

S.S. N. 685 "DELLE TRE VALLI UMBRE"
TRATTO SPOLETO-ACQUASPARTA
2° stralcio: Firenzuola - Acquasparta

PROGETTO DEFINITIVO

COD. **PG373**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GP INGEGNERIA - ENGEKO - GDG - ICARIA

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Giorgio Guiducci
 Ordine degli Ingegneri della Prov. di Roma n° 14035

IL PROGETTISTA:

Dott. Ing. Federico Durastanti
 Ordine degli Ingegneri della Prov. di Terni n°A844

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini
 Ordine dei Geologi della Regione Umbria n°108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco
 Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A1373

IL RESPONSABILE DI PROGETTO

Dott. Ing. Rita Gandolfo

Il R.U.P.

Dott. Ing. Alessandro Micheli

PROTOCOLLO

DATA

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:



Dott. Ing. N. Granieri
 Dott. Ing. V. Truffini
 Dott. Ing. L. Spaccini
 Dott. Arch. A. Bracchini
 Dott. Ing. E. Bartolucci
 Dott. Ing. L. Casavecchia
 Dott. Geol. G. Cerquiglini
 Dott. Ing. F. Pambianco
 Dott. Ing. M. Abram
 Dott. Arch. C. Presciutti
 Dott. Agr. F. Berti Nulli
 Geom. S. Scopetta
 Geom. M. Zucconi

MANDANTI:



Dott. Ing. G. Guiducci
 Dott. Ing. E. Moscatelli
 Dott. Ing. A. Signorelli
 Dott. Ing. A. Belà
 Dott. Ing. G. Lucibello
 Dott. Arch. G. Guastella
 Dott. Geol. M. Leonardi
 Dott. Ing. G. Parente



Dott. Ing. C. Muller



Dott. Ing. D. Carlaccini
 Dott. Ing. C. Consorti
 Dott. Ing. E. Loffredo
 Dott. Ing. S. Sacconi



Dott. Ing. V. Rotisciani
 Dott. Ing. F. Macchioni
 Dott. Ing. G. Verini
 Dott. Ing. V. Piunno
 Dott. Ing. G. Pulli



GALLERIE NATURALI
ANALISI DI RISCHIO

Relazione

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG. ANNO	T00GN00SICRE01_A			
D P P G 3 7 3	D 2 2	CODICE ELAB. T 0 0 G N 0 0 S I C R E 0 1		A	-
D					
C					
B					
A	EMISSIONE	GENNAIO 2023	Finlco	F. Durastanti	G. Guiducci
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

INDICE

INDICE.....	1
1 PREMESSA.....	3
1.1 Documenti di riferimento	3
2 RIFERIMENTI NORMATIVI E DI LETTERATURA.....	4
2.1 Riferimenti normativi.....	4
2.2 Letteratura di riferimento.....	4
3 LOCALIZZAZIONE E SCHEDATURA DEL SISTEMA GALLERIA	6
3.1 Descrizione.....	6
3.2 DESCRIZIONE SISTEMA DI VENTILAZIONE	6
3.2.1 La Gestione Della Ventilazione In Emergenza	7
4 METODOLOGIA	8
4.1 FASE 1	8
4.1.1 Simulazioni CFD.....	9
4.1.2 Simulazioni di esodo	9
4.1.3 Prestazioni.....	9
4.1.4 Risultati	11
4.1.5 Analisi 1D per la determinazione del numero di jetfans necessari a realizzare la strategia di ventilazione	12
4.1.6 Scenari analizzati.....	12
4.1.7 Ipotesi di lavoro	13
4.1.8 Output.....	13
4.1.9 Risultati	13
4.2 FASE 2 – ANALISI DI RISCHIO (TRAFFICO ORDINARIO)	13
4.2.1 Frequenze di accadimento degli incendi.....	14
4.2.2 Modello fluidodinamico	14
4.2.3 Modello di coda	16
4.2.4 Modello di esodo	17
4.2.5 Configurazioni analizzate	19
4.2.6 Risultati	19
4.3 FASE 2 - ANALISI DI RISCHIO (TRANSITO DI MERCI PERICOLOSE)	20

4.3.1	Descrizione del software utilizzato	20
4.3.2	Dati di input e ipotesi di lavoro	21
4.3.3	Scenari analizzati.....	21
4.3.4	Modello fluidodinamico.....	22
4.3.5	Modello di traffico e di esodo.....	22
4.3.6	Frequenze di accadimento.....	23
4.3.7	Risultati	23
4.3.8	RISCHIO COMPLESSIVO.....	23
4.4	FASE 3 – SVILUPPO ANALISI CFD 3D	24
4.4.1	Scelta degli scenari.....	24
4.4.2	Prestazioni.....	25
4.4.3	Risultati	25
5	CONCLUSIONI.....	28
6	CONFRONTO COL DECRETO LEGISLATIVO 5 OTTOBRE 2006, n 264	29
7	MISURE INFRASTRUTTURALI.....	30
7.1	Requisiti minimi D.Lgs. 264/06 – Gallerie nuove.....	30
8	APPENDICE 1 - SVILUPPO DELL'ANALISI DI RISCHIO.....	33
8.1	Introduzione.....	33
8.2	Definizione di rischio.....	33
8.3	La valutazione del rischio	33
8.3.1	Stima delle frequenze di accadimento.....	35
8.3.2	Stima delle conseguenze.....	35
8.3.3	Quantificazione del rischio.....	36
9	APPENDICE 2 - DESCRIZIONE DEI SOFTWARE UTILIZZATI.....	38
9.1	FDS, PATHFINDER	40
9.2	IDA TUNNEL	40

1 PREMESSA

Il presente documento illustra l'analisi di rischio svolta in accordo alla Direttiva Europea 2004/54/EC e relativa alla galleria "Colle delle Rose" facente parte della strada SS685 "delle tre valli Umbre" tratto Spoleto - Acquasparta.

La galleria, a traffico bidirezionale, è composta da un singolo fornice di lunghezza pari a 3.995,5m.

1.1 Documenti di riferimento

NUMERO	RIFERIMENTI
1	Tavole sezioni, piante e particolari, riferimento elaborato: Planiprogetto.dwg, T00GA01OSTST01_A.dwg, T00GN00OSTST01_A.dwg, T00GN00OSTST03_A.dwg
2	Profilo altimetrico: TVA_CdR-Profilo.dwg
3	Progetto Definitivo – Gennaio 2023
4	Studio del traffico

2 RIFERIMENTI NORMATIVI E DI LETTERATURA

2.1 Riferimenti normativi

NUMERO	RIFERIMENTI
1	Direttiva 2004/54/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea - 29/04/2004.
2	Decreto Legislativo n. 264, 5 ottobre 2006. Attuazione della Direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea.
3	Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali secondo la normativa vigente. – ANAS Seconda edizione 2009

2.2 Letteratura di riferimento

NUMERO	RIFERIMENTI
1	CETU (2003). Guide to Road Safety Documentation. Booklet 4 Specific Hazard Investigations.
2	Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2015). The Relationship between Obstructed and Unobstructed Walking Speed: Results from an Evacuation Experiment in a Smoke Filled Tunnel. In K. Boyce (Ed.), International symposium on Human Behaviour in Fire, (pp. 537-548). Cambridge, United Kingdom.
3	NFPA. (2011). NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. Quincy, USA: National Fire Protection Association.
4	SFPE (2002). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. New York: Springer New York: Imprint Springer.
5	Sandin, K., Grenberg, K., Husted, B. P., Scozzari, R., Fronterre, M., & Ronchi, E. (2019). Verification and Validation of the ARTU (Tunnel Fire Risk analysis) tool. Lund University, Department of Fire Safety Engineering.
6	Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation. 2012R05EN. PIARC
7	ISO16738:2009. Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people
8	Hong-Ming Jang, F.Chen, On the determination of the aerodynamic coefficients of highway tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 90, Issue 8, 2002, Pages 869-896, ISSN 0167-6105,.
9	Fridolf, Karl, Enrico Ronchi, Daniel Nilsson, and Håkan Frantzich. 2019. "The Representation of Evacuation Movement in Smoke- Filled Underground Transportation Systems." Tunnelling and Underground Space Technology 90 (April): 28–41

10	S. Desanghere, E. Cesmat, D. Giuliani, Studio sperimentale e numerico per valutare l'interesse di un water mist sistema nel traforo del Monte Bianco. Lombardi e GEIE TMB
11	SOLIT, Safety of life in tunnels, Engineering guidance for a comprehensive evaluation of tunnel with Fixed Fire Fighting Systems, Scientific report of the SOLIT ² research project, prepared by the SOLIT ² consortium. Annex 1: status analysis. SOLIT ² consortium 2012

3 LOCALIZZAZIONE E SCHEDATURA DEL SISTEMA GALLERIA

La galleria Colle delle Rose si trova in Umbria sulla strada SS685 delle tre valli umbre, tra i comuni di Acquasparta (TR) e Spoleto (PG).

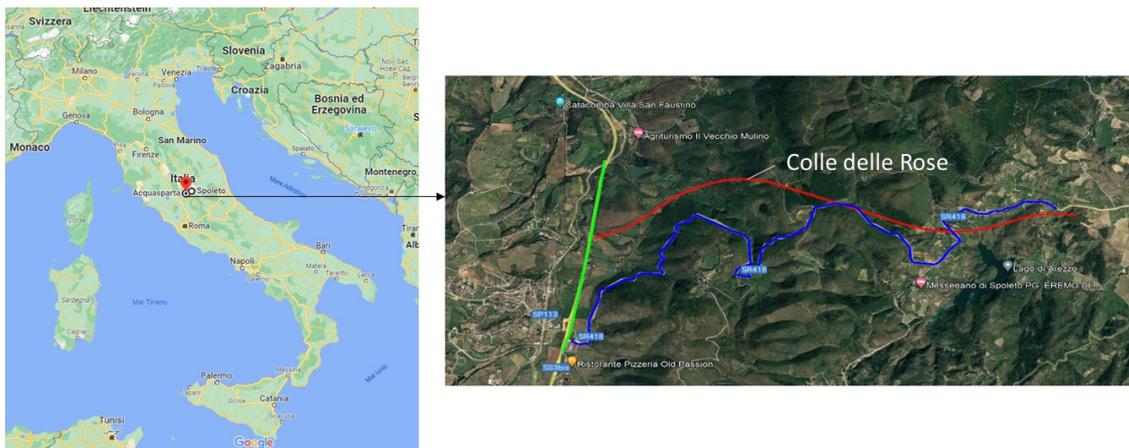


Figura 1: localizzazione

3.1 Descrizione

La galleria Colle delle Rose è una galleria nuova, in fase di progettazione definitiva.

3.2 DESCRIZIONE SISTEMA DI VENTILAZIONE

La galleria a singolo fornice, scavato con metodo tradizionale, è a due corsie, una per direzione di traffico.

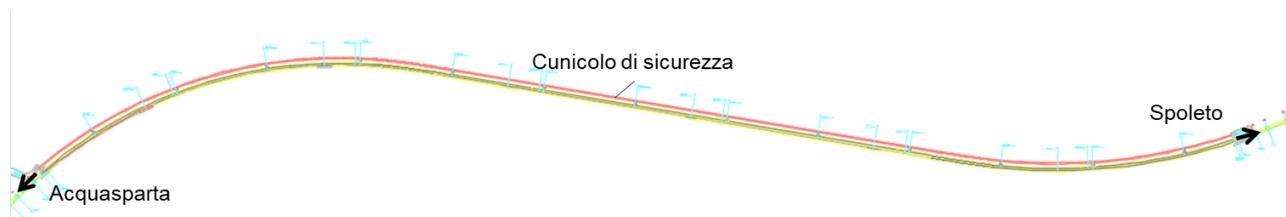


Figura 2: planimetria

La galleria ha andamento in salita in direzione Spoleto. In Tabella 1, sono riportate le caratteristiche geometriche.

Tabella 1: principali caratteristiche geometriche

PM	1447.5 – 4517.5	4517.5 - 5443
Lunghezza [m]	3070	925.5
Sezione [m ²]	80.44 ÷ 106.8 (tratti con piazzole)	
Pendenza media	2.8%	0.6%

La galleria è dotata di 13 bypass pedonali che collegano la galleria a un cunicolo di sicurezza parallelo. I bypass hanno inter-distanza di 300m. Il primo si trova a 215m dall'imbocco sud (lato Acquasparta).

In Figura 2, sono riportati il profilo altimetrico e la posizione del bypass.

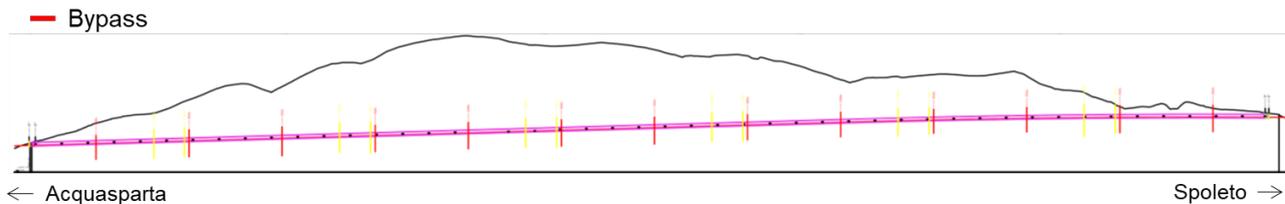


Figura 3: profilo altimetrico e posizione bypass

Il sistema di ventilazione è di tipo longitudinale e consiste in 16 coppie di jet-fans, 8 coppie per portale. L'inter-distanza tra le coppie di jet-fans è 100m (200m dai portali).

In Tabella 2, sono riportate le caratteristiche tecniche dei jet-fans.

Tabella 2: caratteristiche jet-fans

Parametro	Valore
Portata	38.8 m ³ /s
Diametro girante	1.25m
Velocità di scarica	31.6 m/s
Spinta Nominale	1400N
Coefficiente installazione	0.8

Il sistema di ventilazione risulta dimensionato in modo da realizzare la velocità critica e favorire l'intervento delle squadre di soccorso.

3.2.1 La Gestione Della Ventilazione In Emergenza

Poiché la galleria ha traffico bidirezionale, si assume che il transitorio di ventilazione, in caso di emergenza, preveda l'attuazione di una strategia di controllo della ventilazione che:

- nelle prime fasi dopo l'insacco (autoevacuazione degli utenti), favorisca la stratificazione dei fumi in modo da mantenere le condizioni di vivibilità accettabili lungo i percorsi di esodo;
- una volta terminato l'esodo, realizzi la velocità critica in modo da permettere un più agevole intervento delle squadre di soccorso.

Al fine di sviluppare l'analisi di rischio è stata condotta un'analisi preliminare finalizzata a determinare la logica di ventilazione nel transitorio di ventilazione.

4 METODOLOGIA

Lo studio complessivo si articola in 3 fasi:

- **fase 1:** per definire quantitativamente la strategia di controllo della ventilazione in caso di emergenza, è stata condotta un'analisi fluidodinamica multiscala in modo da analizzare alcune alternative nella modalità di gestione. Sono state condotte delle simulazioni CFD 3D + esodo confrontando le seguenti due modalità operative:
 - A. ventilazione non attiva in modo da massimizzare la stratificazione dei fumi;
 - B. ventilazione attiva per realizzare una velocità di controllo (circa 1.5m/s) verso il portale a quota più alta (lato Spoleto) che favorisse il lavaggio dei fumi e sostenesse la stratificazione dei fumi.

Le strategie di ventilazione A e B sono state messe a confronto passando attraverso il monitoraggio delle condizioni di vivibilità lungo i percorsi di esodo e il numero di fatalities;

Dopo aver determinato la strategia più efficace, è stato determinato l'eventuale numero di jet-fans necessario a realizzarla.

In questo modo, sono determinate le condizioni operative su cui basare le simulazioni fluidodinamiche da abbinare a quelle di esodo nello svolgimento dell'analisi di rischio.

- **fase 2:** sviluppo dell'analisi di rischio vera a propria. L'analisi è svolta attraverso il software ARTU in modo da determinare la curva FN.

L'analisi di rischio è stata sviluppata considerando due configurazioni:

- **C1:** sistema di mitigazione assente;
- **C2:** sistema di mitigazione presente.

in modo da valutare quantitativamente in termini di riduzione delle fatalities, il contributo del sistema di mitigazione.

- **fase 3:** dal momento che la galleria ha traffico bidirezionale e la strategia di ventilazione ha lo scopo di favorire la stratificazione dei fumi, in particolare nelle prime fasi successive all'incendio (fase di auto-evacuazione), sono state sviluppate opportune simulazioni CFD 3D al fine di valutare la consistenza dei risultati ottenuti mediante l'analisi di rischio. L'analisi CFD 3D permette, infatti, di cogliere con maggiore accuratezza fenomeni di natura 3D come la stratificazione.

Sono sviluppati 2 scenari di incendio opportunamente combinati con i corrispondenti di esodo nelle due configurazioni:

- **C1:** sistema di mitigazione assente;
- **C2:** sistema di mitigazione presente.

4.1 FASE 1

Analisi CFD + esodo per la determinazione della strategia di ventilazione

Le analisi sono state svolte attraverso i software FDS e Pathfinder . La descrizione di questi sw è riportata al capitolo 13.

4.1.1 Simulazioni CFD

È considerato l'incendio di un mezzo pesante con carico infiammabile posto a metà galleria, alla PM = 3447. Sono stati sviluppati 2 scenari corrispondenti alle due modalità di gestione del transitorio di ventilazione come riportato al capitolo 4:

- **scenario 1:** strategia A (sistema di ventilazione non attivo);
- **scenario 2:** strategia B (sistema di ventilazione attivo che realizza una velocità di controllo nella galleria di circa 1.5m/s).

In Figura 13, è riportata la posizione dell'incendio.

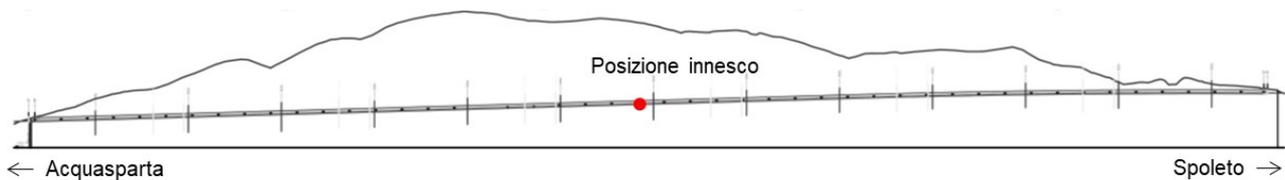


Figura 4: posizione innesco su profilo altimetrico, analisi CFD

Di seguito sono riportate le condizioni al contorno e le condizioni ambiente degli scenari.

Condizioni	Scenario 1 (vent. non attiva)	Scenario 2 (vent. attiva)
Al contorno	Superfici open ai portali.	Portale basso (Acquasparta): v ingresso pari a 1.5m/s Portale alto (Spoleto): superficie open
Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • T ambiente = 17.2°C (valore medio tra le temperature di progetto estivo - UNI10339- e invernale- UNI5364- per la provincia di Terni); • Pressione = 1atm; • Differenza di pressione ai portali = 0 Pa. 	

4.1.2 Simulazioni di esodo

Nelle simulazioni di esodo gli utenti hanno una velocità di movimento distribuita uniformemente su (0.6 ÷ 1.2) m/s in base alla norma ISO16738 . Come descritto in dettaglio al paragrafo 6.2.3, la velocità degli utenti varia in funzione:

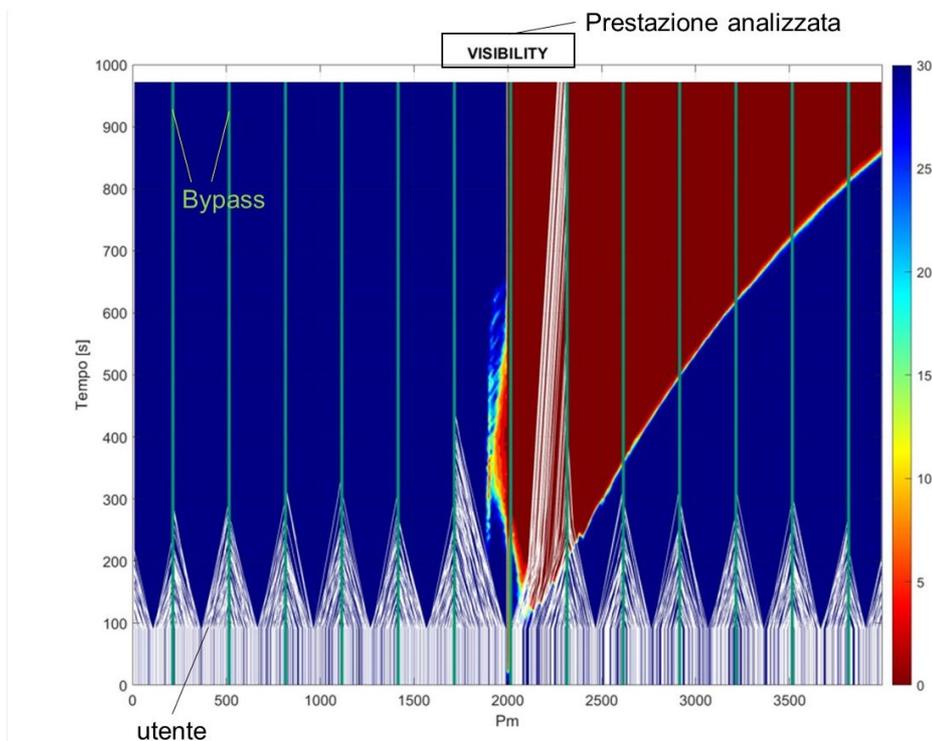
- dell'interazione con gli altri utenti;
- della visibilità all'interno della galleria, determinata attraverso le simulazioni CFD.

4.1.3 Prestazioni

Le prestazioni monitorate sono:

- FED termica e chimica;
- numero di fatalities in relazione alla FED totale ottenuta dalla somma della FED termica e della FED chimica ($FED_{totale} \leq 0.3$ - NFPA 502);
- visibilità, temperatura dell'aria e concentrazione del monossido di carbonio (CO) su un piano orizzontale a 2m dal piano di calpestio;
- irraggiamento termico sulle superfici solide.

L'andamento di visibilità, temperatura dell'aria, concentrazione CO e irraggiamento sono riportati su delle mappe dove sulle ascisse sono riportate le PM e sulle ordinate il tempo di simulazione in secondi. Le linee bianche indicano il percorso degli utenti che si dirigono verso i bypass (in verde). Di seguito è riportato un plot di esempio.



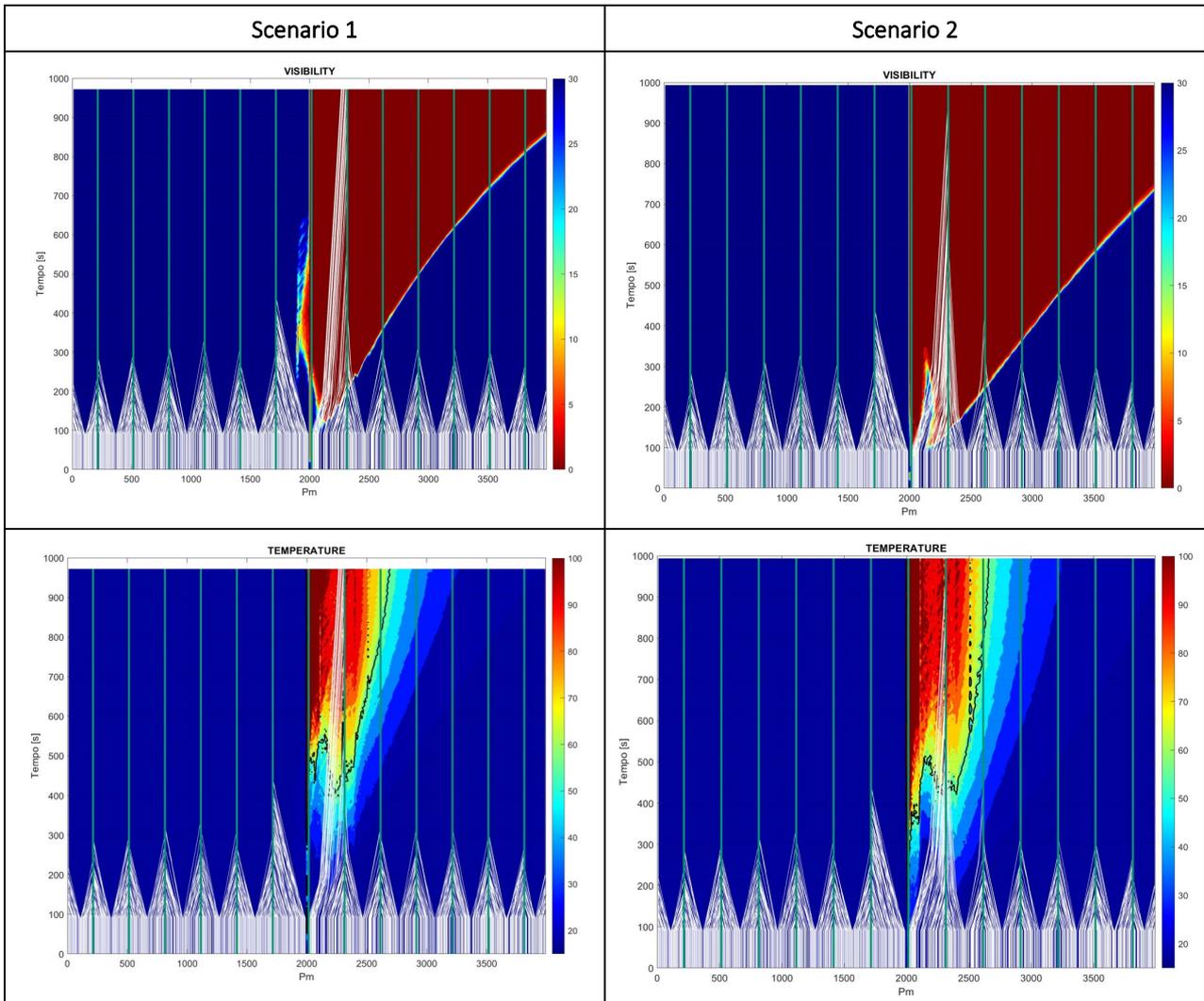
4.1.4 Risultati

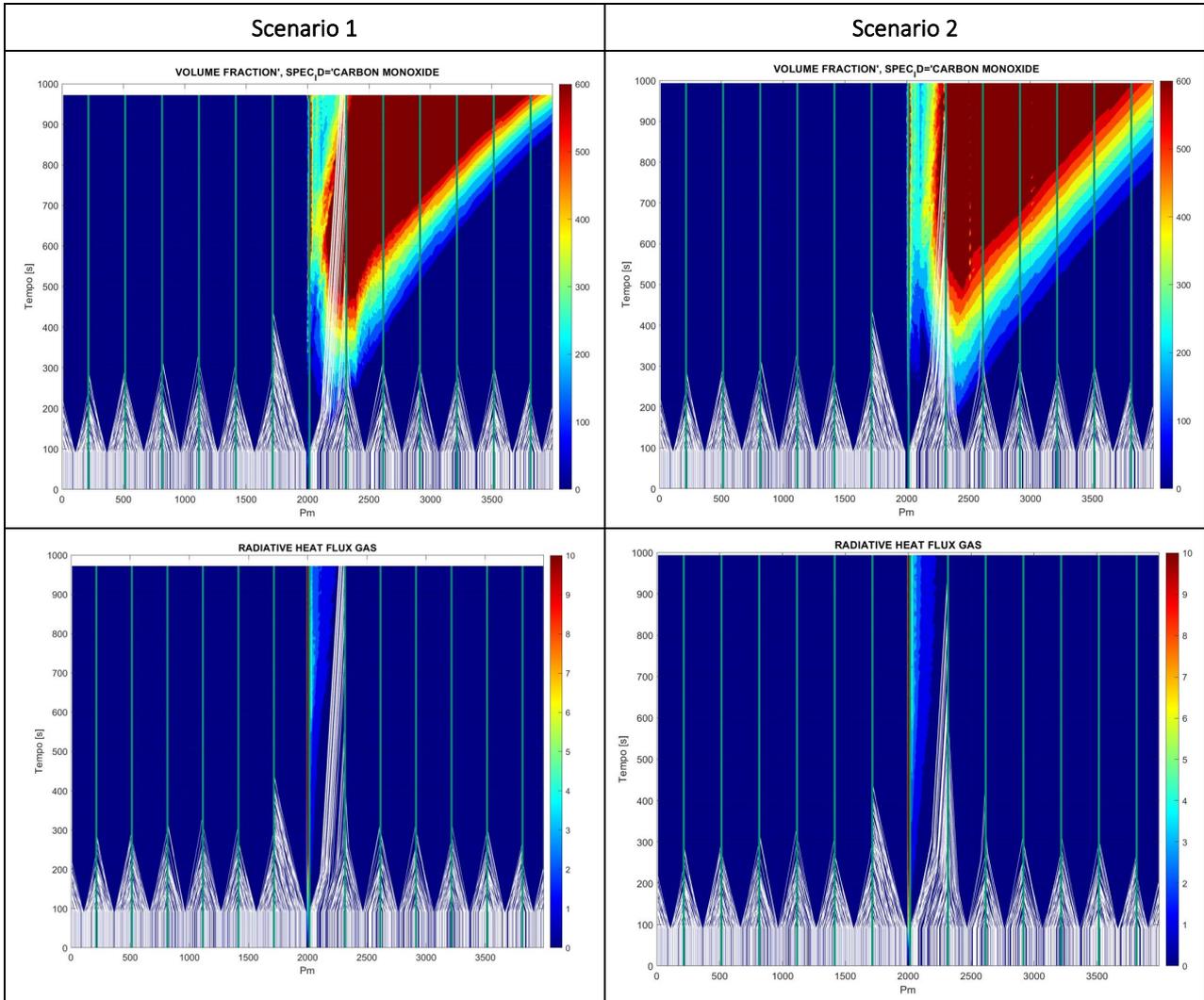
La strategia di ventilazione più efficace è la strategia B cui corrispondono valori di FED e di fatalities inferiori. L'azione della ventilazione consente un lavaggio dei fumi nell'area in prossimità dell'incendio, migliorando la visibilità e favorendo un esodo più rapido da parte degli utenti che sono pertanto meno esposti agli effetti termici e chimici dell'incendio: temperatura e CO.

Tabella 3: risultati analisi CFD

Scenario	FED termica	FED chimica	#fatalities
1 (strategia A, ventilazione non attiva)	0.60	0.40	35
2 (strategia B, ventilazione attiva)	0.54	0.26	27

Tabella 4: risultati analisi CFD





4.1.5 Analisi 1D per la determinazione del numero di jetfans necessari a realizzare la strategia di ventilazione

Sono stati sviluppati una serie di scenari 1D mediante il software IDA tunnel (per la descrizione di tale sw si rimanda al capitolo 13.

4.1.6 Scenari analizzati

Gli scenari sono svolti in regime stazionario. Di seguito sono riportate le variabili considerate.

Tabella 5: variabili analisi 1D, fase 1

Variabili	Valori
Posizioni d'incendio [PM]	426 3700

Variabili	Valori
Potenza incendio [MW]	8 100

4.1.7 Ipotesi di lavoro

È considerato un coefficiente di attrito uguale a 0.026 in base a dati di letteratura di settore (Hong-Ming et al). Essendo un tunnel bidirezionale, si assume che al tempo $t = 0$ la ventilazione sanitaria longitudinale sia attiva.

4.1.8 Output

L'output dell'analisi è il numero di jet-fans necessari a raggiungere una velocità dell'aria di circa 1.5m/s.

4.1.9 Risultati

La velocità dell'aria è funzione della ventilazione longitudinale e dell'effetto camino dei fumi.

Per gli scenari alla PM 426, vicino al portale più basso, l'effetto camino è massimizzato e la velocità dell'aria è debolmente dipendente dal numero di jet-fans attivi. In particolare, il caso a 100MW presenta una velocità pari a 3.4m/s dovuta principalmente all'effetto camino (3.3 m/s senza ventilazione).

Per gli scenari alla PM 3700, vicino al portale più alto, l'effetto camino è minimo e, indipendentemente dalla potenza d'incendio, **sono necessari 2 jet-fans attivi per raggiungere una velocità di 1.5 m/s.**

Tabella 6: risultati analisi 1D, fase 1

MW potenza incendio	PM posizione innesco	#jetfans	Velocità dell'aria [m/s]
8	426	2	1.92
	3700		1.48
100	426		3.4
	3700		1.44

4.2 FASE 2 – ANALISI DI RISCHIO (TRAFFICO ORDINARIO)

Introduzione

In accordo al Dlgs 264/06, l'analisi è svolta tenendo conto del rischio relativo ai soli eventi di incendio. La presente analisi, svolta con il software proprietario ARTU tiene conto del traffico ordinario cioè della presenza di veicoli leggeri, commerciali, bus e pesanti con trasporto di merci generiche e infiammabili.

Di seguito i dati di input e ipotesi di lavoro

4.2.1 Frequenze di accadimento degli incendi

Le frequenze di accadimento dei diversi scenari di incendio sono assunte pari a quelle indicate dal CETU.

Tabella 7: frequenze di accadimento degli incendi [incendi / 100 milioni veh - km]

Tipo di veicolo	Incendi/100 mil veh-km
Veicoli leggeri	2
HGV e bus	1.5
HGV con carico infiammabile	0.5

4.2.2 Modello fluidodinamico

ARTU analizza tre famiglie di scenari, ciascuna relativa all'incendio di un particolare tipo di veicolo:

- veicolo leggero di grossa cilindrata;
- veicolo commerciale, bus o veicolo pesante con carico generico (HGV);
- veicolo pesante con carico infiammabile (flammable load HGV).

A ciascuna tipologia di veicolo è associata una diversa curva di rilascio di calore (curva HRR). La curva HRR esprime l'andamento nel tempo della potenza termica rilasciata dall'incendio. Le curve utilizzate per i diversi tipi di veicolo sono quelle indicate dal CETU (Figura 6).

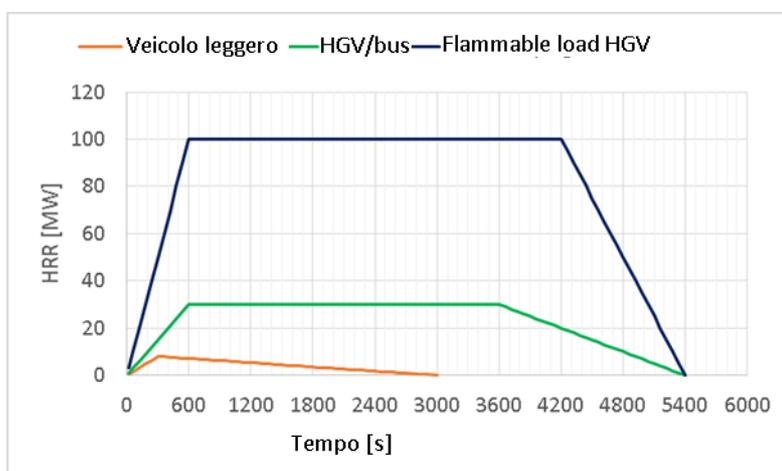


Figura 5: curve HRR

Al fine di tenere conto della presenza del sistema di mitigazione, sulla base di letteratura tecnica di settore si è ipotizzato:

- che l'effetto di controllo sulla crescita dell'incendio si traducesse in una riduzione della potenza massima dell'incendio come riportato da SOLIT;

- una riduzione di circa il 30% sul valore dell' HRR_{MAX} delle curve HRR indicate dal CETU. Tale riduzione corrisponde al valore minimo ottenuto in test d'incendio sperimentali dove sono state registrate riduzioni tra il 30% e l'80% dei valori di HRR_{max} (Desanghere et al.).

In Figura 5 è riportato l'andamento delle curve HRR mitigate (linee continue) confrontate con le curve HRR nominali (linee tratteggiate).

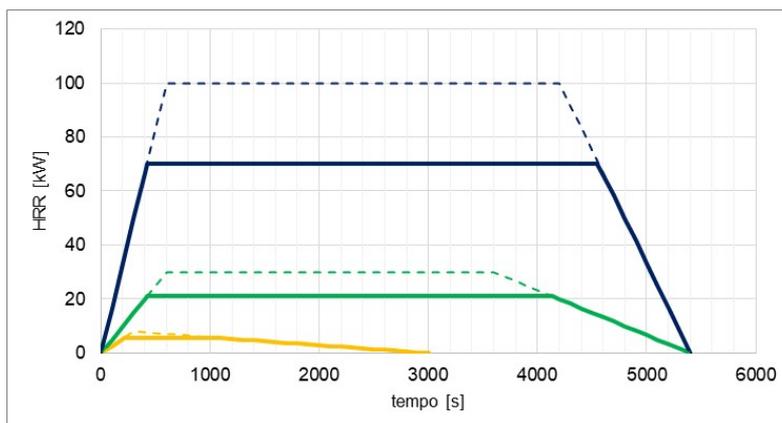


Figura 6: curve HRR che tengono conto del sistema di mitigazione

Il combustibile equivalente è il materiale che, nella modellazione, prende parte alla combustione. Esso influenza la composizione dei fumi prodotti nella simulazione. La quantità dei fumi prodotta dipende invece dalla curva HRR utilizzata.

Considerando la presenza di mezzi pesanti, si è scelto - conservativamente - un combustibile di tipo plastico con alta emissione di soot cui corrisponde la produzione di fumi densi che limitano fortemente la visibilità degli utenti durante l'esodo.

Il combustibile utilizzato è il poliuretano, le cui caratteristiche sono riportate nell'SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.

Tabella 8: caratteristiche del combustibile

Parametro	Valore
Sostanza	Poliuretano
Composizione chimica C - H - O - N	1 - 1.7 - 0.03 - 0.08
Soot yield - CO yield	0.198 - 0.042
O ₂ yield - CO ₂ yield	2.39 - 2.08

Per le condizioni ambiente sono utilizzati i valori riportati di seguito. Gli effetti delle condizioni meteorologiche (presenza di vento e salto barometrico ai portali dovuto al meteo) non sono tenuti in conto nell'analisi.

Tabella 9: condizioni ambiente

Parametro	Valore
Temperatura	17.2°C (valore medio tra le temperature di progetto estivo - UNI10339- e invernale-UNI5364- per la provincia di Terni)
Pressione	1 atm

4.2.3 Modello di coda

La Tabella 7 riporta i dati di input relativi al modello di coda. A seconda della posizione dell'incendio, della composizione di traffico e delle condizioni di traffico (fluidi, di punta, congested) che variano in maniera aleatoria, ARTU calcola la lunghezza e la densità di coda di veicoli e, di conseguenza, il numero e la posizione nel tunnel degli utenti coinvolti.

La probabilità di traffico congestionato è pari al 3%. Questo significa ipotizzare che per un'ora al giorno per 5 giorni a settimana il traffico sia congestionato (veicoli in coda), mentre per il resto del tempo il traffico sia fluido.

Tabella 10: dati di input per il modello di coda

Parametro	Valore totale	Valore per senso di marcia
TMGA - Traffico medio giornaliero annuo (veic/gg)	8353 Fonte: committenza, proiezione al 2032	4176.5
TOM - Traffico orario medio (veic/h)	522.1 Ipotizzato pari a TMGA/16	261.05
Traffico di punta (veic/h)	1253 Fonte: committenza	626.5
Traffico minimo (veic/h)	83.5 Fonte: committenza	41.75
Limite di velocità medio (km/h)	100	-
Probabilità di traffico congestionato	3% Fonte: committenza	3% Fonte: committenza
Densità dei veicoli in coda, traffico fluido (veic/km-corsia)	165 Fonte: PIARC 2012R05EN	
Densità dei veicoli in coda, traffico congestionato (veic/km-corsia)	165 ipotesi	
Percentuale di veicoli leggeri sul totale dei veicoli	98.65 % Fonte: committenza, proiezione al 2032	
Percentuale di veicoli pesanti sul totale dei veicoli	1.35% Fonte: committenza, proiezione al 2032	
Percentuale di veicoli pesanti che trasporta merci pericolose sul totale dei veicoli pesanti	0.2% Fonte: committenza	
Percentuale di veicoli pesanti che trasporta merci infiammabili sul totale dei veicoli che trasportano merci pericolose	10% Fonte: committenza	

Parametro	Valore totale	Valore per senso di marcia
Percentuale di bus sul totale dei veicoli pesanti	12.2% valore medio della % di bus presenti nel mix di traffico "Autostrade extraurbane" secondo il CNR - BU178/95 "Catalogo delle pavimentazioni stradali"	
Tempo di attivazione dell'allarme	60s dall'innesco ipotesi basata sulle dotazioni di sicurezza e sulle caratteristiche della galleria	
Numero medio di utenti a bordo di un veicolo leggero	1.7 ipotesi cautelativa. CETU indica 1.5	
Numero medio di utenti a bordo di un mezzo pesante	1 ipotesi	
Numero medio di utenti a bordo di un bus	27 Fonte: "European Environment Agency" per l'Italia	

4.2.4 Modello di esodo

La Tabella 8 riporta i dati di input relativi al modello di esodo.

Tabella 11: dati di input per il modello di esodo

Parametro	Valore
Velocità degli utenti in condizioni indisturbate	uniformemente distribuito tra 0.6÷1.2m/s
Tempo di pre-movimento	uniformemente distribuito tra 60÷300s

Per quanto riguarda la velocità degli utenti in condizioni indisturbate, è stata impiegata una distribuzione statistica che tiene conto della presenza di utenti con diversa età e condizioni di salute. Sulla base della norma ISO16738, si fa riferimento a rispettivamente:

- valore minimo = 0.6 m/s, che tiene conto di persone con ridotta mobilità o bambini,
- valore massimo = 1.2m/s, che si riferisce ad adulti senza problemi di mobilità che si muovono su un terreno regolare.

Il valore di velocità inizialmente assegnato a ciascun utente è ricalcolato (cioè eventualmente ridotto) nel corso della simulazione in funzione dell'interazione con gli altri utenti (code, colli di bottiglia) e con i prodotti della combustione (riduzione della visibilità dovuta ai fumi).

Il tempo di pre-movimento è il tempo che intercorre tra l'innesco e l'inizio dell'esodo. Questo tempo è composto, secondo la ISO16738 (Figura 7), dai seguenti contributi:

- t_{det} - tempo di rilevazione dell'incendio;
- t_{warn} - tempo di attivazione dell'allarme;
- t_{rec} - tempo di riconoscimento (cioè il tempo che gli utenti impiegano a recepire l'allarme);
- t_{res} - tempo di risposta.

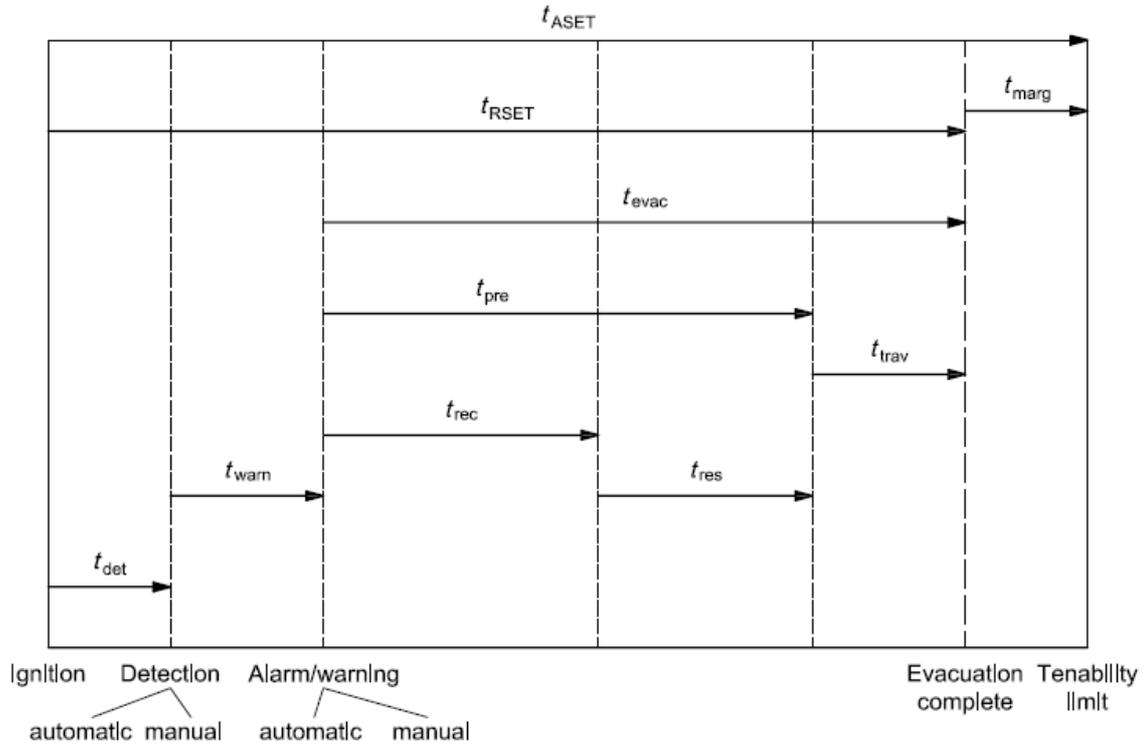


Figura 7: elementi che compongono il tempo di esodo (ISO16738)

Sulla base delle dotazioni presenti in galleria, si assume che la somma del tempo di rilevazione e allarme sia pari a 60s.

Il tempo di riconoscimento e risposta è assunto con una distribuzione uniforme tra 0s e 240s.

4.2.5 Configurazioni analizzate

Sono state analizzate le seguenti configurazioni impiantistiche che differiscono per la presenza dell'impianto di mitigazione.

Tabella 12: configurazioni analizzate con ARTU

Configurazione	Sistema di mitigazione	Sistema di ventilazione
C1	ASSENTE	PRESENTE (strategia e logica di ventilazione da paragrafo 3.1.1)
C2	PRESENTE	

4.2.6 Risultati

Le figure seguenti mostrano la probabilità di accadimento dei diversi gruppi di scenari. Ciascuno di questi gruppi presenta una serie di sottoscenari che si differenziano per la posizione dell'incendio lungo il tunnel e per il numero, posizione e caratteristiche degli utenti coinvolti.

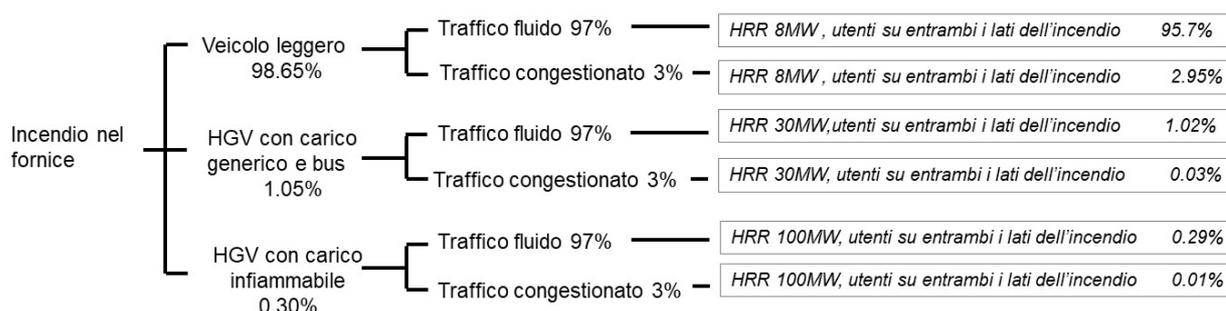


Figura 8: gruppi di scenari

La Figura 10 riporta le curve FN relative alla galleria in esame nelle due configurazioni (con e senza sistema di mitigazione). Le linee rossa e verde individuano la zona di accettabilità ALARP secondo le Linee guida ANAS.

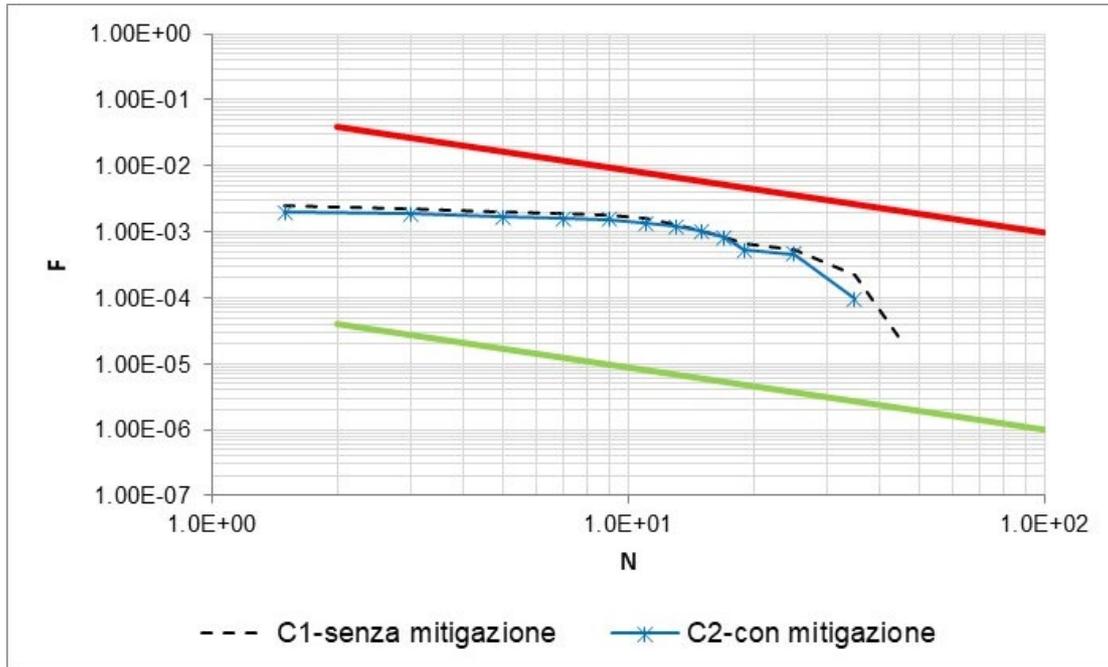


Figura 9: curve FN per il traffico ordinario

Tabella 13: VAD per il traffico ordinario

	VAD
C1-senza mitigazione	0.149
C2-con mitigazione	0.126

Le curve FN si trovano all'interno della regione ALARP. I risultati mostrano come il sistema di mitigazione permetta di ottenere una curva FN più bassa in particolare per valori delle ascisse più alti che corrispondono a un numero più alto di fatalities (VAD inferiore).

4.3 FASE 2 - ANALISI DI RISCHIO (TRANSITO DI MERCI PERICOLOSE)

Introduzione

La presente analisi si riferisce al trasporto di merci che possono dar luogo a scenari diversi dall'incendio: esplosione o rilascio di sostanza tossiche.

L'analisi è sviluppata con il software QRAM (PIARC) e si riferisce alla configurazione senza sistema di mitigazione.

4.3.1 Descrizione del software utilizzato

QRAM è un software sviluppato dal PIARC che consente di stimare il rischio sociale dovuto al transito di sostanze pericolose.

Esiste una grande varietà di merci pericolose che sono trasportate su gomma, pertanto gli sviluppatori di QRAM hanno selezionato 13 scenari rappresentativi che includono: eventi BLEVE, pool fire, torch fire, esplosioni e rilasci di sostanze tossiche. La reference guide del software espone il procedimento mediante cui sono stati selezionati gli scenari.

Il software QRAM stima il rischio sociale (curva FN) tenendo in conto:

- frequenze di accadimento dei diversi tipi di incidenti,
- conseguenze degli incidenti sulla popolazione,
- vie di esodo e sistemi di protezione presenti.

QRAM permette di stimare le conseguenze sia sugli utenti all'interno della galleria che sulla popolazione all'esterno, e di analizzare l'esito di incidenti che avvengono in tratti stradali scoperti.

La stima delle conseguenze incidentali all'interno delle gallerie è basata su una logica mono-dimensionale semplificata.

4.3.2 Dati di input e ipotesi di lavoro

Il software QRAM permette di scegliere se considerare le sole fatalità o anche i danni subiti dagli utenti, e se tenere o meno in conto utenti esposti al di fuori della galleria. Nella presente analisi sono considerati:

- le sole fatalità;
- i soli utenti all'interno in galleria.

4.3.3 Scenari analizzati

La Tabella 11, riporta gli scenari standard disponibili in QRAM. Nella presente analisi sono analizzati quelli evidenziati in azzurro. In particolare:

- gli scenari d'incendio (scenari 1 e 2) sono analizzati in dettaglio nell'analisi svolta mediante ARTU, e pertanto non sono ripetuti con QRAM;
- lo scenario relativo al cloro (scenario 6) non è analizzato poiché si tratta di un tipo di trasporto vietato in Europa.

Tabella 14: scenari analizzati

Scenario Nr:	Description	Capacity of tank	Size of breach (mm)	Mass flow rate (kg/s)
1	HGV fire 20 MW	-	-	-
2	HGV fire 100 MW	-	-	-
3	BLEVE of LPG in cylinder	50 kg	-	-
4	Motor spirit pool fire	28 tonnes	100	20.6
5	VCE of motor spirit	28 tonnes	100	20.6
6	Chlorine release	20 tonnes	50	45
7	BLEVE of LPG in bulk	18 tonnes	-	-
8	VCE of LPG in bulk	18 tonnes	50	36
9	Torch fire of LPG in bulk	18 tonnes	50	36
10	Ammonia release	20 tonnes	50	36
11	Acrolein in bulk release	25 tonnes	100	24.8
12	Acrolein in cylinder release	100 litres	4	0.02
13	BLEVE of liquefied refrigerated CO2	20 tonnes	-	-

4.3.4 Modello fluidodinamico

Il software QRAM utilizza un modello fluidodinamico semplificato che utilizza come input:

- lunghezza e sezione tipo della galleria;
- pendenza della galleria;
- tipo di scavo (TBM) e di collocazione della galleria (in roccia);
- presenza di impianto di drenaggio (pozzetti di raccolta di superficie netta 0.0.48m² e interasse 50m) e rivestimento antincendio.

4.3.5 Modello di traffico e di esodo

Le ipotesi comuni ai software QRAM e ARTU sono riportate tra quelle elencate ai paragrafi 5.3.3 e 5.3.4. Per quanto riguarda la percentuale di veicoli che trasportano i diversi tipo di merci pericolose, si è fatto riferimento ai dati relativi alla Francia (Tabella 15).

Tabella 15: merci pericolose

	France
LPG in cylinder	0.008
All Flammable Liquids	0.363
Volatil Flammable Liquids	0.182
Chlorine	negligible
LPG in bulk	0.024
Toxic gases	0.015
Toxic liquids in bulk	0.002
Toxic liquids in cylinders	0.002
Non Flammable non toxic liquefied gases	0.013
DG potentially leading to a large (100MW) fire (except liquids)	0.006

4.3.6 Frequenze di accadimento

Sono utilizzati i valori di default del software QRAM. Questi valori sono ottenuti a partire dai dati contenuti in banche dati incidentali, e tenendo conto di una serie di fattori correttivi. Il procedimento di calcolo delle frequenze di accadimento è riportato nel Reference Manual del software QRAM.

4.3.7 Risultati

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi svolta col software QRAM.

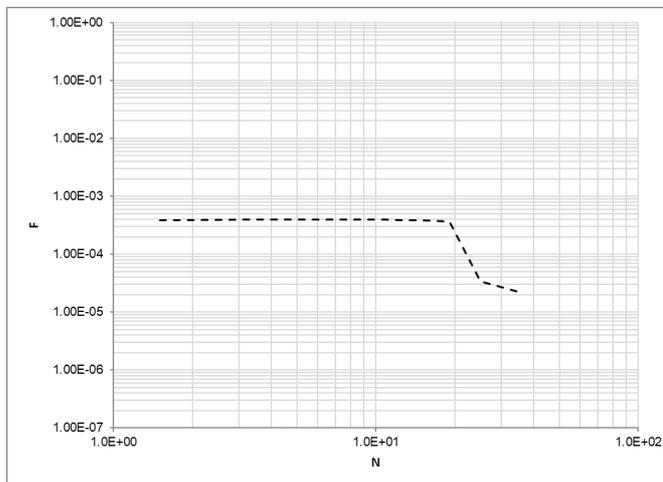


Figura 10: curva FN per il transito di merci pericolose

Tabella 16: VAD per il trasporto di merci pericolose

	VAD
C1-senza mitigazione	0.0086

4.3.8 RISCHIO COMPLESSIVO

Di seguito sono riportate le curve FN risultanti ottenute combinando la curva FN relativa al traffico ordinario e quella ottenuta per il traffico delle merci pericolose.

La curva risultante si riferisce alla configurazione “senza sistema di mitigazione”.

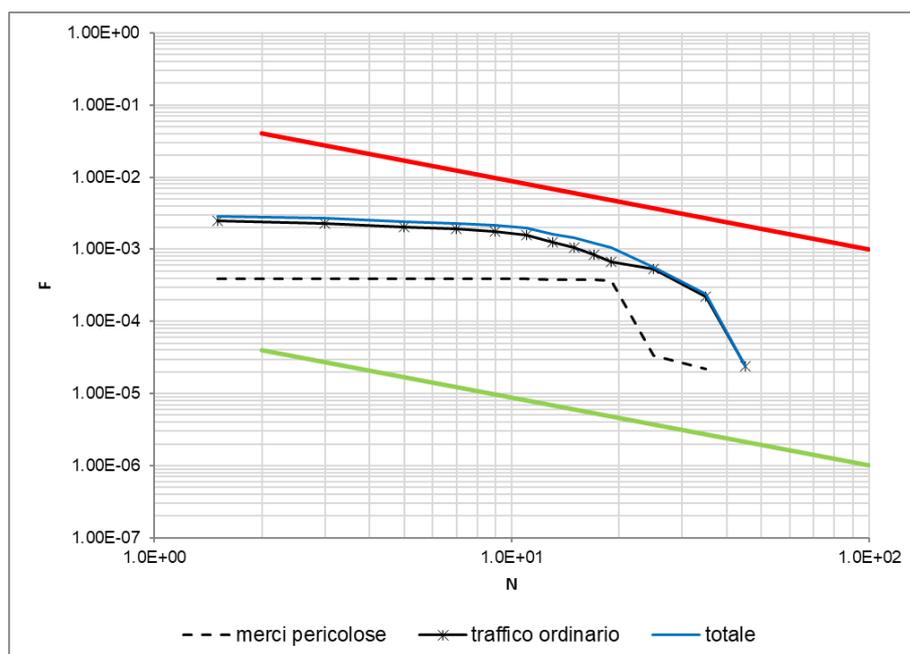


Figura 11: rischio complessivo configurazione C1

Tabella 17: VAD per il traffico ordinario

Configurazione	VAD traffico ordinario	VAD merci pericolose	VAD totale
C1-senza mitigazione	0.149	0.0086	0.1576

Le curve FN risultanti ricadono all'interno della zona ALARP.

4.4 FASE 3 – SVILUPPO ANALISI CFD 3D

È stato poi sviluppato un approfondimento al fine di verificare la consistenza dei risultati ottenuti mediante l'analisi di rischio, eseguendo alcuni scenari mediante simulazioni CFD 3D e di esodo.

4.4.1 Scelta degli scenari

Gli scenari si riferiscono all'incendio di un mezzo pesante con carico infiammabile cui corrisponde, nell'analisi di rischio svolta con ARTU, il maggior numero di fatalities in assenza di impianto di mitigazione.

In Figura 12, è riportato il numero massimo di morti ottenuti in funzione della tipologia di innesco in assenza dell'impianto di mitigazione.

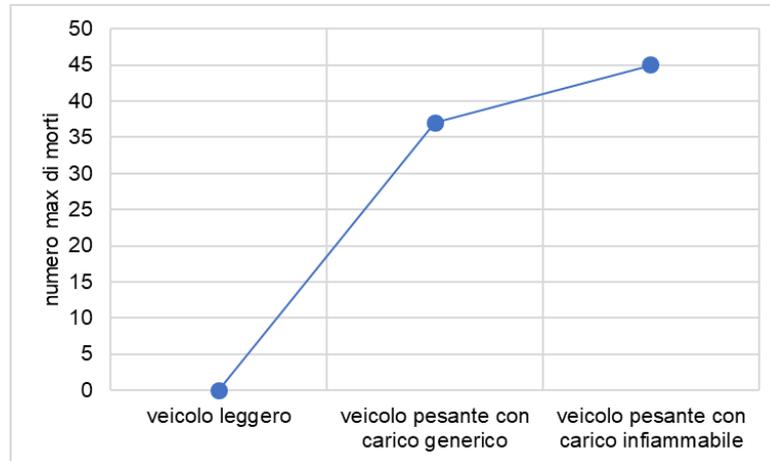


Figura 12: scenari ARTU, numero massimo di morti in configurazione C1

Le analisi sono state svolte considerando l'incendio di un mezzo pesante con carico infiammabile in due diverse configurazioni:

- **scenario 1:** configurazione C1 (sistema di mitigazione attivo);
- **scenario 2:** configurazione C2 (sistema di mitigazione non attivo).

In Figura 13, è riportata la posizione dell'innescò.

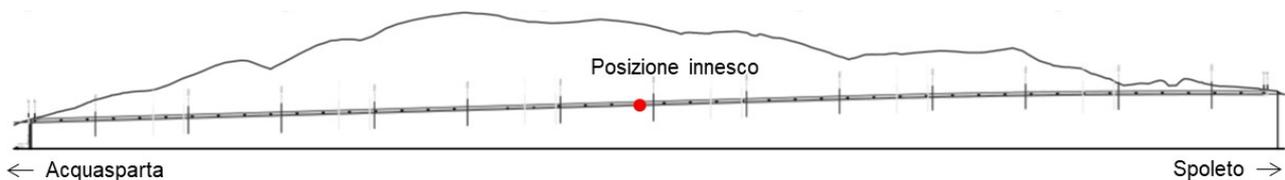


Figura 13: posizione innescò su profilo altimetrico, analisi CFD

4.4.2 Prestazioni

Le prestazioni monitorate sono quelle riportate al paragrafo 6.1.3.

4.4.3 Risultati

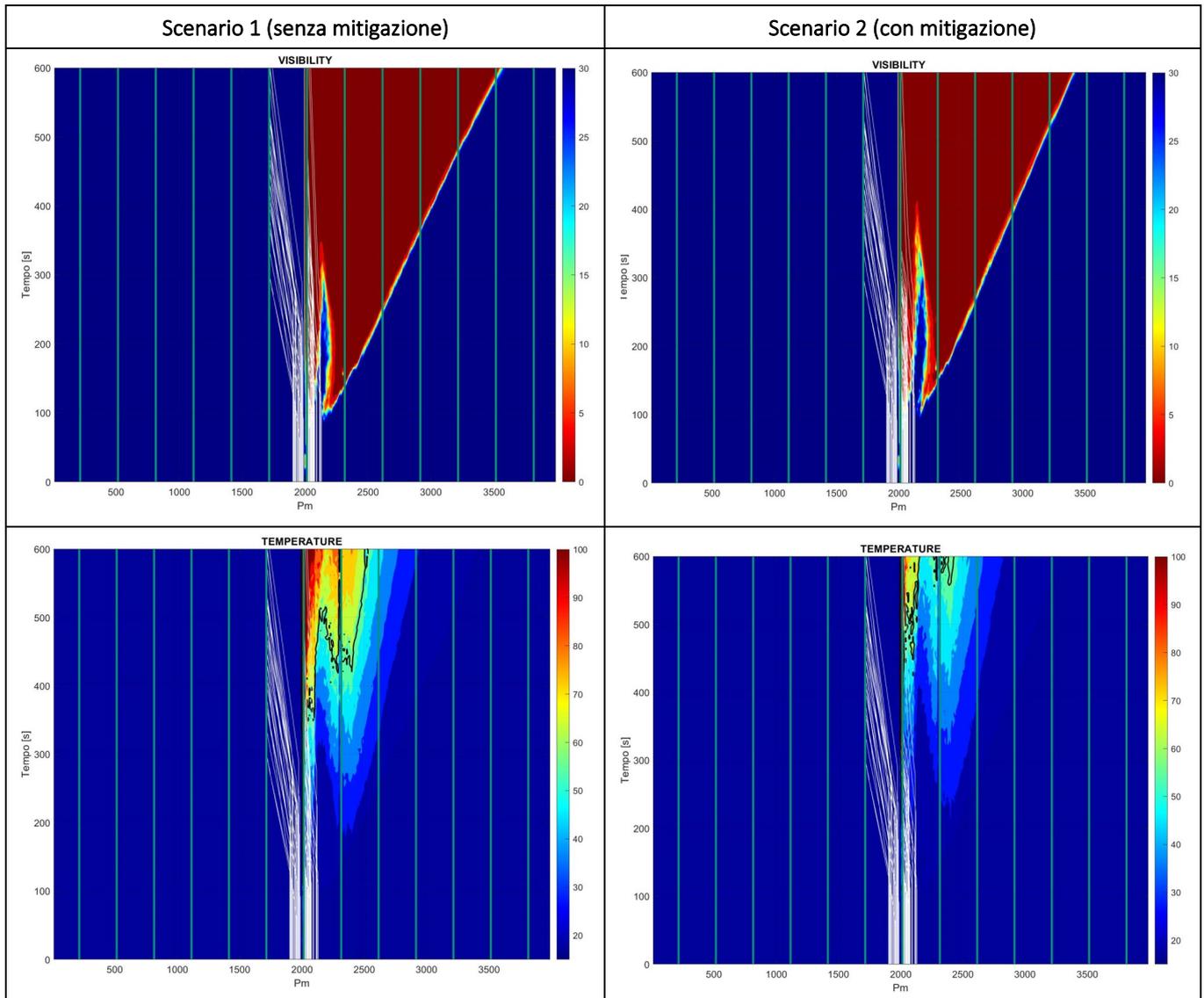
Lo scenario 2, quello corrispondente alla configurazione con impianto di mitigazione, fa registrare un numero di fatalities inferiore rispetto allo scenario 1 che corrisponde alla configurazione senza sistema di mitigazione. L'azione del sistema di mitigazione riduce la temperatura cui sono sottoposti gli utenti durante

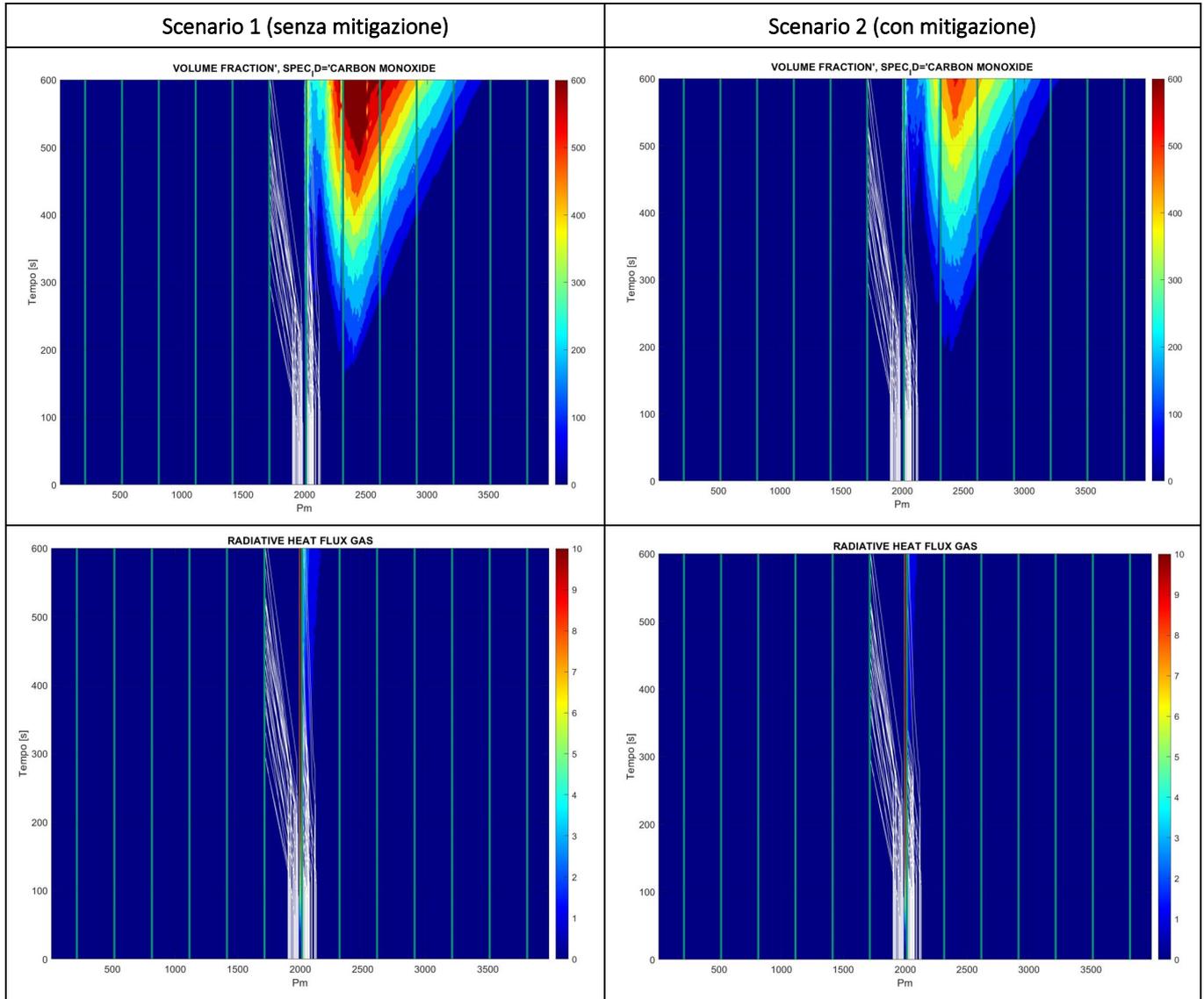
l'esodo. La FED termica risulta più bassa. In tabella sono riportati i valori massimi di FED termica e chimica registrati.

Tabella 18: risultati analisi CFD

Scenario	FED termica	FED chimica	#fatalities
1 (senza mitigazione)	1	0.06	6
2 (con mitigazione)	0.09	0.02	0

Tabella 19: risultati analisi CFD, fase 3





5 CONCLUSIONI

L'analisi di rischio, svolta in accordo alla Direttiva Europea 2004/54/EC, ha mostrato che il livello di rischio per la galleria Colle delle Rose ricade all'interno della zona ALARP.

I risultati ottenuti sono stati riverificati anche attraverso l'esecuzione di alcuni scenari attraverso simulazioni CFD in modo da valutare i fenomeni di stratificazione che non sono colti attraverso il SW monodimensionale su cui si basano le analisi quantitative all'interno dell'analisi di rischio.

Sia l'analisi di rischio che gli approfondimenti condotti mediante simulazioni CFD 3D sono stati svolti in modo comparativo in modo da valutare il contributo alla sicurezza apportato dalla presenza del sistema di mitigazione. L'effetto è una riduzione del VAD e del numero di fatalities. In particolare, la curva FN relativa alla configurazione con sistema di mitigazione presenta valori più bassi per valori più alti di fatalities.

Coerentemente con quanto disponibile nella letteratura di settore il contributo del sistema di mitigazione ai fini della sicurezza degli utenti ha poca influenza nelle prime fasi dopo l'insacco dove i fattori più significativi sono la posizione degli utenti rispetto all'insacco e la possibilità di raggiungere i bypass di sicurezza (autoevacuazione). Tuttavia nel caso di utenti che si trovano al tempo $t=0$ molto vicini all'insacco e che pertanto, essendo esposti agli effetti termici e chimici dell'incendio, procedono verso i bypass con velocità di camminamento ridotta, il ruolo del sistema di mitigazione è di limitarne un'ulteriore esposizione.

Man mano che ci si allontana dall'insacco, il ruolo del sistema di mitigazione diventa significativo ai fini di controllare gli effetti termici dell'incendio facilitando le operazioni di soccorso e proteggendo la struttura dell'opera.

6 CONFRONTO COL DECRETO LEGISLATIVO 5 OTTOBRE 2006, n 264

La tabella seguente riepiloga il grado di adempimento rispetto al decreto 264/2006, in rapporto ai simboli utilizzati nelle schede di conformità riportate nel presente documento:

Rispondenza	Simbolo	Significato
Conforme	✓	Conforme al requisito del decreto
Non conforme	✘	Requisito non presente secondo il decreto
Non applicabile	n.a.	Requisito non applicabile per la galleria in esame
Integrativa	+	Requisito presente ma non richiesto dal decreto per il tipo di galleria in esame.

Di seguito sono riportati i requisiti minimi di sicurezza secondo il D.Lgs. 264/06 per le gallerie nuove (paragrafo 2.1) e le gallerie esistenti (paragrafo 2.2).

I requisiti sono suddivisi in:

- obbligatori (Tabella 1, Tabella 4);
- obbligatori con eccezioni (Tabella 2, Tabella 5);
- raccomandati (Tabella 3, Tabella 6).

Per ciascuno è riportata la rispondenza della galleria in base alle caratteristiche impiantistiche e strutturali.

7 MISURE INFRASTRUTTURALI

7.1 Requisiti minimi D.Lgs. 264/06 – Gallerie nuove

Tabella 20: requisiti obbligatori – gallerie nuove

Requisito obbligatorio	Rif.	Tip.	Note	Rispondenza
2 o più fornici	2.1.2	S	Obbligatoria se le previsioni su 15 anni indicano traffico maggiore di 10.000 veicoli/g corsia	n.a. TGM al 2042 = 5030veic/g corsia
Misure supplementari per pendenza longitudinale >3%	2.2.3	S	Obbligatorie tramite Analisi di Rischio	n.a.
Banchine pedonabili di emergenza	2.3.1	S		✓
Uscite di emergenza	2.3.3-8	S	Le uscite di emergenza devono consentire agli utenti di abbandonare a piedi la galleria e ai servizi di pronto intervento l'accesso a piedi. I rifugi devo essere collegati con l'esterno. Le uscite sono obbligatorie con interdistanza massima di 500m se il volume di traffico è superiore a 2.000 veicoli/corsia.	✓
Vie di fuga dietro le uscite di emergenza	2.3.9	S	Mezzi appropriati devono impedire la propagazione di fumo e calore nelle vie di fuga.	✓
Illuminazione ordinaria	2.8.1	I	Obbligatorio secondo prescrizioni D.M. n.3476 del 14/09/05	✓
Illuminazione di sicurezza	2.8.2	I		✓
Illuminazione di evacuazione	2.8.3	I		✓
Ventilazione meccanica	2.9.2-4	I	Obbligatorio per le gallerie con lunghezza superiore ai 1.000m con volume di traffico superiore a 2.000 veicoli/corsia, (Ventilazione longitudinale consentita solo con analisi di rischio e misure specifiche, altrimenti Semi-Trasversale)	✓ Ventilazione longitudinale + sistema di mitigazione Svolta analisi di rischio
Ventilazione meccanica: disposizioni speciali per la ventilazione (semi)trasversale	2.9.5	I	Obbligatorio per gallerie di lunghezza superiore ai 3.000m, bidirezionali, con volume di traffico superiore a 2.000v per corsia	-
Stazioni di emergenza	2.10.2-3	I	Obbligatoria vicino ai portali e a interdistanza max 150m (minimo: SOS+2 estintori)	✓
Erogazione idrica	2.11	I	Idranti a intervalli ≤250m altrimenti verificare che l'approvvigionamento idrico alternativo sia sufficiente.	✓
Segnaletica stradale	2.12	I	La segnaletica risponde a quanto previsto dall'Allegato 4bis al D.Lgs. 264/06	✓
Centro di Controllo	2.13.1	I	Obbligatorio per gallerie di lunghezza superiore ai 3.000m con volume di traffico superiore a 2.000veicoli/corsia	✓
Impianti di sorveglianza: telecamere + rilevamento automatico incidente e/o incendio	2.14.1	I	Obbligatori nelle gallerie servite da centro di controllo	✓

Requisito obbligatorio	Rif.	Tip.	Note	Rispondenza
Impianto per chiudere la galleria: semafori agli imbocchi	2.15.1	I	Obbligatorio per gallerie di lunghezza superiore a 1.000m	✓
Sistemi di comunicazione: ritrasmissioni radio ad uso dei servizi di pronto intervento	2.16.1	I	Obbligatorio per gallerie di lunghezza superiore ai 1.000m con volume di traffico superiore a 2.000v per corsia	✓
Sistemi di comunicazione: messaggi di emergenza via radio destinati agli utenti della galleria	2.16.2	I	Obbligatorio per gallerie servite da un centro di controllo	✓
Alimentazione elettrica di emergenza	2.17.1	I		✓
Caratteristiche di resistenza e reazione al fuoco dei componenti degli impianti	2.18	I		✓

Tabella 21: requisiti obbligatori con eccezioni – gallerie nuove

Requisito obbligatorio con eccezioni	Rif.	Tip.	Note	Rispondenza
Numero di corsie	2.1.3	S	Numero di corsie deve restare lo stesso fuori e dentro la galleria. Il cambiamento del numero di corsie deve intervenire ad una distanza dal portale della galleria almeno pari a quella percorsa in 10 secondi da un veicolo che procede alla velocità massima consentita. Misure integrative se le caratteristiche geomorfologiche non consentono questa distanza.	✓
Pendenza longitudinale ≤5%	2.2.2	S	Obbligatori solo se le caratteristiche geomorfologiche non consentono diverse soluzioni	✓
Accessi per i servizi di pronto Intervento (gallerie a doppio fornice)	2.4.1	S	Obbligatorio per gallerie di lunghezza superiore ai 1.500m se i forni sono sullo stesso livello. interdistanza max 1500m	n.a.
Punti di attraversamento spartitraffico agli imbocchi (gallerie a doppio fornice)	2.4.2	S	Obbligatori solo se le caratteristiche geomorfologiche lo consentono	n.a.
Piazzola di sosta	2.5.1,3	S	Se non è prevista la corsia di emergenza: obbligatorio ogni 1.000m per le gallerie bidirezionali con lunghezza superiore a 1.500m e volume di traffico superiore a 2000veicoli/corsia. Non obbligatorio se la larghezza residua della piattaforma, escluse le corsie di marcia, è pari almeno ad una corsia	✓ Piazzole di sosta presenti ogni 600m
Sistema di drenaggio	2.6.1	S	Obbligatorio se è permesso il trasporto di merci pericolose	✓
Resistenza al fuoco delle strutture	2.7	S	Obbligatorio se un cedimento locale può avere conseguenze catastrofiche (es. tunnel sommersi)	✓
Impianti di sorveglianza: rilevamento automatico dell'incendio	2.14.2	I	In assenza di centro di controllo, obbligatorio se la ventilazione per controllo fumi è diversa da quello automatico per controllo automatico	✓

Requisito obbligatorio con eccezioni	Rif.	Tip.	Note	Rispondenza
Sistemi di comunicazione: altoparlanti nei rifugi e strutture simili	2.16.3	I	Obbligatorio se gli utenti devono aspettare prima di raggiungere l'esterno.	n.a.

Tabella 22: requisiti raccomandati – gallerie nuove

Requisito raccomandato	Rif.	Tip.	Note	Rispondenza
Corsia di emergenza	2.1.4	S	Può essere sostituita da una banchina pavimentata e avere funzione di franco psicotecnico o di sosta di emergenza. Se ha funzione di sosta di emergenza, necessaria analisi di rischio.	✓ Svolta analisi di rischio
Impianti per chiudere le gallerie: semafori all'interno	2.15.2	I	Raccomandato per gallerie di lunghezza > 3000m e volume di traffico superiore a 2000veic/corsia. Interdistanza massima dei semafori 1000m. Misure supplementari: altoparlanti, pannelli a messaggio variabile, barriere.	+ Previsti semafori all'imbocco
Trasporto merci pericolose	3.7		Misure da applicare: <ul style="list-style-type: none"> - Analisi di rischio in caso di modifica delle norme o dei requisiti riportati nel decreto - Segnaletica all'uscita precedente la galleria, agli imbocchi e a una distanza tale da consentire la scelta di itinerari alternativi - Eventuali misure operative specifiche per ridurre i rischi 	✓ Analisi di rischio
Sorpassi	3.8		Consentiti in gallerie con più di una corsia per direzione, in base a un'opportuna analisi di rischio.	n.a.
Distanza tra i veicoli e velocità	3.9	-		

8 APPENDICE 1 - SVILUPPO DELL'ANALISI DI RISCHIO

8.1 Introduzione

La Direttiva Europea 2004/54/EC ha l'obiettivo di *"garantire un livello minimo di sicurezza agli utenti della strada nelle gallerie della rete stradale transeuropea mediante la prevenzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria"*. A questo scopo, la direttiva fissa una serie di requisiti minimi di sicurezza.

La Direttiva introduce anche il concetto di Analisi di Rischio (AdR), così definita: *"l'analisi di una galleria determinata che tiene conto di tutti gli elementi inerenti alle sue caratteristiche progettuali e delle condizioni del traffico che incidono sulla sicurezza, e segnatamente le caratteristiche ed il tipo di traffico, la lunghezza e la geometria della galleria, nonché il numero previsto di veicoli pesanti in transito giornaliero."*

Il Dlgs 264/06 (attuazione in Italia della Direttiva Europea 2004/54/EC) specifica che l'analisi dei rischi relativi alla galleria deve riferirsi *"esclusivamente agli eventi considerati critici nello specifico ambiente confinato delle gallerie, vale a dire incendi, collisioni con incendio, sversamenti di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e nocive"*. L'analisi non tiene quindi conto delle vittime di incidenti stradali *"non indotti dallo specifico ambiente galleria, che vanno contabilizzati nell'ambito dell'incidentalità stradale"*, cioè a livello di infrastruttura e non della singola galleria.

A seconda dell'obiettivo per cui è condotta, l'analisi può essere riferita al solo transito delle merci pericolose, oppure anche al traffico ordinario.

8.2 Definizione di rischio

Il Dlgs 264/06 offre la seguente definizione di rischio:

"RISCHIO: Legame analitico tra probabilità di accadimento di un evento ed entità delle conseguenze da esso derivanti, inclusiva delle incertezze connesse alla stima delle grandezze di definizione."

In sintesi, il rischio è dato dal prodotto tra danno provocato da un certo evento, e probabilità di accadimento dell'evento stesso.

8.3 La valutazione del rischio

Sulla base del Dlgs 264/06, la valutazione del rischio deve tenere conto delle caratteristiche dello specifico sistema galleria e della sua interazione con l'ambiente circostante. I sottosistemi di sicurezza della galleria (sistema di ventilazione, logiche e strategia di esodo, impianti di allarme ecc.) determinano la risposta del sistema alle condizioni di emergenza e pertanto definiscono le condizioni a cui gli utenti sono esposti.

Sempre secondo il Dlgs 264/06, gli scenari incidentali e la loro evoluzione in galleria sono rappresentati mediante modelli che includono come elementi costitutivi l'albero delle cause, l'evento critico iniziatore e l'albero degli eventi.

La Figura 3, tratta dalle Linee Guida ANAS per la sicurezza in galleria, espone questo concetto. L'evento critico (o iniziatore), che ha la potenzialità di dare luogo a un danno, è rappresentato nel mezzo dello schema.

A sinistra vi è la cosiddetta "traiettoria di successo del sistema" con l'albero delle cause. Esso indica le possibili sequenze di eventi che conducono all'accadimento dell'evento critico. Ad esempio, la rottura del sistema di raffreddamento di un mezzo pesante che conduce al suo surriscaldamento.

A destra vi è la cosiddetta "traiettoria critica", con l'albero degli eventi. Esso indica le possibili sequenze di eventi che si dipartono dall'evento critico iniziatore. Ad esempio, l'attivazione di un allarme al conducente del veicolo pesante surriscaldato che gli consente di agire tempestivamente con l'estintore di bordo.

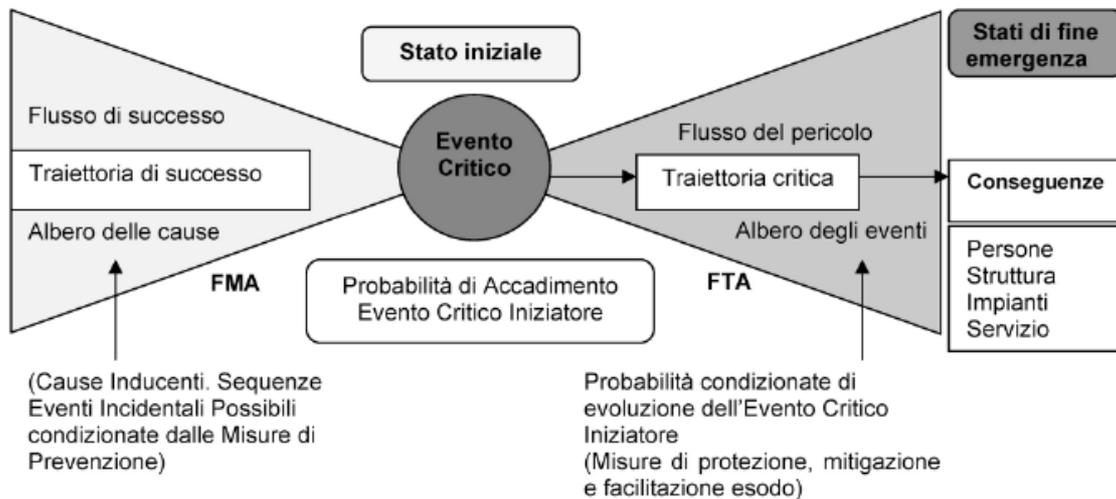


Figura 14: modello di rischio (Linee Guida ANAS 2009)

L'albero degli eventi (Figura 4) si ramifica a partire dall'evento iniziatore, riportando tutte le possibili sequenze di eventi che possono seguire. L'albero è caratterizzato da probabilità di evoluzione lungo i singoli rami, come espressione dell'affidabilità e dell'efficienza delle misure di sicurezza installate o previste. Ciascun ramo dell'albero degli eventi termina in uno degli scenari possibili per quella specifica galleria a seguito dell'evento iniziatore.

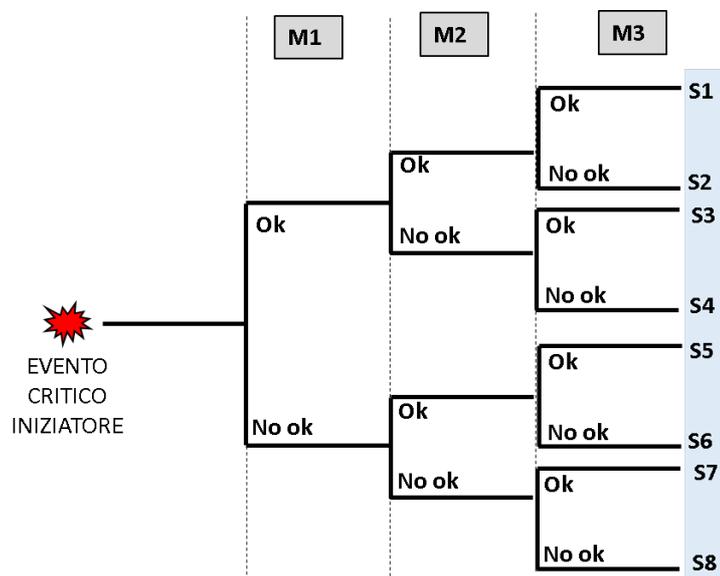


Figura 15: esempio di albero degli eventi

8.3.1 Stima delle frequenze di accadimento

Sulla base delle Linee Guida ANAS, le probabilità di accadimento degli eventi critici rilevanti possono essere determinate utilizzando approcci diversi:

- analisi dei dati storici;
- analisi dei dati di letteratura;
- utilizzo di modelli previsionali di incidentalità;
- giudizio degli esperti.

In ogni caso, occorre tenere presente che, trattandosi di eventi relativamente rari, il valore statistico dei dati disponibili è relativo e non è possibile ottenere una stima completamente affidabile delle probabilità di accadimento.

8.3.2 Stima delle conseguenze

Il Dlgs 264/06 afferma che la salvabilità degli utenti in ciascuno scenario è determinata attraverso la quantificazione e la zonizzazione del flusso del pericolo all'interno della struttura, cioè la descrizione delle condizioni nelle quali si realizza il processo di esodo degli utenti. La caratterizzazione di tali condizioni è ottenuta modellando l'evoluzione dei fenomeni chimici e fisici che si instaurano in conseguenza dell'accadimento di eventi critici iniziatori, e tenendo conto delle misure di mitigazione presenti (ad es. impianto di ventilazione).

Sempre secondo il Dlgs 264/06, tale modellazione è attuata con livelli di dettaglio diversi a seconda delle necessità ed utilizzando le migliori tecniche note e disponibili. I risultati della modellazione costituiscono i dati di ingresso per la simulazione del processo di esodo degli utenti dalla struttura. Il numero degli utenti coinvolti nel processo di esodo è determinato attraverso idonei modelli di formazione delle code.

8.3.3 Quantificazione del rischio

Assegnando a ciascun possibile scenario una frequenza di accadimento e un danno, espresso in termini di numero di fatalità, è possibile tracciare una curva di rischio cumulata, così come indicato dalle Linee Guida ANAS. Tale curva, denominata FN, è riportata su un diagramma bi-logaritmico che individua 3 aree (Figura 5):

- zona di accettabilità, dove il rischio è considerato basso e quindi accettabile;
- zona ALARP (As Low As Reasonably Practicable), dove il rischio è ritenuto accettabile nella misura in cui l'implementazione di misure di sicurezza aggiuntive darebbe luogo a un rapporto costi-benefici troppo sbilanciato sui costi;
- zona di non accettabilità, dove il rischio è considerato troppo elevato e dove pertanto è richiesta l'implementazione di misure di sicurezza ulteriori e una nuova analisi di rischio.

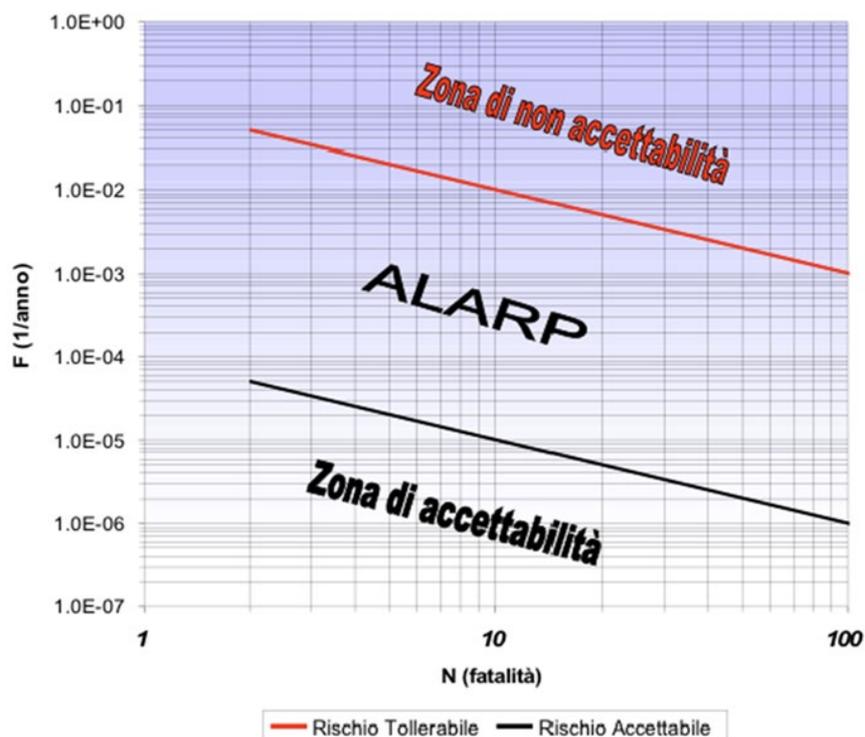


Figura 16: Diagramma ALARP (Linee Guida ANAS 2009)

La Direttiva Europea richiede che sia svolta un'analisi di rischio specifica per il trasporto di merci pericolose laddove ne sia permesso il transito. La curva FN ottenuta da questa analisi va sommata a quella eventualmente svolta per il traffico ordinario.

Nei capitoli seguenti sono riportate le analisi di rischio relative:

- al traffico ordinario

- al transito di merci pericolose

Al capitolo 9 è riportato il calcolo del rischio complessivo, dato dalla somma dei risultati di tali analisi.

9 APPENDICE 2 - DESCRIZIONE DEI SOFTWARE UTILIZZATI

Il software ARTU calcola il rischio sociale legato all'evento incendio in galleria tenendo conto delle indicazioni della Direttiva Europea 2004/54/EC, del Dlgs 264/06e delle Linee Guida ANAS riportate al capitolo precedente (METODOLOGIA DI ANALISI DI RISCHIO).

ARTU utilizza un campionamento casuale di una serie di parametri da distribuzioni statistiche predefinite, definendo un numero (nell'ordine delle centinaia) di scenari d'incendio e di esodo. Il software è basato su un approccio Montecarlo, cioè predilige gli scenari più probabili a scapito di quelli meno probabili.

Sono analizzate 3 famiglie di scenari, ciascuna relativa all'incendio di un determinato tipo di veicolo (leggero, commerciale-bus-pesante con carico generico, pesante con carico infiammabile). Per ciascun tipo di veicolo, si ipotizza che l'incendio si sviluppi in diverse posizioni lungo il tunnel. Ad ogni posizione di incendio è associata una coda di veicoli e quindi un diverso numero di utenti e posizione degli stessi nella galleria rispetto al focolaio. Il modello di formazione della coda tiene conto della composizione di traffico e, in maniera statistica, delle sue condizioni: fluido, di punta, congestionato.

Ciascuno scenario di incendio/esodo è analizzato in maniera deterministica al fine di quantificare l'interazione tra gli utenti e i prodotti della combustione, tenendo conto delle caratteristiche geometriche dello specifico tunnel e degli impianti di sicurezza (ventilazione, vie di fuga) in esso presenti.

L'andamento dei prodotti della combustione nel tunnel è stimato mediante un'analisi fluidodinamica monodimensionale (1D). Questo tipo di analisi, tipicamente impiegata nella progettazione dei sistemi di ventilazione in galleria, permette di stimare l'andamento spazio-temporale dei fumi tenendo conto della magnitudo dell'incendio, della sua posizione nel tunnel e dell'azione del sistema di ventilazione (se presente).

La descrizione del fenomeno di esodo si avvale di un modello appositamente sviluppato. Il modello tiene conto in maniera statistica di alcuni parametri aleatori come il tempo di pre-movimento (cioè il tempo che intercorre tra l'innesco e l'inizio dell'esodo) e la velocità di esodo indisturbata (parametro individuale che dipende da età e condizioni di salute). La velocità di esodo è poi corretta automaticamente dal software, istante per istante, al fine di tenere conto del rallentamento dovuto alla presenza degli altri utenti e alla riduzione della visibilità dovuta ai fumi prodotti dall'incendio. Questo permette di descrivere l'esodo in maniera realistica, tenendo conto delle effettive condizioni in cui gli utenti si trovano.

La stima del danno associato a ciascuno scenario di incendio/esodo è fatta valutando, per ciascun utente, il valore di FED (Fractional Effective Dose) ovvero la dose inalata, nel tempo, di sostanze tossiche e calore. Le sostanze chimiche che ARTU considera sono CO, CO₂ e O₂ mentre l'esposizione al calore è stimata a partire dalla temperatura dei gas. Nel caso in cui l'indicatore FED superi il valore soglia (0.3, sulla base dell'NFPA130-2010), si considera l'utente incapacitato (fatalità). Per quanto riguarda il calcolo della FED e dell'esodo, ARTU include formule basate su riferimenti internazionali:

- pubblicazioni dell'SFPE Society of Fire Protection Engineers,
- NFPA National Fire Protection Association;
- Dipartimento di Fire Safety Engineering presso l'Università di Lund, Svezia.

Tabella 23: correlazioni incluse nel software ARTU

Parametro	Correlazione	Fonte
Velocità di fuga rispetto alla densità di utenti	$v_f(D) = \begin{cases} 1, & D < .55 \text{ pers}/m^2 \\ \max [v_{fmin} \frac{1}{.85} (1 - .266D)], & D \geq .55 \text{ pers}/m^2 \end{cases}$ <p>$v_f(D)$ è il fattore di riduzione della velocità, in funzione della densità di utenti. $v_{fmin}=0.15$</p>	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
Flusso attraverso un'uscita	$F_s = (1 - .266 * D) * k * D$ <p>$F(D)$ è il flusso attraverso l'uscita, in funzione della densità di utenti k tiene conto del tipo di terreno (1.4 per terreno piano)</p>	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
Velocità di fuga in funzione della visibilità	$w = \min(1; \max(0,2; 1 - 0,34 * (3 - v)))$ <p>w è il fattore di correzione della velocità, v è la visibilità in metri</p>	Walking Speed in Smoke: Representation in Life Safety Verifications- Fridolf, Ronchi et all (Lund University)- Conference Paper · April 2018
FED chimica	$FED_{tot} = FED_{CO} \times HV_{CO_2} + FED_{O_2}$ $FED_{CO} = \int_0^t 2.764 \times 10^{-5} (C_{CO}(t))^{1.036} dt$ $HV_{CO_2} = \frac{\exp(0.1903 C_{CO_2}(t) + 2.0004)}{7.1}$ $FED_{O_2} = \int_0^t \frac{dt}{60 \exp[8.13 - 0.54 (20.9 - C_{O_2}(t))]}$ <p>t è il tempo in minuti C_{CO} la concentrazione di CO in ppm C_{O_2} la concentrazione di O₂ in %vol C_{CO_2} la concentrazione di CO₂ in %</p>	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
FED termica	$FED = \frac{1}{t_{iconv}} \Delta t \quad t_{iconv} = (4.1 \times 10^8) T^{-3.61}$ <p>t è il tempo in minuti T la temperatura in °C</p>	NFPA130-2010

In questo modo, per ciascuno scenario di incendio/esodo analizzato, si determina il numero di fatalità. Aggregando i risultati di tutti gli scenari di incendio/esodo analizzati, ARTU determina:

- la curva FN, che esprime la probabilità cumulata di accadimento di eventi cui corrisponde un dato numero di fatalità;
- Il VAD, cioè l'integrale della curva FN, che esprime il numero di fatalità attese per anno.

Il software è stato validato nell'ambito di un progetto di ricerca con il Dipartimento di Fire Safety Engineering dell'Università di Lund. Sul sito dell'università è consultabile il report di validazione che include anche ulteriori informazioni sulla metodologia di calcolo.

9.1 FDS, PATHFINDER

Fire Dynamics Simulator (FDS) è il software utilizzato per l'approccio ingegneristico qui descritto. E' stato sviluppato dalla Fire Research Division presso il Building and Fire Research Laboratory (BFRL) del National Institute of Standards and Technology (NIST) in collaborazione con il Technical Research Centre of Finland (VTT).

Il codice risolve numericamente le equazioni di Navier-Stokes nella forma incomprimibile, adatta per bassa velocità, nonché le equazioni di conservazione dell'energia e delle specie chimiche. Le equazioni differenziali che descrivono questi fenomeni sono risolte con il metodo delle differenze finite su una griglia rettilinea. La radiazione termica è risolta utilizzando la tecnica dei volumi finiti applicata sulla stessa griglia. Il post-processo dei risultati può essere effettuato con il codice Smokeview, realizzato dal NIST.

Il pre e post processing dei dati è gestito mediante il software Pyrosim, sviluppato da Thunderhead Engineering (USA), applicazione che permette di importare le geometrie in un ambiente di modellazione dove il dominio di calcolo viene scomposto mediante opportune griglie di calcolo e dove è possibile modellare sistemi di estinzione attiva e sistemi di ventilazione (attiva e passiva). Il modello generato costituisce l'input del codice FDS che ne risolve il problema fisico-matematico.

Per le analisi di esodo è stato utilizzato Pathfinder, un simulatore per scenari di evacuazione in condizione di emergenza. Esso include un'interfaccia utente integrata con uno strumento di visualizzazione tridimensionale dei risultati. Il software permette di valutare i modelli di evacuazione in maniera rapida e producendo delle visualizzazioni grafiche più realistiche rispetto ad altri codici di calcolo.

Pathfinder™ usa un'intelligenza artificiale agent-based. Ogni persona coinvolta nell'evacuazione è simulata come avente dei tratti comportamentali individuali, dei propri obiettivi e una diversa percezione delle condizioni di evacuazione. Esso permette di raggruppare gli occupanti e di organizzarli in flussi naturali di evacuazione. Il risultato di tutto questo è che il moto delle persone è molto fluido e realistico.

Pathfinder simula gli occupanti in uno spazio 3D. Ad ogni istante di tempo, ogni individuo simulato esamina l'ambiente circostante e prende decisioni in funzione delle proprie condizioni e del proprio obiettivo.

Importando degli specifici output di FDS, Pathfinder è in grado di tenere conto della riduzione della velocità degli occupanti in caso di interazione coi fumi. Tale effetto sfrutta le relazioni tra velocità e visibilità osservate in (Fridolf et al.)

9.2 IDA TUNNEL

IDA Tunnel (Equa Simulation AB). IDA Tunnel permette di rappresentare singoli tunnel o reti di cunicoli attraverso uno schema unifilare (rami e nodi). Le porzioni di tunnel sono collegate tra loro tramite una serie

di rami e con l'ambiente esterno tramite nodi. A ogni ramo sono attribuite delle caratteristiche geometriche e fluidodinamiche. Sui nodi di collegamento tra il tunnel e l'ambiente esterno sono applicate le condizioni al contorno. IDA Tunnel permette di valutare l'interazione dinamica tra il tunnel, il sistema di ventilazione, i veicoli con le loro emissioni e i prodotti di combustione di un eventuale incendio.