Il **flusso massivo** che abbandona la superficie della pozza  $W_b$  dipende dalle proprietà chimico – fisiche della sostanza in evaporazione:

$$W_b = W_\infty [1 - \exp(-K\beta D)] = 0.48 \text{ Kg}/(\text{m}^2\text{s})$$

Dove:

- $W_b$ : flusso massivo [ $\text{Kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ];
- $W_\infty$ : flusso massivo con  $D \rightarrow \infty$  [ $\text{Kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ];  $W_\infty \text{benzina} = 0.048 \text{ Kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ;
- $K$ : coefficiente di estinzione della fiamma [ $1/\text{m}$ ];
- $\beta$ : fattore di correzione [-];  $K \times \beta = 3.8 \text{ m}^{-1}$ ;
- $D$ : diametro della pozza [ $\text{m}$ ];
- $\rho_l$ : densità del liquido [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ];  $\rho_{\text{benz}}: 720 \text{ Kg}/\text{m}^3$

La velocità di bruciamento è data dalla seguente uguaglianza:

$$u_b = \frac{W_b}{\rho_l} = 7.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

La dimensione della pozza (diametro) può essere determinata dalla dimensione del contenimento fisico (bacino di contenimento, drenaggio, etc) e dalla dinamica dello scenario di sversamento:

- Rilascio istantaneo sul terreno;

$$D = 2 \left( \sqrt[4]{\frac{8 g V_0}{\pi} t} + \frac{D_0^2}{4} \right)$$

- Rilascio continuo sul terreno;

$$D = 2 \left( \sqrt[4]{\frac{32 g q_0}{9\pi} t^{\frac{3}{4}}} \right)$$

- Rilascio e incendio simultaneo

$$D = 2 \left( \sqrt{\frac{q_0}{\pi u_b}} \right)$$

Dove:

$V_0$ : volume rilasciato [ $m^3$ ];

$g$ : accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ]

$q_0$ : portata scaricata di liquido [ $m^3/s$ ];

$t$ : tempo di rilascio [ $s$ ];

$u_b$ : velocità di bruciamento.

Come analizzato dall'albero degli eventi lo scenario più probabile è la formazione di una pozza e incendio simultaneo e quindi il diametro della pozza è pari a 3.92 metri.

Il campo di moto locale del vento influisce notevolmente sul flusso massivo rilasciato dalla pozza (se la reazione di combustione è limitata dalla diffusione di comburente). La correzione di  $W_b$  risulta quindi necessaria per il tipo di dominio nel quale ipotizziamo si verifichi il rilascio e poi l'incendio della pozza di benzina/gasolio, ossia una galleria stradale in cui la ventilazione, naturale e/o meccanica, governa totalmente questi fenomeni.

$W_b$  sarà perciò corretto nel seguente modo:

$$W_{b,w} = W_b \left[ 1 + 0.15 \frac{u_{w,10m}}{D} \right] \propto u_{w,10m} = 0.05461 \text{ kg}/(m^2s)$$

Dove:

- $W_{b,w}$ : flusso massivo in condizioni ventose [ $Kg/(m^2s)$ ];
- $U_{w,10m}$ : velocità media del vento a 10 metri di quota [ $m/s$ ]  
 Aggiusto il valore  $U_{w,10m}$  attraverso le classi di rugosità di Pasquill;
- $D$ : diametro della pozza [ $m$ ];

Un Pool-Fire ha luogo a partire dai vapori sovrastanti la pozza. Secondo Thomas (1963) l'altezza della fiamma  $L_f$  è funzione della portata evaporata e delle condizioni di campo di moto del vento.

È utile distinguere due casi, a seconda che le condizioni atmosferiche siano di quiete o ventose.

Nel caso di un incendio in galleria le condizioni ventose dovrebbero essere le più realistiche.

Condizioni di quiete atmosferica:

$$\frac{L_f}{D} = 42 \left( \frac{W_b}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0.60} = 2 \text{ m}$$

Condizioni ventose:

$$\frac{L_f}{D} = 55 (u^0)^{-0.21} \left( \frac{W_{bw}}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0.67} = 1.6 \text{ m}$$

Ricordiamo, che nel caso di condizioni atmosferiche ventose, il flusso del vento tende a deformare il pool-fire creando: con la normale alla pozza, un angolo  $\vartheta$  di deformazione e un'ellisse di deformazione  $D_d$  rispetto al diametro  $D$  della pozza.

- $u^0 = \frac{u_{w,10 \text{ m}}}{u_c} = \frac{u_{w,10 \text{ m}}}{\sqrt[3]{gW_{bw} \frac{D}{\rho_v}}} = 3.01 \text{ m/s}$

- $D_d = 1.5D \left( \frac{u_{w,10 \text{ m}}^2}{gD} \right)^{0.069} = 5 \text{ m}$

- $\cos \theta = \begin{cases} 1 & \text{se } u^0 \leq 1 \\ \frac{1}{\sqrt{u^0}} & \text{se } u^0 \geq 1 \end{cases}$

Per determinare l'angolo  $\vartheta$  di deformazione della fiamma devo passare per i numeri di Froude ( $u_{w,10m}$ ) e di Reynolds: dove la viscosità cinematica dell'aria a 20 °C vale  $\nu_a = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ;

$$Fr_{10} = \frac{u_{w,10 \text{ m}}^2}{g \cdot D_d} \quad Re = \frac{u_{w,10 \text{ m}} \cdot D_d}{\nu_a}$$

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = 0.666 \cdot (Fr_{10m})^{0.333} \cdot (Re)^{0.117} = c$$

$$\theta = \sinh^{-1} \left[ \frac{(4c^2 + 1)^{1/2} - 1}{2 \cdot c} \right] = 1.12^\circ$$



Figura 72: Ellisse di deformazione  $D_d$  e angolo di deformazione rispetto alla normale alla pozza.

*American Institute of Chemical Engineers*

La fiamma costituisce la sorgente per l'emissione della potenza termica verso un target. La valutazione dell'effetto termico può essere quantificata attraverso due approcci: a sorgente puntiforme o a corpo solido emittente.

Nel caso d'incendio generato da un rilascio continuo a terra di combustibile liquido infiammabile (benzina e/o gasolio) all'interno di una galleria stradale ventilata, il modello che meglio approssima la realtà è il **modello a corpo solido emittente**.

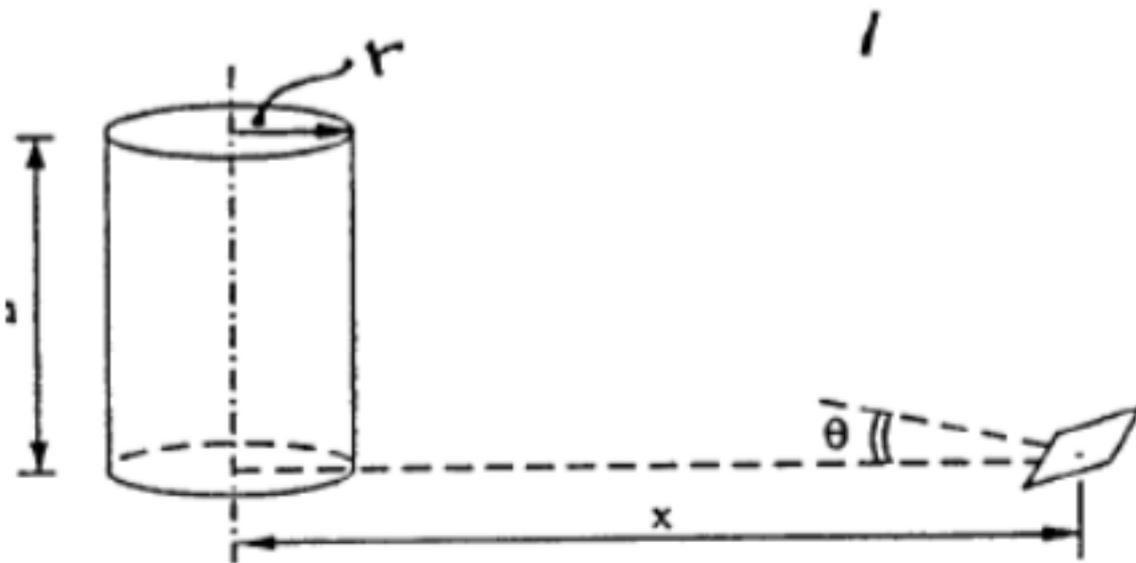


Figura 73: schema di un emittore a corpo solido (cilindro di raggio  $r$  e altezza  $L_f$ ).

*American Institute of Chemical Engineers*

Il modello a corpo solido emittente considera la fiamma come un emettitore solido che irraggia energia dalla superficie di un corpo di geometria definita (solitamente un cilindro). In questo caso l'irraggiamento [kW/m<sup>2</sup>] sul recettore si calcola:

$$I = E_r = E \tau_A F = \begin{cases} 24.89 \frac{kW}{m^2} \text{ Caso aria in quieta} \\ 26.83 \frac{kW}{m^2} \text{ Caso ventoso} \end{cases}$$

Dove:

E: emissività specifica della superficie, cioè la potenza emessa dalla fiamma per unità di superficie; [KW/m<sup>2</sup>]; per gli idrocarburi che formano fiamme fumose, l'emissività superficiale può essere stimata come una media pesata sul diametro della pozza tra l'emissività massima della zona luminosa della fiamma ( $E_{fiamma}$ , circa 140 kW/m<sup>2</sup>) e quella del particolato che oscura la fiamma ( $E_{fumo}$ , circa 20 kW/m<sup>2</sup>):

$$E_{av} = [E_{fiamma} e^{-0.12D} + E_{fumo} (1 - e^{-0.12D})]$$

$\tau_A$ : frazione di radiazione emessa che non viene assorbita dall'atmosfera, solitamente è dell'ordine del 60-80%, e può essere stimata in funzione dell'umidità atmosferica (RH), della temperatura ( $T_A$ ) e della distanza (X in metri) tra emettitore e trasmettitore:

$$\tau_A = 2.02 (P_w X)^{-0.09}$$

$$P_w = 1013.25 RH \exp\left(14.41 - \frac{5328}{T_A}\right)$$

F: fattore di vista, frazione di energia irraggiata che viene intercettata dal recettore (per unità di superficie del recettore): ricavato dagli abachi dedicati (0.6);

$$F = \oint_{A_1} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_j}{\pi X^2} dA_i$$

Dove:  $\beta_i$  e  $\beta_j$  sono gli angoli tra la normale e la congiungente dell'elemento infinitesimo irraggiante della fiamma (di superficie  $dA_i$ ) e il recettore, mentre X è la distanza tra l'elemento infinitesimo irraggiante e il recettore. Per determinare il fattore di vista esiste anche un metodo semplificato basato

su degli abachi, nei quali si entra (termini noti) con i rapporti L/R e X/R ed incrociando si ottiene il valore del fattore di vista sull'ordinata, sia nel caso in assenza di vento e sia nel caso con il vento.

Nella seguente tabella si riportano i dati e i risultati dei calcoli considerando una distanza dall'incendio di 5 metri.

*Tabella 37: Dati e risultati di un Pool Fire da veicolo a benzina*

Dati	Caso senza vento	Caso con vento
Umidità relativa – RH [%]	75	75
Temperatura ambiente – Ta [°C]	20	20
trasmissività atmosferica - $\tau_A$	0.89	1.04
Fattore di vista – F	0.3	0.35
Emissività termica media - $E_{av}$ : [KW/m <sup>2</sup> ]	94.93	85.86
Irraggiamento - I [kW/m <sup>2</sup> ]	25.40	31.30

### 4.3.2 Scenari con veicoli a combustibile liquefatto

Un'incidente, che coinvolga uno o più veicoli a combustibile gassoso liquefatto (GPL, LNG, etc), capace di danneggiare il serbatoio in modo da creare una breccia che possa rilasciare del combustibile al suolo o in aria, dal punto di vista degli scenari d'incendio può essere rappresentato schematicamente da un incendio di pozza (Pool - Fire) con Jet-Fire oppure con dal solo Jet-Fire.

La differenza tra i due possibili scenari dipende sia dalle caratteristiche chimico-fisiche della sostanza considerata (GPL, LNG, etc) sia dal punto in cui il serbatoio subisce il danno meccanico che causa la foratura e quindi il rilascio conseguente. A seconda che la falla si apra nel punto della bombola in cui il gas si trova in fase liquida o in fase gassosa le cose possono cambiare notevolmente.

Per quanto riguarda l'incendio di pozza causato da un gas liquefatto, le considerazioni e la metodologia di calcolo sono identiche a quelle viste per i combustibili liquidi tradizionali. Invece, lo scenario che porta alla formazione di un Jet-Fire è diverso.

Il Jet-Fire è un fenomeno tipicamente causato dalla combustione di una sostanza rilasciata da un'unità pressurizzata, ad esempio un serbatoio di un veicolo.

La fiamma a getto è sostenuta da un afflusso di sostanza comprimibile attraverso un foro che, dipendentemente dalla pressione a monte, può essere in regime critico o sub-critico.

Tale scenario, a causa del maggior flusso d'irraggiamento e del forte direzionamento, rispetto ad un pool-fire può causare il rischio di generare un effetto domino, che in un ambiente confinato come una galleria stradale può determinare in una situazione davvero severa.

I parametri principali da stimare riguardano la lunghezza e il diametro del getto infuocato. Di tale getto va successivamente quantificata l'energia irradiata.

La metodologia più diffusa, perché più conservativa, prevede un getto verticale derivante da un efflusso di materiale combustibile innescato attraverso un foro.

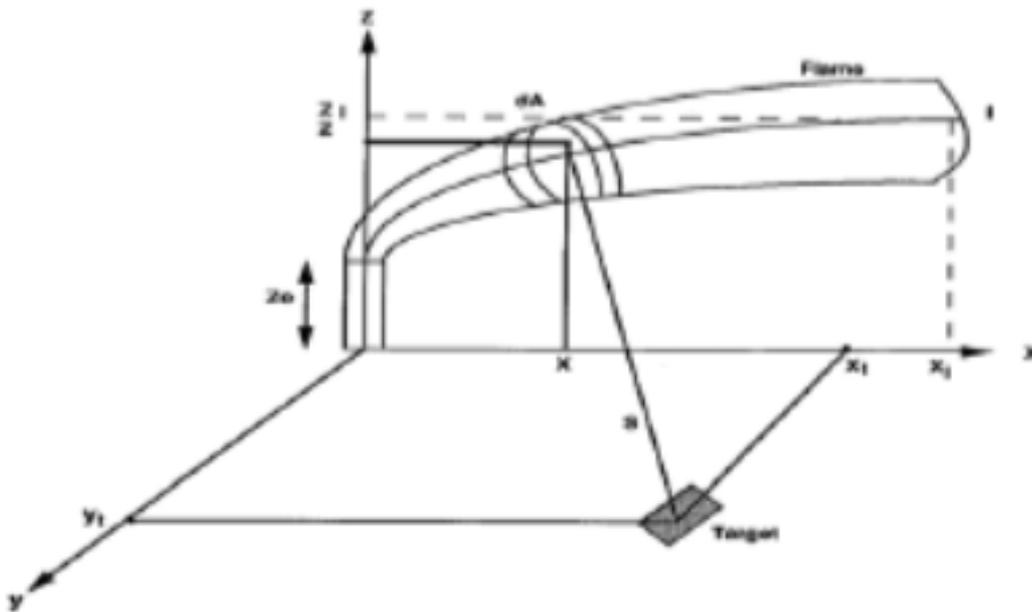


Figura 74: Modello semplificato di Jet-Fire a corpo solido emittente.

*American Institute of Chemical Engineers*

La fiamma da getto turbolento è una fiamma diffusiva risultante dalla combustione di un combustibile liquido o gassoso rilasciato in modo continuo con una quantità di moto in una direzione non trascurabile.

Nel caso di getti turbolenti, la velocità di bruciamento è pari alla portata di combustibile scaricato e la geometria della fiamma è interamente determinata dalle caratteristiche fluidodinamiche del getto.

I getti originati dall'accensione di getti gassosi a bassa velocità sono molto influenzati dall'intensità e direzione del vento e dalla spinta al galleggiamento, in quanto solo la zona immediatamente a monte del foro d'uscita è governata dalla quantità di moto. Quindi, questi getti risultano relativamente lunghi e fumosi.

Anche lo scarico di gas liquefatto dal serbatoio in pressione, origina un jet fire di goccioline di combustibile che possono evaporare velocemente, cioè possono dare Flash, e mostrano comunque caratteristiche simili a quelle dei getti a velocità basse.

Nel caso di uno scenario incidentale, plausibilmente avremo che il veicolo a gas liquefatto rilascia carburante (in fase gas o in fase liquida) dal suo serbatoio di dimensioni variabili.

Nel caso di un veicolo a GPL il serbatoio è di tipo toroidale (a ciambella) con una capienza che varia da 26 a 70 litri (riempito all'80%) e viene collocato quasi sempre nella parte posteriore del mezzo (spesso al posto del pneumatico sostitutivo); nel caso in esame consideriamo un veicolo con un serbatoio toroidale di 40 litri di GPL posto a dimora nella parte posteriore del veicolo, nell'alloggiamento del pneumatico di scorta.

A contatto con l'ambiente esterno, la miscela di GPL inizia ad evaporare formando una potenziale nube infiammabile in combinazione con l'ossigeno presente nell'aria. A tal punto è sufficiente una fonte d'innescio (corto circuito batteria, superfici calde del veicolo, motore, marmitta, freni, etc) capace di avviare la combustione.

L'approccio per modellare il jet-fire segue circa le stesse procedure viste nel caso del pool fire. I modelli di simulazione della geometria del jet-fire si possono distinguere in due tipologie: quelli che determinano solo la lunghezza della fiamma, utilizzati per i modelli ad emissione puntuale; e quelli che rappresentano la fiamma come un tronco di cono, utilizzati per i modelli ad emettitore superficiale. Come prima approssimazione è possibile stimare l'area del foro d'uscita del carburante come l'area del cerchio minore del tronco di cono.

Il diametro del foro dal quale avviene il rilascio, in fase aerosol (miscela di fase gas e fase vapore), viene ipotizzato di 10 mm (0.01 m) per avere un termine di paragone tra i diversi tipi di rilasci e combustibili.

Un metodo attendibile per calcolare la lunghezza della fiamma è l'equazione stimata da Mudan e Croce nel 1988:

$$\frac{L}{d} = \frac{5.3}{\sigma} \sqrt{\frac{T_f/T_j}{\alpha} \left[ \sigma + (1 - \sigma) \frac{PM_{air}}{PM_{fuel}} \right]} \approx \frac{15}{\sigma} \sqrt{\frac{PM_{air}}{PM_{fuel}}} = 1.64 m$$

Dove:

- L: lunghezza visibile della fiamma [m];
- d: diametro del getto infuocato vicino alla foratura [m];

- $\sigma$ : rapporto di combustione nella miscela stechiometrica aria-combustibile, [-];
- $T_f$ : temperatura adiabatica di fiamma [K];
- $T_j$ : temperatura del getto [K];
- $\alpha$ : mole di reagente/mole di prodotto nella miscela stechiometrica aria-combustibile [-];
- $PM_{air}$ : peso molecolare dell'aria [g/mol];
- $PM_{fuel}$ : peso molecolare del combustibile [g/mol];

Esistono anche altre correlazioni che a partire dalla lunghezza teorica della fiamma, ad esempio l'equazione di Baron del 1954, permettono di stimare il diametro del Plume prodotto dall'efflusso  $D_{jF}(x)$ :

$$D_{jF}(x) = 0.29 x \sqrt{\ln \frac{L}{x}}$$

Dove:

- $D_{jF}(x)$ : diametro del getto valutato lungo la coordinata assiale [m];
- $X$ : coordinata lungo l'asse del getto [m]= 0.6 L;
- $L$ : lunghezza della fiamma del Jet-Fire, valutata secondo l'equazione di Mudan e Croce;

Secondo questa correlazione, il massimo valore del diametro del getto è pari a  $D_{jF}(X=0.6L) = 0.20$  metri;

Come già accaduto per dimensionare l'irraggiamento di un incendio da pozza, anche per il jet fire è possibile ricorrere a due modelli semplificati: quello puntiforme e quello ad emettitore solido. Il modello con l'approccio a corpo solido emittente permette di descrivere il fenomeno della fiamma a getto con maggiore dettaglio, inoltre, rende anche possibile modellare la fiamma in un campo di moto governato dal vento. La fiamma a getto costituisce la sorgente per l'emissione della potenza termica verso un target.

Nel caso della fiamma a getto generato da un rilascio in pressione di combustibile infiammabile liquefatto, come il GPL, all'interno di una galleria stradale ventilata, il modello che meglio approssima la realtà è il modello a sorgente puntiforme.

Nell'applicazione del modello sorgente puntiforme, si assume che la sorgente sia localizzata al centro del getto, lungo l'asse. In questo caso l'irraggiamento [kW/m<sup>2</sup>] sul recettore si calcola:

$$I = \dot{m}\Delta H_c(\tau_A \cdot F \cdot \mu)$$

Dove:

$\dot{m}$ : portata rilasciata m/s;

$\Delta H_c$ : calore di combustione; per il butano 46 MJ/kg;

$\eta$ : efficienza d'irraggiamento; per il butano 0.20-0.27;

$\tau_A$ : trasmissività [0.6-0.8] frazione di radiazione emessa che non viene assorbita dall'atmosfera, solitamente è dell'ordine del 60-80%, e può essere stimata in funzione dell'umidità atmosferica (RH), della temperatura ( $T_A= 50\%$ ) e della distanza ( $X = 5$  m) tra emettitore e trasmettitore:

$$\tau_A = 2.02 (P_w X)^{-0.09} = 0.18$$

$$P_w = 1013.25 RH \exp\left(14.41 - \frac{5328}{T_A}\right)$$

F: fattore di vista, frazione di energia irraggiata che viene intercettata dal recettore (per unità di superficie del recettore):  $F = 1$ ;

$$F = \frac{1}{4\pi x^2}$$

Nella seguente tabella si riportano i dati e i risultati dei calcoli considerando una distanza di un target dall'incendio di 5 metri.

Tabella 38: Dati e risultati di un jet fire da veicolo a combustibile liquefatto

Dati	Jet fire
Umidità relativa – RH [%]	75
Temperatura ambiente – Ta [°C]	20
portata rilasciata - $\dot{m}$ [kg/s]	0.96
$\Delta H_c$ [MJ/kg]	46
trasmissività atmosferica - $\tau_A$	0.89
Fattore di vista – F	0.0031
Irraggiamento - I [kW/m <sup>2</sup> ]	34.32

Come evidenziato dall'albero degli eventi di un veicolo a combustibile liquefatto a seguito di un rilascio si può avere anche la formazione di una pozza e quindi l'incendio da essa.

Nella seguente tabella si riportano i dati e i risultati dei calcoli per un pool fire considerando una distanza di un target dall'incendio pari a 5 metri.

*Tabella 39: Dati e risultati di un pool fire*

Dati	Valori
Pressione serbatoio [bar]	4
velocità uscita dal foro = $u$ [m/s]	24.40
portata rilasciata - $\dot{m}$ [kg/s]	0.96
flusso massivo = $W_b$ [kg/m <sup>2</sup> s]	0.099
velocità di bruciamento = $u_b$ [m/s]	$1,37 \cdot 10^{-4}$
Dimensione pozza [m]	4.21

*Tabella 40: Dati e risultati di un pool fire da veicolo a combustibile liquefatto*

Dati	Caso senza vento	Caso con vento
Altezza della fiamma – $L$ [m]	12.8	11.22
Diámetro – $D$ [m]	4.21	5.34
Umidità relativa – RH [%]	75	75
Temperatura ambiente – $T_a$ [°C]	20	20
trasmissività atmosferica - $\tau_A$	0.89	1.04
Fattore di vista – $F$	0.2	0.22
Emissività termica media - $E_{av}$ : [KW/m <sup>2</sup> ]	92.38	83.22
Irraggiamento - $I$ [kW/m <sup>2</sup> ]	16.48	19.07

### 4.3.3 Scenari con veicoli a combustibile compresso

L'uso di sistemi a celle a combustibile ad idrogeno nei veicoli FCEV, con pressioni di utilizzo fino a 100 MPa, può creare dei problemi di sicurezza in caso di scenari incidentali.

Un'incidente, che coinvolga uno o più veicoli FCEV ad idrogeno compresso, può causare un rilascio di idrogeno in aria, e se questo viene innescato lo scenario d'incendio può essere rappresentato schematicamente da Jet-Fire.

Va ricordato che tale scenario è altamente improbabile che possa verificarsi, soprattutto grazie agli elevati standard di sicurezza che le bombole per l'idrogeno hanno ormai raggiunto. L'attuale stato dell'arte prevede bombole che lavorano a 700 bar di pressione di stoccaggio, tuttavia possiedono un doppio rivestimento in fibra di carbonio e in fibra di vetro che permettono i manufatti di resistere a pressioni fino a 225 quella di progetto. Inoltre, i test distruttivi a cui vengono sottoposte per valutarne la robustezza sono effettuati con proiettili calibro cinquanta, e nonostante la loro energia nemmeno riescono a scalfirle.

I Jet-Fire generati dal rilascio di idrogeno compresso, possono raggiungere lunghezze di fiamma di 10-15 metri, creando un rischio assai elevato sia per i passeggeri del veicolo sia per i soccorritori chiamati a governare il fenomeno.

Determinare la possibile lunghezza della fiamma del Jet-Fire risulta di fondamentale importanza per definire la distanza di separazione minima tra la fonte del rischio (rilascio non infiammato, rilascio infiammato, effetti di pressione) e il target da salvaguardare (vita umana, veicolo, ambiente, etc).

L'idrogeno statisticamente ha due comportamenti in caso di rilascio accidentale: il primo è una perdita priva d'innescò che crea una nube infiammabile con l'aria ma che facilmente può essere diluita dai sistemi di ventilazione, il secondo è un getto libero di gas in pressione immediatamente innescato che genera un Jet-fire.

La descrizione dei rilasci di getti in pressione di idrogeno non segue le formulazioni sopra elencate relative ai gas liquefatti come il GPL e l'LNG. Per descrivere il comportamento "diverso" del Jet-fire generato da un rilascio di idrogeno compresso, è stato messo appunto un monogramma che mette in relazione diretta: il diametro del foro, la pressione di stoccaggio e la lunghezza prevista della fiamma a getto. Questo monogramma è stato pubblicato da Molkov nel 2009 e ha permesso di avere un'ottima stima della lunghezza di fiamma senza necessariamente passare per altre e più complesse formule. L'ulteriore vantaggio nell'utilizzo del monogramma di Molkov è che la stima della lunghezza del getto utilizza soltanto due parametri: pressione di immagazzinamento e diametro effettivo della perdita, che solitamente sono facilmente recuperabili senza passare per calcoli complessi.

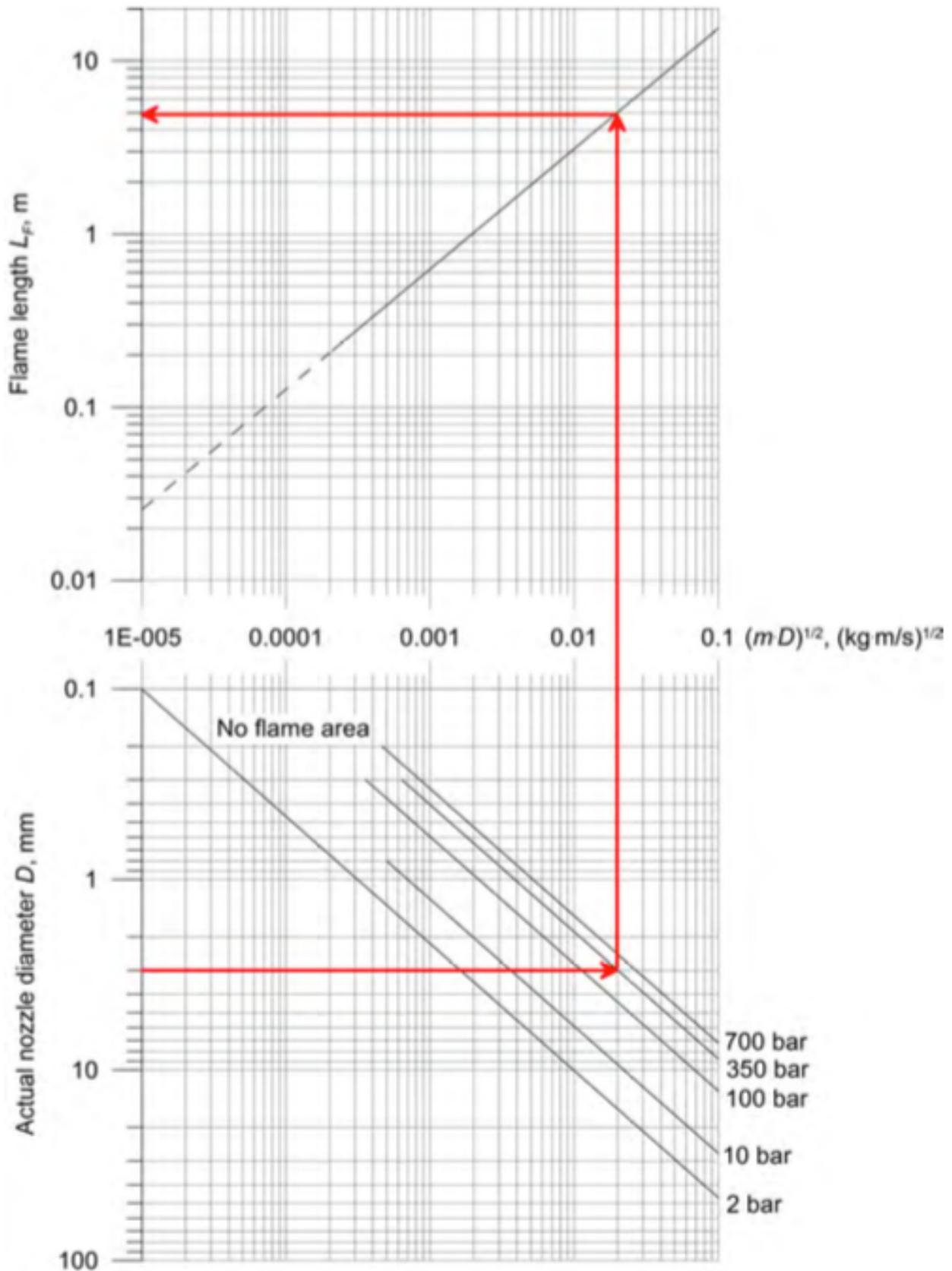


Figura 75: Monogramma del Molkov per la stima della lunghezza di fiamma del jet-fire dell'idrogeno.

*Hydrogen non-reacting and reacting jets in stagnant air: overview and state of the art. V. Molkov*

Il veicolo ipotizzato per questa simulazione d'incendio è stata una Toyota Mirai, la quale per questione progettuali anziché avere un singolo serbatoio, ne ospita due di diversa capienza: il primo serbatoio (centrale) è di 122.4 litri, il secondo (posteriore) è di 62,4 litri, entrambi comunque possiedono una pressione di stivaggio di 700 bar.

Il foro di uscita del combustibile ha un diametro di 10 mm, così da rendere omogeneo lo scenario incidentale tra tutti i tipi di veicolo. Occorre ricordare che comunque un foro nei serbatoi di nuova concezione è davvero improbabile, e ancor di più di questo diametro che ci porta ai margini del dominio di utilizzo del monogramma del Molkov e quindi mostrerà dei risultati altamente conservativi. L'area del foro misura 78.54 mm<sup>2</sup>;

Ricordiamo, che nel caso di fluidi ad elevata quantità di moto e numero di Froude, la lunghezza della fiamma è indipendente dalla portata volumetrica del getto. Inoltre, la lunghezza della fiamma dipende linearmente da diametro dell'orifizio d'uscita.

Utilizzando il monogramma di Molkov entro con il diametro (10 mm) e la pressione interna del serbatoio (700 bar), ottenendo come lunghezza di fiamma il valore di 11 metri.

Esistono anche altre correlazioni che a partire dalla lunghezza teorica della fiamma, ad esempio l'equazione di Baron del 1954, permettono di stimare il diametro del Plume prodotto dall'efflusso  $D_{JF}(x)$ :

$$D_{JF}(x) = 0.29 x \sqrt{\ln \frac{L}{x}}$$

Dove:

- $D_{JF}(x)$ : diametro del getto valutato lungo la coordinata assiale [m];
- $X$ : coordinata lungo l'asse del getto [m];
- $L$ : lunghezza della fiamma del Jet-Fire, valutata secondo l'equazione di Mudan e Croce;

Secondo questa correlazione, il massimo valore del diametro del getto è pari a  $D_{JF}(X=0.6L)=1.37$  metri;

Il cono che modella la fiamma a getto rilasciata dalla perdita di idrogeno possiede le seguenti dimensioni: il raggio della base misura 1.04 m e l'altezza 11 m. Il valore dell'apotema viene determinato con il Teorema di Pitagora:

$$a = \sqrt{h^2 + r^2} = 11.08 \text{ m}$$

Dopo aver determinato tutte le dimensioni delle grandezze necessarie passo a calcolare l'area laterale del cono, necessaria poi per calcolare la potenza irradiata dalla fiamma:

$$A_L = \pi a r = 47.81 \text{ m}^2$$

La presenza del vento modifica notevolmente la geometria della fiamma.

Nel caso della fiamma a getto generato da un rilascio in pressione di combustibile infiammabile, all'interno di una galleria stradale ventilata, il modello che meglio approssima la realtà è il modello a sorgente puntiforme.

Nell'applicazione del modello sorgente puntiforme, si assume che la sorgente sia localizzata al centro del getto, lungo l'asse. In questo caso l'irraggiamento [kW/m<sup>2</sup>] sul recettore si calcola:

$$I = \dot{m} \Delta H_c (\tau_A \cdot F \cdot \mu)$$

Dove:

$\dot{m}$ : portata rilasciata m/s;

$\Delta H_c$ : calore di combustione; per il butano 46 MJ/kg;

$\eta$ : efficienza d'irraggiamento; per il butano 0.20-0.27;

$\tau_A$ : trasmissività [0.6-0.8] frazione di radiazione emessa che non viene assorbita dall'atmosfera, solitamente è dell'ordine del 60-80%, e può essere stimata in funzione dell'umidità atmosferica (RH), della temperatura ( $T_A = 50\%$ ) e della distanza ( $X = 5 \text{ m}$ ) tra emettitore e trasmettitore:

$$\tau_A = 2.02 (P_w X)^{-0.09} = 0.18$$

$$P_w = 1013.25 RH \exp\left(14.41 - \frac{5328}{T_A}\right)$$

F: fattore di vista, frazione di energia irradiata che viene intercettata dal recettore (per unità di superficie del recettore): F =1;

$$F = \frac{1}{4\pi x^2}$$

Nella seguente tabella si riportano i dati e i risultati dei calcoli considerando una distanza di un target dall'incendio di 5 metri.

Tabella 41: Dati e risultati di un jet fire da veicolo a combustibile liquefatto

Dati	Jet fire
Umidità relativa – RH [%]	75
Temperatura ambiente – Ta [°C]	20
portata rilasciata - $\dot{m}$ [kg/s]	52.01
$\Delta H_c$ [MJ/kg]	143
trasmissività atmosferica - $\tau_A$	0.89
Fattore di vista – F	12.08
Irraggiamento - I [kW/m <sup>2</sup> ]	13.41

#### 4.3.4 Scenari con veicoli elettrici

Un'incidente, che coinvolga uno o più veicoli a motricità parziale (ibrido) o totalmente elettrica (EV) può causare un rilascio di energia dalle celle agli ioni di litio potenzialmente capace di autoalimentare ed innescare un incendio a bordo del veicolo.

Dal punto di vista statistico la maggior parte degli incidenti a bordo di EV inizia per autoaccensione del sistema di alimentazione a batteria.

In termini di energia immagazzinata la batteria può essere paragonata alla benzina contenuta nel serbatoio di un veicolo ICE, tuttavia dal punto di vista dell'analisi del rischio il comportamento di queste due riserve di energia è diverso.

La probabilità di un incendio in un veicolo EV è legata ai rischi associati alle celle agli ioni di litio, al sistema d'alimentazione, alle dimensioni e alla capacità del pacco batteria. In generale, maggiore è il numero di celle contenute nel pacco batteria, maggiore è la quantità di energia che possono contenere, e quindi il rischio d'incendio è potenzialmente maggiore.

Le batterie degli EV devono erogare molta potenza (fino ad un centinaio KW), perciò necessitano di un'elevata capacità energetica (decine di KWh).

Le celle di una batteria, che costituiscono l'unità base di una LIB (Lithium-Ion Battery), sono collegate in serie o in parallelo per formare un modulo batteria.

Oltre alle più diffuse batterie agli ioni di litio, esistono anche altre tecnologie per l'uso veicolare:

- Piombo-acido
- Nichel-cadmio NiCd
- Nichel-metallo idruro NiMH

Queste batterie presentano un rischio d'incendio minore rispetto alle LIB, poiché la loro densità di carica, capacità d'immagazzinare dell'energia, velocità di carica e scarica è molto inferiore.

Conoscere in maniera approfondita la configurazione interna delle celle delle batterie è assai complicato a causa del segreto industriale che copre la diffusione di queste informazioni, che risulterebbero fondamentali per la lotta agli incendi.

In base alla configurazione e processo di produzione esistono sul mercato 3 tipi di celle:

- Celle cilindriche;
- Celle prismatiche;
- Celle a sacchetto (pouch);

Tabella 42: Tipologie di celle di batterie commerciali

	<b>Cilindriche</b>	<b>Prismatiche</b>	<b>A Sacchetto (Pouch)</b>
<b>Capacità</b>	2-3 Ah	100-300 Ah	20-40 Ah
<b>Case</b>	Alluminio	Alluminio e/o Plastica	Soft Case
<b>Dimensione Batterie</b>	< 2 KWh	>10 KWh	Da 2 a 10 KWh



Figura 76: Principali formati di batteria: cilindriche, prismatiche e a sacchetto. Ebikecult.it

La capacità delle celle LIB utilizzate nei veicoli elettrici può variare da 3 Ah a 300 Ah a seconda del tipo, della tecnologia produttiva e della destinazione finale.

Quando una batteria agli ioni di litio viene sottoposta a stress meccanici e termici tipici di un incidente automobilistico, le celle sperimentano condizioni operative estreme che possono sfociare in fenomeni come: rottura, emissione di scintille, aumento incontrollato della temperatura, formazione di gas infiammabili e fumi tossici capaci di generare autonomamente un incendio (fiamme, Jet-Flames) e/o un'esplosione di gas.

Sebbene un normale sistema a batteria, sia stato progettato per avere una bassissima probabilità di autoaccensione, è comunque vulnerabile ai danni (termici, meccanici ed elettrici) che uno scenario incidentale può causare, generando condizioni operative non standard che non sempre il progettista riesce a prevedere in fase di ingegnerizzazione.

Il report Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles (RISE Report 2020:90) attraverso la revisione della letteratura disponibile e la conduzione di test ha stimato che un veicolo elettrico abbia un picco massimo di rilascio del calore che varia tra 4 e 7 MW.

Assumendo che la fiamma può essere rappresentata come una sorgente radiante puntiforme, l'energia emessa è una frazione dell'energia totale della combustione possiamo definire che l'intensità della radiazione termica  $q(r)$  è inversamente proporzionale al quadrato della distanza del ricevitore dalla sorgente radiante. Quindi:

$$I = \frac{Qr}{4\pi x^2}$$

Dove:

$Q_r$  è il calore rilasciato in forma di energia termica nell'unità di tempo [kJ/s o kW]

$X$ : è la distanza tra il centro della fiamma e il target.

Considerando una distanza di un target dall'incendio di 5 metri, un valore medio del calore rilasciato pari a 5.5 MW, l'intensità della radiazione termica è pari a 15.61 kW/m<sup>2</sup>.

La determinazione degli irraggiamenti dei veicoli a combustibile classico e alternativo, calcolati attraverso i modelli a corpo solido emittente o modello a sorgente puntiforme alla distanza di 5 metri, permettono di capire gli effetti su altri veicoli posizionati nei pressi dell'auto coinvolta nell'incendio.

Tabella 43: Irraggiamento per tipologia di alimentazione.

Combustibile	Scenario	Condizioni ambientali	Modello	Irraggiamento [kW/m <sup>2</sup> ]
Benzina	Pool fire	Aria in quiete	Corpo solido emittente - Cilindro	25.40
		Vento		31.30
GPL	Pool fire	Aria in quiete	Corpo solido emittente - Cilindro	16.48
		Vento		19.07
GPL	Jet fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	34.32
Idrogeno	Jet fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	13.41
Batterie	Fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	15.61

Nelle seguenti tabelle si riportano i valori soglia di irraggiamento che determinano un dato danno su un bersaglio.

*kW/m<sup>2</sup>*

- ZONA 1:**  $I < 1.5$  ***per flussi minori di 1.5 kW/m<sup>2</sup> non si ha alcun effetto per le persone normalmente vestite;***
- ZONA 2:**  $1.5 \leq I < 3$  ***irraggiamento compreso tra 1.5 e 3 kW/m<sup>2</sup>, in questo caso per tempi di esposizione brevi si hanno ustioni lievi; ustioni di 1° grado;***
- ZONA 3:**  $3 \leq I < 5$  ***irraggiamento compreso tra 3 e 5 kW/m<sup>2</sup>, in questo caso per tempi di esposizione brevi si hanno ustioni gravi; ustioni di 2° grado;***
- ZONA 4:**  $I > 5$  ***per flussi maggiori non si trascura la mortalità; ustioni di 3° grado e decessi.***

Figura 77: Tabella per Soglie di Danno sulle Persone. ADR DII UNIPD

Approximate levels of damage for different thermal fluxes

Thermal flux, kW m <sup>-2</sup>	Effect
1.4	Harmless for individuals not wearing special protection
1.6	Will cause no discomfort at long exposures
1.7	Minimum required to feel pain
2.1	Minimum required to feel pain after 1 min
4.0	Enough to cause pain after an exposure of 20 s; blistering of the skin is likely; 0% lethality
4.7	Causes pain in 15-20 s, burns after 30 s
7.0	Maximum tolerable for firefighters who are totally protected (classical protective clothing)
11.7	Thin, partially insulated steel may lose its mechanical integrity
12.5	Plastic insulation of electrical wires melts; melting of plastic tubing; 100% lethality
15.0	Critical radiation intensity* for wood (flame ignition without contact with the surface)
25.0	Thin, insulated steel may lose its mechanical integrity
35.0	Critical radiation intensity for wood and textiles (without flame ignition) Threshold value for the ignition of buildings
37.5	Damage to process equipment, collapse of structures

\*Critical radiation intensity: minimum radiation at which ignition can occur

Figura 78: Tabella per Soglie di Danno per Differenti Bersagli. ADR DII UNIPD

Confrontando i valori delle soglie di danno con la tabella riassuntiva dell'irraggiamento dei veicoli è possibile affermare che un target distante 5 metri è esposto a irraggiamenti che possono portare a:

- ustioni di 3° grado e decessi per persine;
- danneggiamenti superficiali e perdita di integrità meccanica.

# Capitolo 5 Conclusioni

## 5.1 HRR<sub>min</sub> e Tempo di Ignizione

L'HRR<sub>min</sub> rappresenta il tasso di rilascio termico minimo necessario affinché il calore irradiato da un incendio possa causare l'ignizione di un materiale combustibile ad una certa distanza. In relazione a quanto riportato nella NFPA 555, è possibile stimare l'HRR<sub>min</sub> attraverso la seguente formula, che considera l'irraggiamento e la distanza dal punto di emissione:

$$HRR_{min} = q \cdot 4\pi r^2$$

Dove:

HRR<sub>min</sub> è il tasso di rilascio termico minimo [kW];

q è l'irraggiamento termico al bersaglio [kW/m<sup>2</sup>];

r è la distanza tra la sorgente di calore e il bersaglio [m];

Di seguito andremo a definire l'HRR<sub>min</sub> relativo agli irraggiamenti determinati nell'analisi degli scenari incidentali.

Conservando la distanza fin qui assunta per un veicolo coinvolto in un incidente ed il calore irradiato dallo stesso verso un altro veicolo distante 5 metri otteniamo i valori sotto riportati.

Tabella 44: Irraggiamento e HRR min per tipologia di alimentazione

Combustibile	Scenario	Condizioni ambientali	Modello	Irraggiamento [kW/m <sup>2</sup> ]	HRR <sub>min</sub> [kW]
Benzina	Pool fire	Aria in quiete	Corpo solido emittente - Cilindro	25.40	7979.64
		Vento		31.30	9833.18
GPL	Pool fire	Aria in quiete	Corpo solido emittente - Cilindro	16.48	5177.34
		Vento		19.07	5991.05
GPL	Jet fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	34.32	10781.94
Idrogeno	Jet fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	13.41	4212.87
Batterie	Fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	15.61	4904.02

Una volta calcolato l'irraggiamento e determinato l'HRR<sub>min</sub>, è possibile stimare il tempo necessario affinché l'irraggiamento causi l'ignizione del veicolo adiacente. Il tempo di ignizione è una funzione

complessa che dipende dalla capacità termica del materiale, dalla conduttività termica e dalla temperatura di ignizione del combustibile.

Una formula semplificata per calcolare il tempo di ignizione  $t_{ign}$  in funzione dell'irraggiamento  $q$  è data da:

$$t_{ign} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \Delta T}{q}$$

Dove:

$t_{ign}$  è il tempo di ignizione [s];

$C_p$  è il carico specifico del materiale [ $J/m^3$ ];

$\rho$  è la densità del materiale [ $Kg/m^3$ ];

$\Delta T$  è l'incremento di temperatura richiesto per l'ignizione [K];

$q$  è l'irraggiamento termico ricevuto [ $kW/m^2$ ];

Ormai sempre più autoveicoli montano innumerevoli parti della carrozzeria in plastica, basti pensare alla componentistica frontale: fanali, calandra, paraurti, etc.

Prendiamo, quindi, ad esempio un veicolo in plastica con le seguenti proprietà del materiale:

Calore specifico della plastica:  $C_p = 1800 J/Kg K$  ;

Densità della plastica:  $\rho = 920 Kg/m^3$ ;

Delta termico per raggiungere l'ignizione:  $\Delta T = 300 K$

Procediamo quindi ad inserire questi valori nella formula del tempo di ignizione per ottenere i tempi per ciascun scenario d'incendio:

Tabella 45: Irraggiamento, HRR min e T ignizione per tipologia di alimentazione

Combustibile	Scenario	Condizioni ambientali	Modello	Irraggiamento [ $kW/m^2$ ]	HRR <sub>min</sub> [kW]	$t_{ign}$ [h]
Benzina	Pool fire	Aria in quiete	Corpo solido	25.40	7979.64	17.29
		Vento	emittente - Cilindro	31.30	9833.18	14.03
GPL	Pool fire	Aria in quiete	Corpo solido	16.48	5177.34	26.65
		Vento	emittente - Cilindro	19.07	5991.05	23.03
GPL	Jet fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	34.32	10781.94	12.79
Idrogeno	Jet fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	13.41	4212.87	32.75
Batterie	Fire	Aria in quiete	Sorgente puntiforme	15.61	4904.02	28.14

In tutti gli scenari esaminati, il tempo di ignizione per la plastica in un veicolo adiacente è stimato dalle 12 alle 32 ore. Tuttavia, in un ambiente confinato come una galleria stradale, le condizioni possono variare drasticamente a causa dell'effetto del confinamento, basti pensare alla scarsa ventilazione e all'accumulo di calore che possono ridurre significativamente questo tempo, portandolo da decine di ore a decine di minuti. Inoltre, le superfici circostanti, che riflettono il calore, e la presenza di gas tossici caldi accelerano il riscaldamento dei materiali combustibili, aumentando il rischio di propagazione dell'incendio.

In conclusione possiamo affermare che le condizioni presenti in una galleria stradale accentuano il rischio di propagazione degli incendi tra i veicoli, principalmente a causa della ventilazione limitata, dell'accumulo di gas tossici e del confinamento del calore. I seguenti fattori rendono critico l'approccio alla gestione degli incendi in tali ambienti:

#### Effetto del confinamento

A differenza degli spazi aperti, le gallerie presentano superfici vicine che riflettono il calore, aumentando l'irraggiamento termico verso i veicoli adiacenti. Come abbiamo visto, un veicolo a 5 metri di distanza, a seconda del combustibile che lo alimenta, potrebbe subire un irraggiamento di significativamente maggiore rispetto ad ambienti non confinati.

#### Tempo di ignizione ridotto

Il tempo di ignizione, che può teoricamente raggiungere diverse ore in condizioni ottimali, è drasticamente ridotto a pochi minuti o decine di minuti in una galleria, dove il calore si accumula e non può dissiparsi efficacemente. La ventilazione meccanica, se presente, può giocare un ruolo fondamentale nel rallentare la propagazione del fuoco, ma spesso non è sufficiente a impedire completamente la combustione di veicoli adiacenti dando origine a scenari potenzialmente catastrofici.

#### Rischio di propagazione rapida

Il rapido incremento dell'HRR in veicoli alimentati a gas, come quelli a GPL, può raggiungere valori superiori a 5-10 MW in pochi minuti, amplificando il rischio di propagazione del fuoco. Anche per veicoli elettrici, con pacchi batteria agli ioni di litio, l'HRR può raggiungere 4-7 MW, con picchi che, in un ambiente confinato, potrebbero innescare altri veicoli in breve tempo.

Questo lavoro risulta attuale perché sempre più spesso nelle gallerie moderne, grazie a sistemi come le barriere antincendio, le vie d'esodo sicure, e le ventilazioni meccaniche di emergenza, siamo in grado di:

- Ritardare l'ignizione nei veicoli vicini;
- Limitare la propagazione del calore attraverso l'isolamento e il controllo della ventilazione;
- Consentire un esodo sicuro degli occupanti, minimizzando l'esposizione ai fumi tossici e al calore;

Un'ottima finalità del calcolo dell'HRR<sub>min</sub> si ha per il monitoraggio dell'HRR in tempo reale. Tali valori se utilizzati con i moderni modelli ingegneristici (come il Fire Safety Engineering, FSE) permettono di dimensionare correttamente i sistemi di protezione antincendio in galleria.

Un sistema antincendio a sprinkler o a Water Mist, ad esempio, può essere attivato automaticamente quando il rilascio di calore supera una certa soglia, riducendo così la crescita del fuoco e abbassando il livello di radiazione termica. Questo, a sua volta, aumenta il tempo a disposizione per l'auto-salvataggio degli utenti e l'intervento dei soccorritori abbattendo in maniera sostanziale il rischio residuo.

Occorre, infine, ricordare che affinché non si arrivi agli scenari d'incendio analizzati per le varie tipologie di combustibile, occorre mantenere un sistema di gestione in galleria che garantisca un'elevata protezione e protezione affinché non si ripetano le tragedie del passato.

#### Sistemi di Prevenzione

Le gallerie moderne sono dotate di sistemi progettati per ridurre il rischio di incendi e migliorare la sicurezza degli utenti. Tra questi spiccano:

- Illuminazione adeguata, regolata dalla normativa UNI 11095:2021, che assicura visibilità in ogni condizione, riducendo incidenti causati da scarsa visibilità.
- Ventilazione naturale e meccanica, che controlla la qualità dell'aria e gestisce il fumo in caso di incendio. La ventilazione d'emergenza, in particolare, è progettata per isolare e dirigere il fumo, favorendo l'esodo sicuro degli utenti e l'intervento dei soccorritori.
- Sistemi di rilevamento incendio e allarme, basati su sensori di fumo, calore e rilevamento automatico tramite videosorveglianza (AID), permettono di intervenire rapidamente, riducendo i tempi di reazione e prevenendo lo sviluppo di incendi di grandi dimensioni.

## Sistemi di Protezione

In caso di incendio, i sistemi di protezione giocano un ruolo fondamentale per garantire la sicurezza degli utenti e la sopravvivenza delle infrastrutture. Le soluzioni moderne includono:

- Vie di esodo e rifugi sicuri, progettati per consentire agli utenti di mettersi al sicuro in modo tempestivo. Le uscite d'emergenza, distanziate regolarmente (non più di 300 metri in Italia), sono segnalate in modo chiaro e dotate di sistemi di protezione contro i fumi.
- Segnaletica e dispositivi di comunicazione (come altoparlanti, telefoni d'emergenza e sistemi di ritrasmissione radio), che forniscono informazioni cruciali durante le emergenze, guidando gli utenti verso le vie di fuga e facilitando l'intervento dei soccorritori.
- Sistemi antincendio fissi, come sprinkler e impianti a diluvio, che possono ridurre significativamente l'intensità e la propagazione del fuoco. In particolare, i sistemi a diluvio sono essenziali per gallerie che permettono il transito di veicoli che trasportano materiali infiammabili.

# Capitolo 6 Riferimenti Bibliografici

## Norme e Regolamenti:

- [1].Decreto Ministeriale 14 settembre 2005. \*Norme d'illuminazione per le gallerie stradali\*.
- [2].Decreto Ministeriale 3 agosto 2015. \*Codice di Prevenzione Incendi\*.
- [3].Decreto Ministeriale 15 maggio 2020. \*Regola Tecnica Verticale (RTV) per la prevenzione incendi nelle autorimesse\*.
- [4].Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2. \*Azioni sulle strutture. Parte 1-2: Azioni generali - Azioni in caso di incendio\*.
- [5].NFPA 92B. \*Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces\*, National Fire Protection Association.
- [6].NFPA 555. \*Guide for Evaluating Potential for Room Flashover\*, National Fire Protection Association.
- [7].UNI 11095:2021. \*Luce e illuminazione – Illuminazione delle gallerie stradali\*.
- [8].UNI EN 16276:2013. \*Illuminazione di evacuazione nelle gallerie stradali di lunghezza maggiore di 500 m\*.
- [9].UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2014). \*Regolamento n. 34: Disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli per quanto riguarda la prevenzione dei pericoli di incendio\*.
- [10]. UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2014). \*Regolamento n. 110: Disposizioni relative all'omologazione dei veicoli a combustibili gassosi\*.

## Bibliografia Tecnica e Scientifica

- [11]. Aigner Tunnel Technologies. (2021). \*Principles of Air Purification in Road Tunnels\*.
- [12]. American Institute of Chemical Engineers. (1994). \*Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide\*.
- [13]. Atkinson, G., Wu, X. (1996). \*Smoke Control in Inclined Tunnels\*, Journal of Fire Sciences, 14(6), 422-442.
- [14]. Bie, H., Hao, Z. (2013). \*CFD Simulation of Hydrogen Releases and Fires in Submarine Tunnels\*, International Journal of Hydrogen Energy, 38(5), 2432-2440.

- [15]. Borghetti, F., Frassoldati, A., Derudi, D., Lai, I., Trinchini, C. (2020). \*Safety in road tunnels: Accidents data analysis of the Italian motorway A24 and A25\*, Chemical Engineering Transactions.
- [16]. Chamberlain, S., Modarres, M. (2005). \*Quantitative Risk Assessment of CNG Buses in Tunnels\*, Risk Analysis, 25(5), 1017-1032.
- [17]. CFSL (Commissione Federale di Coordinamento per la Sicurezza sul Lavoro). (2021). \*Linee guida per il soccorso in galleria di veicoli elettrici e a gas\*.
- [18]. Cossalter, V., Zangiabadi, E. (2019). \*Incidenti stradali e sistemi di sicurezza in galleria\*, International Journal of Tunnel Safety.
- [19]. Di Santo, C., Bontempi, F., Gkoumas, K. (2015). \*Risk analysis for severe traffic accidents in road tunnels\*, Sapienza University of Rome.
- [20]. Federmetano. (2020). \*Bombole di metano: Installazione e sicurezza\*, Manuale tecnico.
- [21]. FlaktGroup. (2020). \*Tunnel Ventilation Solutions\*.
- [22]. FM Global. (2008). \*Hydrogen Safety and Risk Management in Vehicles\*, Fire Protection Engineering Journal.
- [23]. Gehandler, J., Karlsson, P., Vylund, L. (2017). \*Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages\*, SP Technical Research Institute of Sweden.
- [24]. Groethe, M., Merilo, E., Colton, J., Chiba, S., Sato, Y., Iwabuchi, H. (2007). \*Large Scale Deflagration and Detonation of Hydrogen in Tunnels\*, International Journal of Hydrogen Energy, 32(13), 2197-2203.
- [25]. Krupka, M., Peaslee, A., Laquer, H. (1983). \*Comparative Risk Analysis of Alternative Vehicle Fuels\*, Los Alamos National Laboratory Report.
- [26]. Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., Marlair, G. (2014). \*Comparative Study of Fire Consequences in an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle\*, INERIS.
- [27]. Li, Y.Z. (2018). \*Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels\*, RI.SE, Safety and Transport.
- [28]. Mellert, L.D., Tuchschnid, M., Hermann, M., Tesson, M. (2018). \*Minimizing Fire Risks of Electric Vehicles in Underground Infrastructure\*, Journal of Fire Sciences.
- [29]. Merck KGaA. (2023). \*Schede di sicurezza per benzina, gasolio e altri combustibili\*.
- [30]. Merck KGaA. (2023). \*Schede di sicurezza per GPL, LNG, CNG, idrogeno e combustibili gassosi\*.

- [31]. Molkov, V. (2009). \*Hydrogen Non-reacting and Reacting Jets in Stagnant Air: Overview and State of the Art\*, International Journal of Hydrogen Energy.
- [32]. Mudan, K.S., Croce, P.A. (1988). \*Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires\*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
- [33]. Naslund, M. (2012). \*LNG-Status in Denmark: Technology and Potential\*.
- [34]. NFPA (National Fire Protection Association). (2018). \*Electric Vehicle Fire Risk Analysis\*, Fire Protection Studies.
- [35]. PIARC (Permanent International Association of Road Congresses). (2016). \*Experience with significant incidents in road tunnels\*, Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operations.
- [36]. PIARC (Permanent International Association of Road Congresses). (2020). \*Road Tunnels: Operation and Safety\*, World Road Association.
- [37]. PIARC (Permanent International Association of Road Congresses). (2020). \*Tunnel Fires and Ventilation: Current International Practices and Innovations\*.
- [38]. PIARC (Permanent International Association of Road Congresses). (2017). \*Manuale per la gestione della sicurezza nelle gallerie stradali\*.
- [39]. Poran, A., Tartakovsky, L. (2017). \*Performance and Emissions of Direct Injection Internal Combustion Engine Devised for Joint Operation with a High-pressure Thermochemical Recuperation System\*.
- [40]. PROLINE. (2019). \*Serbatoi e sistemi di stoccaggio per GPL: Tecnologie avanzate\*, Journal of Petroleum Technology.
- [41]. Ren, R., Zhou, H., Hu, Z., He, S., Wang, X. (2018). \*Statistic analysis of fire accidents in China highway tunnels 2000-2016\*, Elsevier.
- [42]. RISE Report. (2020). \*Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles\*, 2020:90.
- [43]. Sandia National Laboratories. (2020). \*Alternative Fuel Vehicles in Tunnels\*, LaFleur, C., Glover, A.M., Baird, A.R., Jordan, C.J., Ehrhart, B.D.
- [44]. Seike, M., Ejiri, Y., Kawabata, N., Tanaka, H. (2014). \*Estimation of HRR and Smoke Release Rate of Car Carrier Loaded with FCEV Vehicles in Road Tunnel\*.
- [45]. Spearpoint, M. (2014). \*Design Fires for Vehicles in Road Tunnels\*, Fire Protection Engineering.
- [46]. Stevenson, M. (2015). \*Road Tunnel Fires: Risk Assessment and Safety Design\*, Journal of Fire Protection Engineering.

- [47]. Sturm, P., Fobleitner, P., Fruhwirt, D., Gallec, R., Wenighofer, R. (2022). \*Full-Scale Fire Testing of Electric Vehicles in Road Tunnels\*, Fire Safety Journal, 126, 103587.
- [48]. Toyota. (2022). \*Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV): Tecnologie e applicazioni pratiche\*, Rapporto tecnico.
- [49]. Van Den Schoor, F. (2013). \*Effetti delle emissioni di GPL e analisi del rischio associato\*, Journal of Combustion and Safety Engineering.
- [50]. Veerapandien, P. (2021). \*Efficienza delle batterie agli ioni di litio nel settore automotive\*, Energy Storage Journal.
- [51]. Weerheijm, J., Van den Berg, B. (2014). \*Risk and Consequence Analysis of LPG Explosions in Tunnels\*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries.
- [52]. Yao, H., Zhao, L. (2018). \*Fuel Cell Vehicles: Hydrogen as an Alternative Fuel\*, International Journal of Hydrogen Energy.
- [53]. Zalosh, R.G. (1994). \*Dispersion of CNG in Naturally Ventilated Tunnels\*, Fire Safety Journal.
- [54]. Zhang, L., Smith, J. (2017). \*Flammability and Combustion Properties of Hydrocarbon Fuels\*, Journal of Fire Protection Engineering.