

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Laurea Specialistica in Ingegneria Civile – Infrastrutture di Trasporto



ANALISI DEL RISCHIO NELLE GALLERIE STRADALI:

Metodo per la definizione del danno connesso all'accadimento di un incendio

Relatore:

Prof. Ing. Roberto Maja

Correlatori:

Dott. Ing. Fabio Borghetti

Dott. Ing. Rosanna Iuliano

Aldo LANFRANCONI

Matr. 787003

Anno Accademico 2013 – 2014

Sommario

Indice delle figure	5
Indice delle tabelle	8
Indice dei grafici	9
Abstract	10
1. Introduzione	11
1.1 Sicurezza nelle gallerie stradali	11
1.2 Obiettivo del lavoro di tesi	14
1.3 Schema del lavoro di tesi	16
2. Stato dell'arte	17
2.1 Incidenti gravi avvenuti in galleria	17
2.1.1 Traforo del Monte Bianco, 1999	17
2.1.2 Tauerntunnel, 1999	18
2.1.3 Galleria del San Gottardo, 2001	19
2.1.4 Tunnel del Frejus, 2005	20
2.2 Normativa di riferimento	21
2.2.1 Circolare Ministeriale n.7938 del 06 dicembre 1999	22
2.2.2 Decreto Ministeriale 05 giugno 2001	22
2.2.3 Decreto Ministeriale 05 novembre 2001	22
2.2.4 Norma UNI 11095 del 01 dicembre 2003	23
2.2.5 Decreto Ministeriale n. 3476 del 14 settembre 2005	23
2.2.6 Direttiva 2004/54/CE del 29 aprile 2004	23
2.2.7 Decreto Legislativo n. 264 del 5 ottobre 2006	24
2.2.8 Circolare ANAS n. 17 del 2006, revisione 2009	25
2.3 Il concetto di rischio	26
2.3.1 Rischio trasporti	28
2.3.1.1 Criteri di accettabilità del rischio	29
2.3.2 Rischio associato al trasporto in galleria	30
2.3.2.1 Merci pericolose in galleria	33
2.4 Scenari incidentali in galleria: l'incendio	34
2.4.1 Principali scenari incidentali che possono verificarsi in una galleria stradale	35

2.4.2 Cause d'incendio in galleria	37
2.4.3 Evoluzione dell'incendio	38
2.4.3.1 Il tasso di rilascio termico: la grandezza HRR.....	40
2.4.4 Prodotti della combustione	41
2.4.4.1 Gas di combustione	41
2.4.4.2 Calore e temperatura.....	42
2.4.4.3 Fiamme	42
2.4.4.4 Fumo.....	42
2.4.5 Effetti sul corpo umano	43
2.4.5.1 Criteri di sopravvivenza.....	47
2.4.5.2 Effetto della stratificazione dei fumi	48
2.4.6 Comportamento umano nell'incendio	50
2.4.6.1 Interazione uomo - ambiente	51
2.4.6.2 Caratteristiche degli occupanti.....	52
2.4.6.3 Aspetto psicologico dell'evacuazione.....	54
2.4.7 Test e simulazioni reali nella ricerca scientifica	55
2.4.7.1 Analisi critica dei risultati ottenuti	56
3. Formulazione di un metodo di analisi e stima delle conseguenze	63
3.1 Analisi di scenario: individuazione delle informazioni preliminari	64
3.1.1 Sistema galleria.....	65
3.1.1.1 Caratteristiche strutturali	67
3.1.1.2 Impianti e sistemi di sicurezza	73
3.1.2 Definizione dello scenario: il questionario.....	85
3.1.2.1 Informazioni generiche.....	86
3.1.2.2 Definizione caratteristiche galleria.....	87
3.1.2.3 Definizione evento	94
3.1.2.4 Caratteristiche veicoli.....	96
3.1.3 Impostazione del foglio di calcolo.....	98
3.2 Evoluzione del flusso del pericolo e salvabilità degli utenti: il modello proposto. 100	
3.2.1 zonizzazione del flusso del pericolo	100
3.2.1.1 Tempo di massima permanenza	100
3.2.1.2 Velocità di esodo	104
3.2.2 Analisi delle conseguenze sugli utenti esposti all'evento	110

3.2.2.1 Modellazione degli scenari di esodo	110
3.2.3 Definizione degli utenti esposti: modelli di formazione code.....	111
3.2.3.1 Modello di formazione code proposto nelle Linee Guida ANAS	111
3.2.3.2 Modello di formazione code proposto.....	113
3.2.4 Esodo utenti: determinazione delle vittime	123
3.2.4.1 Principi di evacuazione.....	125
3.2.5 Stima del numero di vittime: il modello di esodo.....	134
3.2.6 Report dei risultati.....	138
3.3 Potenzialità dello strumento di calcolo.....	141
4. Applicazione dello strumento di calcolo a tre casi di studio.....	143
4.1 Traforo del Monte Bianco.....	144
4.1.1 Regolamento di circolazione	145
4.1.2 Caratteristiche strutturali e impiantistiche.....	146
4.1.3 Implementazione del foglio di calcolo	149
4.1.4 Ipotesi di simulazione.....	156
4.1.5 Analisi risultati.....	161
4.2 Galleria Morgex Nord	162
4.2.1 Caratteristiche strutturali ed impiantistiche.....	163
4.2.2 Implementazione del foglio di calcolo	164
4.2.3 Ipotesi di simulazione.....	171
4.2.4 Analisi risultati.....	172
4.3 Galleria Colle Capretto.....	173
4.3.1 Caratteristiche strutturali ed impiantistiche.....	173
4.3.2 Implementazione del foglio di calcolo	174
4.3.3 Ipotesi di simulazione.....	181
4.3.4 Analisi risultati.....	181
5. Conclusioni e possibili sviluppi.....	183
Bibliografia	186
Allegato I.....	190
Ringraziamenti	198

Indice delle figure

Figura 1: Gallerie stradali facenti parte della rete trans-europea TEN-T.....	13
Figura 2: Tunnel del Monte Bianco in seguito alla tragedia del 1999.....	18
Figura 3: Scenario presente all'interno del Tauerntunnel dopo il tragico evento del 1999.....	19
Figura 4: Incendio all'interno della Galleria del San Gottardo, 24 ottobre 2001	20
Figura 5: Rogo all'interno del tunnel del Frejus, situazione al termine dell'intervento dei soccorsi	21
Figura 6: Esempi di rischi attivo e passivo; rappresentazione rispettivamente di ingorgo stradale e frana	29
Figura 7: Rappresentazione sul piano f-N del criterio di accettabilità del rischio ALARP.....	30
Figura 8: Analisi di dati incidentali in galleria (ANAS s.p.a., 2009).....	31
Figura 9: Suddivisione della galleria in funzione del pericolo (Maja, 2011)	33
Figura 10: Scala cromatica delle temperature nella combustione dei gas.....	42
Figura 11: Variazione del colore del fumo al variare del combustibile	43
Figura 12: Due diversi regimi di fumo riscontrabili: nel primo caso i fumi salgono verso l'alto mentre nel secondo sono completamente miscelati all'aria su tutta l'altezza del tunnel	49
Figura 13: Processo di esodo e processi di decisione e di movimento	52
Figura 14: Sviluppo dell'incendio di un veicolo pesante (prove Eureka 499).....	55
Figura 15: Rappresentazione schematica di uno dei test svolti all'interno del Runehamar Tunnel: sezione trasversale test T2	56
Figura 16: Alcuni risultati ottenuti in una delle prove effettuate nel Memorial Tunnel: propagazione del fumo dopo 0,1,2,3,4,5 minuti dall'accensione (Bettelini, 2003)	57
Figura 17: Propagazione e stratificazione dei fumi risultanti da prove Ofenegg: a sinistra velocità molto basse, mentre nella prova riportata a destra le velocità risultano più elevate(Bettelini, 2003).....	58
Figura 18: Rappresentazione schematica del funzionamento del modello di elaborazione definito	64
Figura 19: Rappresentazione schematica dell'esodo verso le uscite di sicurezza in caso di evento incidentale (PIARC, 2011).....	69
Figura 20: Esempio di via di fuga con relativa segnaletica	69
Figura 21: Centro di controllo e telecamera di video-sorveglianza in galleria stradale.....	75
Figura 22: Rilevatori di fumo del tipo FireGuard, galleria stradale del San Gottardo.....	76
Figura 23: Esempi di telefoni di emergenza installabili in galleria	77
Figura 24: Schema previsto per stabilire la necessità di illuminazione nelle gallerie stradali (D.M. 5 novembre 2005).....	78
Figura 25: Sistema di illuminazione a lampade led: plafoniere di evacuazione e impianto di illuminazione ordinaria.....	79
Figura 26: Esempio di sistema di ventilazione longitudinale con ventilatori a induzione.....	81
Figura 27: Esempio di schema di ventilazione trasversale	81
Figura 28: Semaforo e pannello a messaggio variabile posizionati all'imbocco di una galleria stradale.....	84
Figura 29: Prima parte del questionario utilizzato per definire le caratteristiche della galleria analizzata	87
Figura 30 a-b: Questionario, uscite di sicurezza	88
Figura 31.a-b: Questionario, sistema di ventilazione	89

Figura 32: Questionario, segnaletica.....	90
Figura 33: Questionario, illuminazione.....	90
Figura 34: Questionario, sistemi di rilevazione e controllo.....	91
Figura 35: Questionario, comunicazione di emergenza.....	92
Figura 36: Questionario, sistema di erogazione idrica.....	92
Figura 37: Questionario, sistemi di mitigazione.....	93
Figura 38: Questionario, resistenza al fuoco strutture e impianti.....	93
Figura 39: Questionario, pavimentazione.....	93
Figura 40: Questionario, sistemi di drenaggio.....	94
Figura 41: Questionario, accesso mezzi di soccorso.....	94
Figura 42: Questionario, definizione delle caratteristiche dell'evento incidentale.....	96
Figura 43: Schematizzazione della disposizione dei veicoli incolonnati.....	97
Figura 44: Questionario, definizione delle caratteristiche dei veicoli: in questo caso si ipotizza che l'interdistanza aumenti all'aumentare della distanza dall'evento.....	97
Figura 45: Foglio di calcolo, riepilogo dei dati forniti nel questionario.....	99
Figura 46: Modellazione del tunnel prevista dal modello: le dimensioni delle diverse zone sono variabili in funzione delle caratteristiche dell'evento e delle dotazioni impiantistiche presenti.....	101
Figura 47: Foglio di calcolo, tempo di massima permanenza nelle diverse zone del tunnel, definizione della fascia di appartenenza in base alle dotazioni impiantistiche previste.....	103
Figura 48: Foglio di calcolo, tempi di massima permanenza previsti nelle diverse zone al variare delle caratteristiche dell'evento incidentale iniziatore e delle caratteristiche impiantistiche.....	104
Figura 49: Foglio di calcolo, velocità di esodo nelle diverse zone del tunnel, definizione della fascia di appartenenza in base alle dotazioni impiantistiche definite.....	106
Figura 50: Valori di velocità considerati dal modello per le varie zone spaziali e fasce temporali, al variare del tipo di evento considerato e delle dotazioni impiantistiche indicate.....	106
Figura 51: Suddivisione della galleria in zone per la definizione delle condizioni di esodo: zonizzazione del flusso del pericolo.....	108
Figura 52a-b1-b2-b3: relazione tra velocità di esodo e tempo di massima permanenza prevista dal modello, rappresentazione schematica delle diverse situazioni verificabili.....	109
Figura 53: Schematizzazione del processo di formazione di una coda all'interno di una galleria in presenza di un evento incidentale(ANAS s.p.a., 2009).....	112
Figura 54: Foglio di calcolo, definizione del tempo di chiusura del tunnel in funzione degli impianti presenti.	118
Figura 55: Definizione della distanza evento-entrata: esempio indicativo in caso di galleria monodirezionale.	119
Figura 56: Rappresentazione schematica della suddivisione del tunnel prevista dal modello.....	120
Figura 57: Modello di formazione code, definizione dei veicoli esposti in caso di presenza di un sistema di chiusura del tunnel.....	121
Figura 58: Modello di formazione code, definizione dei veicoli esposti in caso di assenza di un sistema di chiusura del tunnel.....	123
Figura 59: foglio di calcolo, definizione del tempo di premovimento.....	128
Figura 60: Rappresentazione schematica della coda determinata da un evento incidentale in galleria a doppio	

fornice.....	131
Figura 61: Schematizzazione della distanza di ogni veicolo incolonnato dalla più vicina via di fuga	136
Figura 62: Modellazione dello strumento di calcolo in caso di galleria a doppia corsia per senso di marcia.....	137
Figura 63: Esempio di rappresentazione dei risultati ottenuti dal modello in caso di galleria unidirezionale	139
Figura 64: Esempio di rappresentazione dei risultati ottenuti dal modello in caso di galleria bidirezionale	140
Figura 65: Collocazione geografica del Traforo del Monte Bianco rispetto ai principali centri urbani italiani e francesi.....	144
Figura 66: Regole di circolazione previste dalla “Carta dei Servizi del Traforo del Monte Bianco”	146
Figura 67: Pannelli a messaggio variabile reperibili all'ingresso e all'interno del traforo	148
Figura 68: Rappresentazione schematica del Traforo del Monte Bianco con rappresentazione delle dotazioni impiantistiche descritte	149
Figura 69: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, questionario	151
Figura 70 a-b: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, velocità di esodo.....	152
Figura 71 a-b: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, tempo di massima permanenza.....	153
Figura 72: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, tempo di chiusura della galleria	154
Figura 73: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, tempo di premovimento.....	155
Figura 74: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report modello di formazione code.....	155
Figura 75: Caso di studio del traforo Del Monte Bianco: rappresentazione schematica della situazione analizzata e indicazione della posizione all'interno del questionario.....	156
Figura 76: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report risultati del caso di studio analizzato in caso di incendio di autovettura.....	157
Figura 77: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report risultati del caso di studio analizzato in caso di incendio di veicolo pesante.....	158
Figura 78: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report risultati del caso di studio analizzato in caso di incendio di veicolo trasportante merci pericolose.....	159
Figura 79: Imbocco della galleria Morgex Nord e rappresentazione schematica di parte del tunnel	163
Figura 80: Questionario, caso della galleria Morgex Nord.....	166
Figura 81 a-b: Caso di studio Galleria Morgex Nord, velocità di esodo	167
Figura 82 a-b: Caso di studio Galleria Morgex Nord, tempo di massima permanenza	168
Figura 83: Caso di studio Galleria Morgex Nord, tempo di chiusura della galleria	169
Figura 84: Caso di studio Galleria Morgex Nord, tempo di premovimento	170
Figura 85: Caso di studio Galleria Morgex Nord, report modello di formazione code	170
Figura 86: Caso di studio Galleria Morgex Nord: posizionamento dell'evento analizzato	171
Figura 87: Caso di studio Galleria Colle Capretto, questionario.....	176
Figura 88 a-b: Caso di studio Galleria Colle Capretto, velocità di esodo.....	177
Figura 89 a-b: Caso di studio Galleria Colle Capretto, tempo di massima permanenza.....	178
Figura 90: Caso di studio Galleria Colle Capretto, tempo di chiusura della galleria.....	179
Figura 91: Caso di studio Galleria Colle Capretto, tempo di premovimento.....	180
Figura 92: Caso di studio Galleria Colle Capretto, report modello di formazione code.....	180
Figura 93: Caso di studio della Galleria Colle Capretto, posizionamento dell'evento analizzato.....	181

Indice delle tabelle

Tabella 1: Gli incendi più seri della storia verificatisi all'interno di tunnel stradali (Carvel e Marlair, 2005).....	32
Tabella 2: Motivo di fermate in galleria che hanno portato allo sviluppo di incendi (XVIII World Road Congress, dati aggiornati al 1987)	37
Tabella 3: Valori di progetto per HRR nella valutazione di incendi nei tunnel secondo differenti normative	41
Tabella 4: Effetti della concentrazione di COHb nel sangue dell'uomo (Rotini, 2012).....	46
Tabella 5: Schematizzazione della risposta umana in relazione alle caratteristiche più significative delle persone coinvolte in un'evacuazione.....	53
Tabella 6: Suddivisione delle gallerie in base alle proprie caratteristiche prevista dalla normativa (ANAS s.p.a., 2009).....	66
Tabella 7: Definizione REI (D.M. 16/02/2007,2007).....	73
Tabella 8: Sistemi di ventilazione meccanizzata consigliati al variare della lunghezza del tunnel (DLgs 264, 2006).....	82
Tabella 9: Valori comunemente rappresentanti la potenza di un incendio in funzione del tipo di veicolo da cui scaturisce.....	95
Tabella 10: Assegnazione dei punteggi alle diverse dotazioni impiantistiche analizzate per la definizione del tempo di massima permanenza.....	103
Tabella 11:Assegnazione dei punteggi alle diverse dotazioni impiantistiche analizzate per la definizione della velocità di esodo degli utenti in fuga	105
Tabella 12: Coefficienti moltiplicativi associati alle diverse dotazioni impiantistiche per la definizione del tempo di chiusura del tunnel.....	117
Tabella 13: Definizione del tempo di premovimento in base al sistema di allarme previsto (Panzavolta, 2009).126	
Tabella 14: Coefficienti moltiplicativi associati alle diverse dotazioni impiantistiche per la definizione del tempo di premovimento degli utenti in fuga	127
Tabella 15: Valori di velocità indicati in letteratura al variare della visibilità (ANAS s.p.a., 2009).....	130
Tabella 16: Scheda tecnica del Traforo del Monte Bianco (GEIE-TMB).....	146
Tabella 17: Scheda tecnica galleria Morgex Nord	163
Tabella 18: Scheda tecnica galleria Colle Capretto.....	173

Indice dei grafici

Grafico 1: Rappresentazione grafica della presenza di gallerie sul territorio europeo e nazionale	11
Grafico 2: Classificazione temporale del numero di incidenti nelle gallerie stradali	14
Grafico 3: Esempio di rappresentazione del rischio tramite curve f-N.....	28
Grafico 4: Andamento della temperatura durante l'evoluzione di un incendio	38
Grafico 5: Rapporto tra velocità di esodo e densità del fumo.....	44
Grafico 6: Rappresentazione della variabilità del tempo in corrispondenza del quale un soggetto potrebbe iniziare ad avvertire dolore al variare della radiazione termica a cui è esposto (mazziotti, 2002)	45
Grafico 7: Tempo di incapacità da monossido di carbonio, per uomo di 70 kg a diversi livelli di attività.....	46
Grafico 8: Relazione FED – tempo di esposizione al variare della concentrazione di monossido di carbonio (Università “Sapienza”, 2007).....	48
Grafico 9: Relazione FED – tempo di esposizione a temperature a severità variabile (Università “Sapienza”, 2007).....	48
Grafico 10: Andamento della densità ottica durante il test sullo scuolabus del programma di studio EUREKA 499 (EUREKA-PROJECT, EU 499).....	58
Grafico 11: Andamento della temperatura durante il test 615b nel Memorial Tunnel, a 29 m dall'innesco dell'evento (Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program).....	59
Grafico 12: Test T2, Runehamar Tunnel (2003), andamento del valore HRR.....	60
Grafico 13: Test T2, Runehamar Tunnel (2003), andamento della temperatura in diverse sezioni di rilevamento.....	60
Grafico 14: Concentrazione dell'ossido di carbonio nei tre test del progetto EUREKA 499 (EUREKA-PROJECT, EU 499).....	61
Grafico 15: Rappresentazione schematica della variazione della velocità di esodo al variare del fumo presente (Mazziotti, 2002).....	129
Grafico 16: Variabilità del numero di vittime in funzione della visibilità delle uscite, studio ANAS	131
Grafico 17: Variabilità del numero di vittime al variare del tempo di allarme, studio ANAS.....	132
Grafico 18: Variabilità del numero di vittime al variare della velocità di propagazione dei fumi, studio ANAS	133

Abstract

Nel presente lavoro di tesi si propone una metodologia semplificata e speditiva per la definizione del danno connesso all'accadimento di un evento critico, riferendosi ad uno scenario considerato particolarmente gravoso nello specifico ambiente confinato della galleria: l'incendio.

Il metodo proposto individua ed analizza le caratteristiche strutturali ed impiantistiche che maggiormente condizionano la capacità di risposta di un tunnel stradale in seguito allo scoppio di un incendio al suo interno, con particolare riferimento ai requisiti definiti nel Decreto Legislativo n. 264 del 5 Ottobre 2006, recepiti nelle Linee guida ANAS 2009.

Secondo tale normativa, elementi distintivi dell'analisi delle conseguenze sono la determinazione del flusso del pericolo conseguente all'accadimento dell'evento, la definizione della popolazione esposta e la formulazione del processo di esodo; per l'elaborazione di tali elementi si prevede di aggregare le caratteristiche della galleria individuate in una serie di indicatori, che concorrono alla formulazione di un modello di formazione code, una modello di zonizzazione del flusso del pericolo ed in funzione di questi un opportuno modello di esodo.

Dai risultati di tali elaborazioni, tramite i dati inseriti nell'apposito questionario, lo strumento quantifica il danno definendo il numero di decessi derivanti dall'evento.

La metodologia definita è stata applicata a tre gallerie in esercizio, il Traforo del Monte Bianco, la galleria Morgex Nord e la Galleria Colle Capretto, al fine di valutare la funzionalità e la validità dello strumento.

1. Introduzione

Le gallerie sono infrastrutture particolarmente importanti: consentono infatti il superamento di limiti apparentemente insormontabili. Basti pensare ad esempio alla presenza della catena montuosa delle Alpi per rendersi conto che la realizzazione di opere che devono attraversare simili elementi morfologici non sarebbe possibile senza tratte in galleria.

Se per realizzare una strada di valico senza l'impiego di una tunnel sono necessarie opere onerose, come, ad esempio, curve a raggio ridottissimo ed elevate pendenze spesso insuperabili dal traffico pesante, la soluzione attraverso un'opera sotterranea permette di mantenere le quote contenute ed un tracciato il più possibile rettilineo.

1.1 Sicurezza nelle gallerie stradali

L'Europa, ed in particolare l'Italia, per le sue caratteristiche orografiche presenta uno sviluppo chilometrico di galleria molto rilevante, come individuato nel grafico sotto riportato.

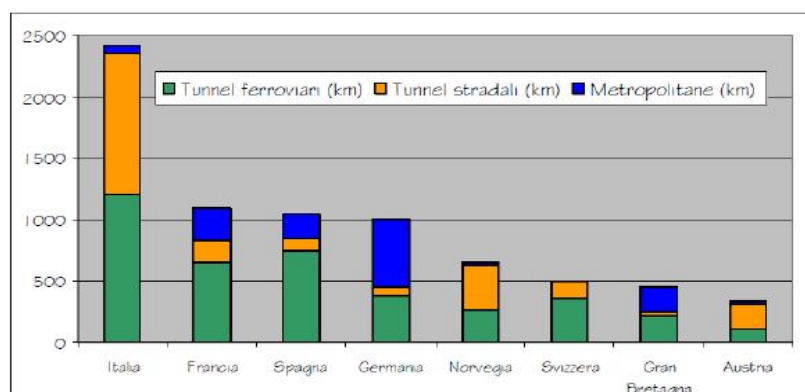


Grafico 1: Rappresentazione grafica della presenza di gallerie sul territorio europeo e nazionale

Grande importanza rivestono in particolare le gallerie facenti parte della cosiddetta Rete Trans-europea dei Trasporti (TEN-T)¹: l'Italia presenta il maggior numero di tunnel stradali appartenenti a questa rete, motivo per il quale l'attenzione verso queste opere è particolarmente elevata.

La presenza di attività che potenzialmente presentano dei rischi, pone il problema di garantire un adeguato livello di sicurezza.

All'interno delle gallerie il problema delle sicurezze assume un ruolo fondamentale: in particolare ha assunto una rilevanza sociale in conseguenza dei sinistri che si sono verificati negli ultimi anni, caratterizzati da un numero elevato di vittime, sia tra gli utenti che tra gli addetti al soccorso.

Si è quindi reso necessario lo sviluppo di adeguate norme di sicurezza per regolamentare la costruzione e gestione di queste importanti opere. In seguito ad alcuni drammatici incidenti occorsi alla fine del ventesimo secolo, uno su tutti il disastro del Monte Bianco, è emersa nelle istituzioni europee l'esigenza di intervenire radicalmente mediante una disciplina che rendesse impossibile, o quantomeno improbabile, il ripetersi di tali catastrofici eventi. E' nata così la Direttiva Europea 2004/54/CE, nella quale sono individuati i requisiti essenziali che tutte le gallerie appartenenti alla rete stradale Trans-Europea, siano esse già esistenti o di nuova costruzione, devono soddisfare entro il 2014.

In figura si riporta un'indicazione del numero di gallerie presenti nella rete Trans-Europea soggette alla normativa sopra citata².

¹ Il progetto è stato lanciato dall'Unione Europea nel 1994 con lo scopo di mettere in comunicazione tutti i suoi cittadini attraverso grandi vie di comunicazione, i cosiddetti "corridoi europei"

² Gallerie con lunghezza maggiore di 500 m

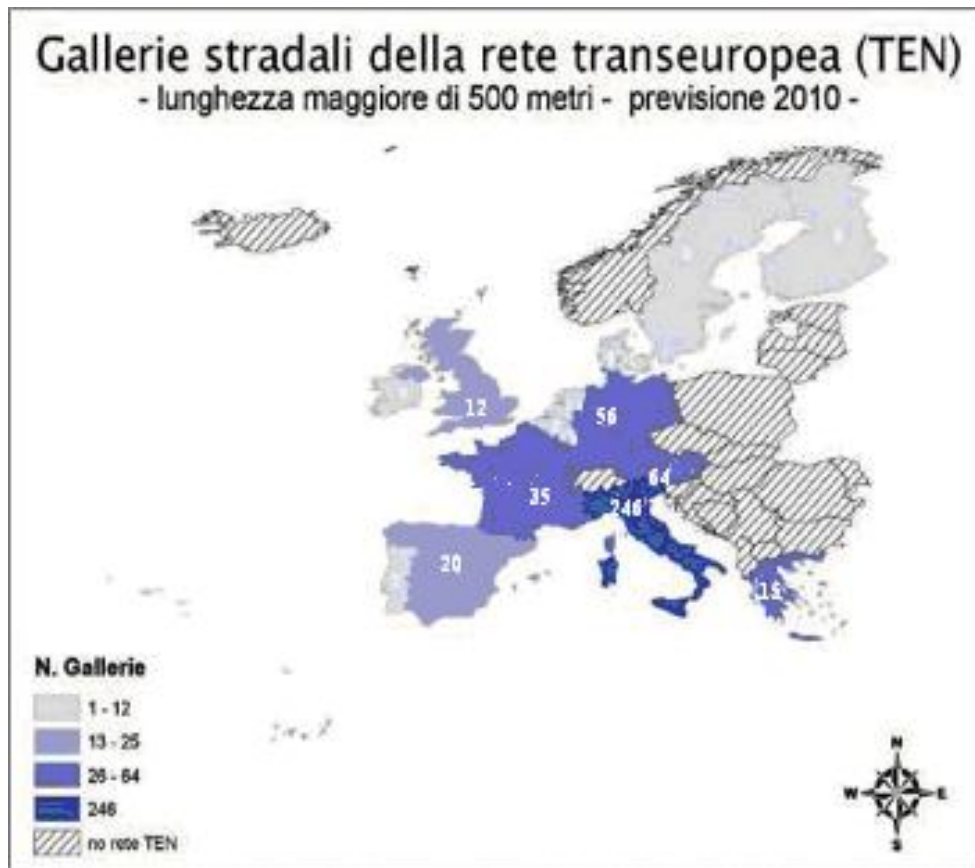


Figura 1: Gallerie stradali facenti parte della rete trans-europea TEN-T

Le principali statistiche rendono conto del fatto che le gallerie stradali sono complessivamente meno soggette ad incidenti rispetto alle corrispondenti sezioni a cielo aperto: questa considerazione nasce dal fatto che all'interno di queste strutture l'attenzione dell'utente è maggiore e la velocità di marcia diminuisce, trattandosi di un ambiente inusuale, oltre al fatto che in galleria non sono presenti le condizioni atmosferiche rilevate a cielo aperto.

Quando un incidente avviene in galleria, le conseguenze possono essere molto devastanti, proprio per il particolare ambiente dove esso avviene; sebbene infatti le gallerie moderne siano ben attrezzate a fronteggiare diverse tipologie di incidenti, come detto si sono verificati anche negli ultimi anni eventi passati alla storia per le disastrose conseguenze che hanno portato.

Analizzando i dati storici, emerge come il progresso tecnico che si è avuto con la fabbricazione di autoveicoli sempre più veloci e di maggiori dimensioni, unitamente ad un progressivo aumento del traffico, abbia portato ad un aumento di eventi incidentali.

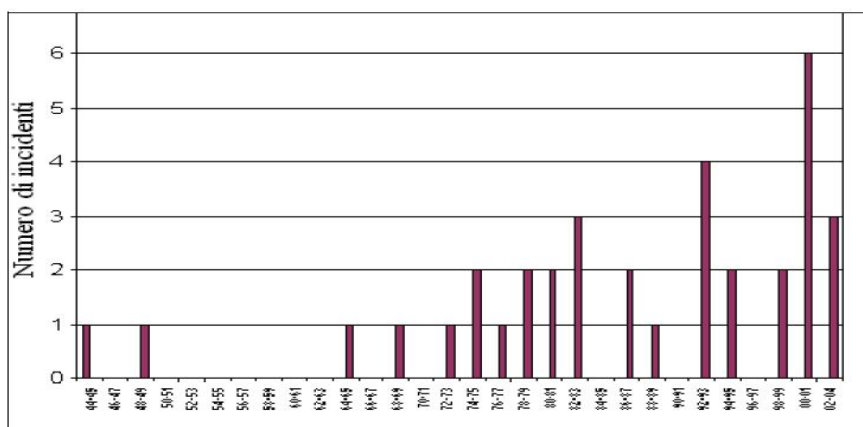


Grafico 2: Classificazione temporale del numero di incidenti nelle gallerie stradali

Da un'analisi di statistiche, si evince anche il fatto che il numero dei feriti risulti piuttosto basso: questo è dovuto al fatto che un incidente in galleria lascia poche possibilità di sopravvivenza, visti gli impedimenti nel raggiungere posti sicuri e la difficoltà di soccorso dei feriti.

Il più temuto tra gli eventi incidentali, per l'entità degli effetti e delle conseguenze, è l'incendio: i fumi e i gas tossici sviluppati ad alte temperature mantengono pericolosi i livelli di concentrazione anche ad elevata distanza, creando difficoltà non solo alle persone presenti all'interno del tunnel ma anche all'intervento dei soccorsi.

1.2 Obiettivo del lavoro di tesi

Nel presente elaborato si pone l'attenzione sull'evento incendio all'interno di un tunnel stradale: si vuole in particolare mettere in evidenza quanto le caratteristiche della galleria e gli impianti di sicurezza presenti siano influenti sulle conseguenze associate all'evento.

La definizione delle conseguenze è particolarmente importante in quanto parte fondamentale dell'analisi del rischio; proprio il rischio è definito dalle norme vigenti indicatore fondamentale per la definizione della sicurezza di una galleria³: si evince quindi quanto sia importante nella definizione della sicurezza l'analisi delle conseguenze associate ad un particolare evento.

Soffermandosi appunto sull'incendio, la definizione delle conseguenze passa necessariamente per una modellazione dello scenario: attualmente esistono in commercio numerosi software particolarmente elaborati in grado proprio di modellare sia l'incendio, prevedendo l'evoluzione nel tempo delle caratteristiche termodinamiche che lo caratterizzano, che l'esodo

³ L'argomento sarà trattato in maniera dettagliata ed approfondita nel capitolo 2

degli utenti coinvolti.

Lo strumento proposto ha l'obiettivo di definire un metodo di stima semplice e funzionale, che permetta di ottenere rapidamente una definizione delle conseguenze, in termini di decessi associati ad un incendio in galleria: il modello di calcolo elaborato permette quindi di ottenere tale definizione avendo semplicemente definito le condizioni al contorno, intese come caratteristiche dell'infrastruttura e condizioni iniziali dell'incendio, senza l'utilizzo di software di modellazione troppo elaborati.

Al fine di rendere questo strumento concretamente utile, si è proposta una semplice interfaccia grafica, che permetta ad un generico utente, esperto o meno in materia di sicurezza e/o galleria, di ottenere una stima rapida in seguito alla compilazione di un questionario, in cui vengono definite appunto le condizioni al contorno.

Per perseguire tale scopo, si è scelto un approccio che mirasse alla sintesi e garantisse allo stesso tempo una definizione il più possibile precisa e oggettiva; la relativa semplicità dello strumento, ha reso necessarie una serie di ipotesi semplificative: l'assunzione di tali ipotesi da una parte può indurre ad alcune approssimazioni, dall'altra permette di ottenere in maniera rapida un risultato anche con una conoscenza non troppo dettagliata dell'ambiente.

Lo strumento non ha la presunzione di stimare precisamente il numero di decessi derivanti da un incendio in galleria, in quanto questo è influenzato da caratteristiche aleatorie, legate principalmente al comportamento umano, che rendono tale valutazione imprevedibile; lo scopo dell'elaborazione proposta è quello di dare una stima oggettiva di tale valore, legandolo a condizioni definite, quali le caratteristiche strutturali del tunnel in cui si ipotizza l'evento: tramite l'utilizzo del modello di calcolo un utente può immediatamente rendersi conto della pericolosità del tunnel, valutandone la sicurezza.

1.3 Schema del lavoro di tesi

Il presente elaborato di tesi si struttura nelle seguenti parti:

– *Stato dell'arte*

Presentazione dei riferimenti presenti in letteratura in merito all'analisi del rischio delle gallerie stradali, con particolare riferimento all'evento incendio: dopo aver introdotto il problema, viene analizzata la normativa vigente in materia; si passa poi alla definizione del rischio e successivamente ad un'analisi del fenomeno incendio, soffermandosi principalmente sulle conseguenze generate sull'uomo e sulle condizioni di esodo.

– *Metodo di analisi e stima delle conseguenze*

Definizione delle principali caratteristiche di una galleria stradale e presentazione dei principi generali alla base dei modelli di esodo; definizione dello strumento di calcolo proposto, con l'elaborazione di un modello di zonizzazione del flusso del pericolo, un modello di formazione code ed un modello di evacuazione.

– *Applicazione a casi di studio*

Applicazione dello strumento a tre gallerie in esercizio: Traforo del Monte Bianco, Galleria Morgex Nord e Galleria Colle Capretto; analisi critica dei risultati ottenuti.

– *Conclusioni e possibili sviluppi.*

– *Allegato I*

Rappresentazione delle maschere di calcolo definite nel modello proposto.

2. Stato dell'arte

Lo studio delle conseguenze derivanti da un generico evento incidentale, ed in particolare il numero di decessi a cui tale evento evolve, si sviluppa all'interno della cosiddetta analisi del rischio, di cui il numero di decessi rappresenta un indicatore fondamentale.

La sensibilità al problema della sicurezza in galleria, di cui il rischio rappresenta un indicatore fondamentale, è notevolmente aumentata soprattutto in seguito ad una serie di eventi particolarmente gravi avvenuti negli ultimi decenni.

2.1 Incidenti gravi avvenuti in galleria

Come già definito, gli eventi incidentali, ed in particolare gli incendi, all'interno di una galleria portano a conseguenze particolarmente gravose.

Gli eventi di questo tipo nella storia sono numerosissimi: nel seguito si analizzano quattro casi rappresentativi, avvenuti tra il 1999 e il 2001.

2.1.1 Traforo del Monte Bianco, 1999

L'incidente più costoso degli ultimi anni in termini di vite umane, è stato quello avvenuto nel Tunnel del Monte Bianco il 24 marzo 1999.

La galleria, situata al confine tra Italia e Francia e inaugurata nel 1965, è costituita da una singola canna con due sensi di marcia, lunga 11611 m e larga 8,6 m.

Il disastro del 1999 è stato causato dall'incendio di un mezzo pesante: l'autista del mezzo, che trasportava margarina e farina, all'insorgere delle fiamme si è fermato all'interno del tunnel tentando di spegnerle, ma esse sono aumentate e dal motore si sono estese al carico trasportato.



Figura 2: Tunnel del Monte Bianco in seguito alla tragedia del 1999

Il sistema di ventilazione presente nel tunnel ha portato i fumi generati dalla combustione verso l'ingresso francese del tunnel, dove si è formata una densa nube di fumi e gas. L'intervento del servizio di emergenza non è stato imminente, non avendo informazioni sull'estensione dell'incendio e sui veicoli coinvolti.

A causa dell'assenza di un opportuno sistema di segnalazione, i veicoli inoltre hanno continuato ad entrare nel tunnel anche dopo lo scoppio dell'incendio, inoltre i rifugi per le persone all'interno della galleria non hanno resistito al calore.

L'incendio è durato 53 ore, raggiungendo punte di temperatura superiori ai 1000°C, che hanno portato allo scioglimento dell'asfalto ed al collasso delle strutture in cemento.

Le conseguenze dell'evento hanno portato al decesso di 39 persone, la maggior parte per asfissia, mentre non sono stati registrati feriti; i danni economici diretti sono stati stimati in 200 milioni di euro, a cui vanno aggiunti i danni indiretti, visto che la galleria è rimasta chiusa fino al 2002.

In seguito a questo catastrofico evento il tunnel ha subito una serie di interventi di ammodernamento che lo hanno portato ad essere ora considerato uno dei più sicuri esistenti.

2.1.2 Tauerntunnel, 1999

Il Tauerntunnel è un tunnel autostradale austriaco, che attraversa la catena degli Alti Tauri; aperto al traffico nel 1975, ha un'estensione di 600 m, ed è costituito da un'unica canna con doppio senso di marcia.

Il 29 maggio 1999 un tamponamento ha portato all'innescò di un incendio. Il giorno

precedente, 28 maggio, un incidente aveva reso necessaria l'installazione di un semaforo mobile provvisorio all'interno del tunnel, per regolare il traffico a sensi alternati; l'evento è stato causato da un tamponamento dei veicoli fermi in coda al semaforo rosso da parte di un autocarro che sopraggiungeva, a causa di un colpo di sonno dell'autista: tra i veicoli tamponati vi era un autocarro trasportante bombolette di vernice spray, che ha preso fuoco portando rapidamente ad una situazione catastrofica: in figura 5 sono riportati i resti di alcuni veicoli dopo l'incendio.



Figura 3: Scenario presente all'interno del Tauerntunnel dopo il tragico evento del 1999

L'evento ha portato all'incendio di 24 veicoli: il fumo sviluppatosi si è inizialmente portato verso il soffitto, permettendo agli utenti coinvolti di allontanarsi senza troppe difficoltà, ma la successiva esplosione di una serie di bombolette spray ha generato un'elevata quantità di fumo e calore, rendendo impossibile il raggiungimento delle vie di fuga.

A causa dell'incendio si è registrato il decesso di 8 persone.

2.1.3 Galleria del San Gottardo, 2001

Due anni più dopo gli eventi precedentemente descritti, si è verificato un altro grave incidente: il 24 ottobre 2001 si è sviluppato un incendio all'interno del Tunnel del San Gottardo, in Svizzera, uno dei più lunghi e trafficati al mondo.

La galleria, aperta al traffico nel 1980, è costituita da un'unica canna con traffico bidirezionale, lunga 16918 m.

L'incidente del 2001 è stato causato dallo scontro frontale tra due autotreni, che ha portato allo sviluppo di un incendio: uno dei due veicoli trasportava pneumatici e teli cerati, che

hanno rapidamente preso fuoco alimentando le fiamme.



Figura 4: Incendio all'interno della Galleria del San Gottardo, 24 ottobre 2001

In questo caso, il numero di vittime è stato limitato da un efficiente sistema di emergenza: le barriere semaforiche di emergenza hanno prontamente fermato i veicoli agli ingressi della galleria, il sistema di ventilazione è passato in stato di emergenza, le squadre di soccorso sono state prontamente avvisate e la presenza di un tunnel di servizio ha permesso di salvare numerosi utenti.

Si sono comunque registrati 11 decessi, la maggior parte causati da asfissia; la stima dei costi legati a questo evento è ammontata a circa 12 milioni di euro, comprendente le spese di riparazione del tunnel e la liquidazione delle compagnie di assicurazione.

2.1.4 Tunnel del Frejus, 2005

Il Traforo del Frejus collega Italia e Francia, da Bardonecchia a Modane, ed ha un'estensione di 12870 m, di cui 6800 su territorio italiano.

Il 4 giugno 2005 si è verificato all'interno della galleria un evento incidentale che ha portato allo sviluppo di un incendio: come testimoniato dalle immagini delle telecamere presenti nel tunnel, il guasto al motore di un tir carico di pneumatici provocò lo sversamento di una grande quantità di gasolio, che prese poi fuoco.



Figura 5: Rogo all'interno del tunnel del Frejus, situazione al termine dell'intervento dei soccorsi

L'incendio divenne subito di proporzioni rilevanti, alimentato anche dall'incendio di altri automezzi vicini, due dei quali trasportanti colla: le temperature arrivarono anche a superare i 1000°C, provocando il crollo della volta.

I soccorsi, ostacolati anche dal vento, hanno impiegato oltre tre ore per raggiungere il luogo dell'incidente, e oltre 12 ore per terminare il loro lavoro.

Anche in questo caso ci furono 2 vittime, oltre a numerosi intossicati.

2.2 Normativa di riferimento

la criticità delle gallerie stradali, messa in luce dagli eventi critici avvenuti, è stata avvertita anche dagli organi preposti all'emanazione di leggi e norme di sicurezza.

Le normative nazionali ed internazionali riguardanti le gallerie stradali, rappresentano un utile strumento di riferimento in continuo aggiornamento.

Nel presente capitolo si descrive sinteticamente quanto previsto in materia dalla normativa.

Fino alla fine degli anni '90 le uniche norme per la realizzazione e gestione degli impianti di galleria erano la UNI 11095 e la CIE 88, riferite alla sola illuminazione stradale.

La necessità di evitare le tragiche conseguenze degli eventi precedentemente esposti, ha fatto emergere nelle istituzioni europee l'esigenza di intervenire radicalmente con una serie di norme aventi proprio questo scopo.

2.2.1 Circolare Ministeriale n.7938 del 06 dicembre 1999

“Sicurezza della circolazione nelle gallerie stradali con particolare riferimento ai veicoli che trasportano materiali pericolosi”.

Questa circolare, sviluppata in seguito al tragico evento del Monte Bianco avvenuto nel 1999, ha la finalità di disciplinare la circolazione dei veicoli all'interno delle gallerie stradali.

Sono indicate una serie di direttive che prevedono l'adeguamento dei tunnel esistenti, con particolare riferimento agli impianti di sicurezza, e disciplinano la costruzione di nuove gallerie.

Viene richiamata la facoltà di ogni singolo ente concessionario di strada di imporre specifiche prescrizioni ai veicoli trasportanti merci pericolose; prevedono un di stanziamento minimo dei veicoli in marcia pari a 100 m, e impongono di definire dove necessario il divieto di sorpasso.

Viene inoltre imposto ai proprietari di gallerie di effettuare verifiche tecniche per la definizione di limiti di velocità, all'interno dei tunnel e agli imbocchi dello stesso, nonché di effettuare verifiche degli impianti di illuminazione per garantire un'adeguata visibilità.

2.2.2 Decreto Ministeriale 05 giugno 2001

“Sicurezza nelle gallerie stradali”.

La funzione di questo decreto fu quella di rafforzare la circolare definita nel paragrafo precedente, aggiungendo delle prescrizioni e l'obbligo da parte degli enti gestori di effettuare un censimento tramite la compilazione di apposite schede.

Vengono prescritte inoltre le modalità di attuazione dei vari adempimenti previsti nonché la definizione di criteri per l'analisi del rischio.

2.2.3 Decreto Ministeriale 05 novembre 2001

“Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”.

In questo decreto vengono specificate le principali regole per la costruzione di strade; in particolare per le gallerie vengono definite le sezioni trasversali, in funzione della categoria

stradale in cui ricadono. Si specifica tra l'altro che l'altezza libera della galleria non deve essere inferiore di 4,8 m, con un franco libero in corrispondenza della carreggiata pari a 5 m; per le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m devono prevedersi piazzole di sosta e collegamenti pedonali, mentre per le gallerie in strade di categoria A, B e D si prevede di limitare la pendenza, non superiore al 4%, per contenere le emissioni di inquinanti.

2.2.4 Norma UNI 11095 del 01 dicembre 2003

“Luce ed illuminazione – illuminazione delle gallerie”.

Questa norma specifica i requisiti dell'impianto di illuminazione di un tunnel stradale, al fine di garantire un'opportuna visibilità agli utenti in marcia, sia di giorno che di notte, con grado di confort e sicurezza non inferiore a quelli corrispondenti alle tratte a cielo aperto.

2.2.5 Decreto Ministeriale n. 3476 del 14 settembre 2005

“Norme di illuminazione delle gallerie stradali”.

Anche questa norma rivolge l'attenzione ai sistemi di illuminazione dei tunnel stradali, con particolare attenzione al contenimento dei consumi energetici; si definisce che “l'illuminazione delle gallerie stradali ed autostradali, esistenti o di nuova realizzazione, deve essere progettata e verificata secondo le indicazioni contenute nella norma UNI 11095 del 2003, definita precedentemente”. Il decreto definisce poi i criteri che devono essere osservati per la definizione delle caratteristiche del sistema di illuminazione, in particolare la curabilità dei componenti, l'ottimizzazione dei costi di installazione, gestione e manutenzione, l'integrazione di tale impianto con altri eventuali sistemi di sicurezza, nonché l'affidabilità del funzionamento.

2.2.6 Direttiva 2004/54/CE del 29 aprile 2004

“Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea”.

Questa direttiva rappresenta l'attuale riferimento normativo europeo in materia di sicurezza

nelle gallerie della rete stradale: individua gli obiettivi di sicurezza da perseguire, identifica i parametri da considerare, fissa i requisiti minimi da soddisfare, identifica l'analisi di rischio come lo strumento analitico da utilizzare per determinare il livello di sicurezza di una galleria.

Tale ordinanza si applica appunto a tutte le gallerie presenti nella rete stradale transeuropea, definita in capitolo 1, con lunghezza superiore ai 500 m.

Si sottolinea la necessità di requisiti comuni per rafforzare la sicurezza, per garantire un sistema di comunicazione confortevole e sicuro all'interno del territorio europeo.

Sono definite una serie di misure inerenti alle caratteristiche strutturali ed impiantistiche dei tunnel, al fine di definire dei requisiti minimi necessari in funzione principalmente del volume di traffico registrato.

Altra importante introduzione della direttiva è la periodica redazione da parte degli Stati membri di relazioni descrittive incidenti e incendi avvenuti sul territorio di competenza (articolo 15).

La normativa prevede 3 allegati: nel primo vengono definite le misure di sicurezza minime da garantire, basate su caratteristiche strutturali e di traffico del tunnel considerato; l'Allegato II descrive l'iter di approvazione del progetto e della messa in servizio della galleria e le relative documentazioni di sicurezza necessarie, e sottolinea la necessità di esercitazioni periodiche in materia di sicurezza; infine l'Allegato III definisce la segnaletica utilizzata nelle gallerie europee: tale allegato individua la necessità di segnalare opportunamente piazzole, uscite di emergenza e vie di fuga.

2.2.7 Decreto Legislativo n. 264 del 5 ottobre 2006

“Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea”.

L'ordinamento italiano ha recepito la Direttiva Europea mediante questo Decreto Legislativo, nel quale sono individuati i requisiti prestazionali che devono essere soddisfatti nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione per garantire che una galleria sia conforme.

Tale Decreto è sviluppato in 19 articoli e 4 allegati, che ripercorrono le linee della direttiva europea. Nell'Allegato III in particolare viene presentata la metodologia di analisi di rischio adottata in territorio italiano: come specificato, tale analisi si riferisce esclusivamente agli

eventi considerati critici nell'ambiente confinato delle gallerie, quali incendi, collisioni con incendio, sversamento di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e/o nocive, e ha l'obiettivo di definire appunto il rischio connesso ad una galleria, definito come valore atteso del danno.

2.2.8 Circolare ANAS n. 17 del 2006, revisione 2009

“Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali”.

Parallelamente all'emissione della Direttiva e del Decreto Legislativo descritti sopra, sono state sviluppate da ANAS le Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali, che hanno tradotto i requisiti indicati nei DLgs in prescrizioni tecniche più specifiche su come debbano essere realizzati gli impianti per risultare conformi.

Questo documento risponde all'esigenza di ANAS di dotarsi di uno strumento che garantisca omogeneità nelle scelte progettuali relative alla sicurezza, e presenta alcune differenze dalle prescrizioni della Direttiva 2004/54/CE: ad esempio mentre tale direttiva differenzia alcune dotazioni impiantistiche con dei limiti di lunghezza pari a 1500 m e 4000 m, le Linee Guida ANAS considerano dei valori pari a 1000 m e 3000 m; un'altra differenza sta nella resistenza al fuoco degli impianti: mentre la Direttiva europea fissa un minimo di resistenza a 250°C per 90 minuti, le LG prevedono una resistenza per lo stesso periodo pari a 400°C.

Il testo si articola in una serie di capitoli in cui si definisce prima di tutto il problema della sicurezza e successivamente una procedura di progettazione della stessa all'interno di gallerie stradali; per le diverse dotazioni strutturali ed impiantistiche, sono definiti degli standard progettuali minimi da garantire, analizzati specificatamente per gallerie unidirezionali e bidirezionali: per un approfondimento su tali parametri si rimanda al capitolo 3, paragrafo 3.1.1.

Anche ANAS pone particolare attenzione alla definizione ed analisi del rischio, individuandolo come indicatore fondamentale della sicurezza.

Nel seguente paragrafo, in base alle considerazioni fatte sull'importanza di tale indicatore, si pone particolare attenzione al rischio nelle gallerie stradali.

2.3 Il concetto di rischio

Il rischio può essere definito come la combinazione tra la probabilità di accadimento di un evento capace di procurare danno ad un determinato recettore, e la gravità delle conseguenze del potenziale evento sul recettore stesso[31].

Esistono diverse formulazioni per la definizione del rischio; l'espressione quantitativa prevede di definirlo come prodotto di due componenti, la probabilità di accadimento di un evento e l'entità dello stesso in termini di conseguenze.

$$R = P \times C$$

la componente “conseguenze” può essere a sua volta definita come combinazione di vulnerabilità ed esposizione.

Vulnerabilità (V)

La vulnerabilità può essere definita come “*attitudine del danno di un dato elemento esposto a seguito di un evento critico di intensità data*”; è quindi identificabile come un legame tra evento ed intensità dei danni.

A seconda dei danni riscontrabili, la vulnerabilità si divide in:

- vulnerabilità fisica: rappresenta la possibilità di danneggiamento dell'elemento fisico di un sistema di trasporto in seguito ad un evento avverso; è quindi legata ad un danno fisico, ad esempio il danneggiamento di una galleria o di un ponte;
- vulnerabilità funzionale: quota parte del servizio prodotto da un'infrastruttura che non può essere fornita all'utenza in seguito al verificarsi di un evento avverso.
- La vulnerabilità funzionale di un'infrastruttura può essere suddivisa in diretta e indiretta: la prima è la perdita di funzionalità che si manifesta sull'infrastruttura stessa, la seconda è invece identificabile come la frazione di servizio perso a causa di un evento che si verifica su un'altra infrastruttura della stessa rete;
- vulnerabilità sistemica: definibile come la quota parte di un'area o di una attività sul territorio soggetta a non vedere soddisfatte le proprie esigenze di mobilità, come ad esempio la riduzione di mobilità di un'area.

Esposizione (E)

L'esposizione, altra componente fondamentale del rischio, è identificabile come la “*quantità di persone o cose presenti o loro valore potenzialmente suscettibile a subire danno*”: rappresenta quindi un legame tra evento ed entità dei potenziali recettori dei danni.

Anche in questo caso, si possono individuare diverse definizioni:

- esposizione fisica: esprime il valore intrinseco di un'infrastruttura;
- esposizione funzionale: definibile come il servizio o la prestazione forniti da un'infrastruttura agli utenti del servizio, come ad esempio la capacità o il flusso veicolare di una strada;
- esposizione sistemica: entità che trae beneficio da un sistema di mobilità, come l'area territoriale servita da una rete o il valore prodotto dalle attività economiche presenti in un'area.

Risulta quindi:

$$R = f(P,V,E)$$

L'analisi del rischio identifica un insieme di tecniche che utilizzano dati scientifici e calcoli statistici per produrre stime affidabili sulla comparsa di pericoli specifici in determinati scenari.

Tale analisi, che può essere applicata ai diversi settori delle attività umane, è un processo che consente di descrivere qualitativamente e quantitativamente la probabilità e l'impatto potenziale di alcuni rischi (valutazione del rischio), di formulare decisioni o proporre alternative/opzioni di controllo degli stessi (gestione del rischio) e di comunicare a tutti i soggetti interessati i risultati della valutazione del rischio e le decisioni che si suggerisce di prendere (comunicazione del rischio).

Una volta che in un processo sono individuati quegli eventi che contengono una componente di pericolosità, se ne analizzano separatamente la probabilità e/o gravità delle conseguenze: la quantificazione del rischio è quindi espressa attraverso valutazioni statistiche di eventi non desiderati sulla popolazione effettivamente esposta al rischio stesso.

Generalmente, la fase più critica nella valutazione di un rischio è lo studio della probabilità dell'evento, difficilmente quantificabile; in generale non è sempre corretto affidare lo stesso peso alle due componenti “P” e “C”: non è sempre vero che 100 incidenti l'anno, ciascuno con un morto, equivalgono a 10 incidenti l'anno con, ciascuno con 10 morti, oppure ad un unico incidente l'anno con 100 morti (Canale, Fabiano e Leonardi, 1998).

Per superare queste incongruenze, si è soliti definire il rischio sociale⁴ con delle curve su di un piano f-M, rispettivamente frequenza (probabilità di accadimento) e magnitudo (conseguenze).

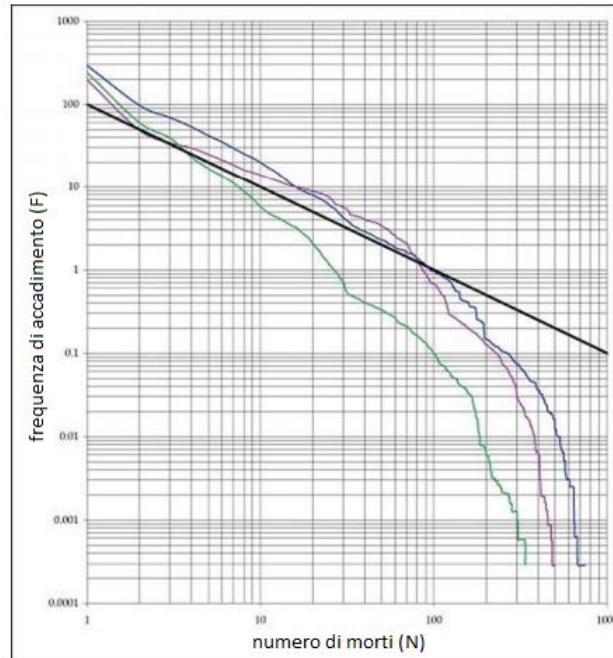


Grafico 3: Esempio di rappresentazione del rischio tramite curve f-N

2.3.1 Rischio trasporti

Il rischio trasporti può essere definito come un rischio legato ad attività di spostamento sul territorio di persone o cose, e può coinvolgere gli stessi soggetti dello spostamento oppure generare effetti esterni diffusi anche al di fuori di essi.

Innanzitutto è opportuno suddividere rischio attivo e passivo:

- rischio attivo: causato dal sistema di trasporti sull'ambiente esterno; tale definizione raggruppa eventi quali esodi, incidenti stradali, blocchi del traffico e in generale tutte le attività di un sistema di trasporti che ne determinano una perdita di funzionalità.
- rischio passivo: subito dal sistema dei trasporti a causa di eventi esterni; generalmente si tratta di eventi naturali, quali eventi meteorici intensi, alluvioni, esondazioni, frane terremoti, etc.

⁴ Associato alle conseguenze di un evento sulla collettività, concettualmente differente dal rischio individuale che invece considera le conseguenze su un singolo individuo



Figura 6: Esempi di rischi attivo e passivo; rappresentazione rispettivamente di ingorgo stradale e frana

Anche la probabilità di accadimento associata al rischio si differenzia: in particolare per il rischio attivo viene stimata con lo studio di fenomeni che si manifestano su aree interessate da eventi rilevanti originati da attività di trasporto, mentre per il rischio passivo si utilizzano risultati di analisi di altre discipline scientifiche, che studiano la probabilità di accadimento di eventi esterni al sistema di trasporto.

2.3.1.1 Criteri di accettabilità del rischio

Al fine di definire il livello minimo sufficiente di sicurezza agli utenti della strada, è necessario definire un criterio di accettazione del rischio; la letteratura tecnica, in particolare le Linee Guida ANAS analizzate, individua tre principi generali dai quali derivare tale criterio:

- il principio ALARP (As Low As Reasonably Practicable), basato sul concetto di rischio sociale, dice : *il rischio sociale deve essere valutato per ogni attività antropica che possa provocare sinistri risultanti in un numero significativo di fatalità;*
- il principio MEM (Minimum Endogenous Mortality), basato sul concetto di rischio individuale, recita: *il rischio connesso ad un nuovo sistema di trasporto non dovrebbe aumentare in modo significativo il tasso di mortalità endogena in un individuo;*
- il principio GAMAB (Globalement Au Moins Aussi Bon), non direttamente connesso ai concetti di rischio sociale ed individuale, definisce: *un nuovo sistema di trasporto deve assicurare un livello di rischio globalmente almeno pari al livello di rischio di un sistema esistente ad esso affatto analogo.*

La normativa di riferimento si sofferma in particolare sul concetto di rischio sociale, e studia principalmente il principio ALARP, risultando il principio GAMAB fortemente condizionato

nell'applicazione dalle valutazioni qualitative formulate dagli esperti⁵.

Il concetto ALARP è utilizzato come principio guida per assumere decisioni consapevoli ed informate sul rischio ed in particolare è scelto dal legislatore italiano come criterio di accettazione del rischio. Tale principio individua tre aree distinte:

- 1) area del rischio “non accettabile”, situazione in nessun caso giustificabile;
- 2) area del rischio “accettabile”, situazione in cui il valore è da ritenersi accettabile e non risultano necessarie ulteriori indagini ed azioni;
- 3) area “ALARP”, situazione in cui è necessario individuare azioni al fine di ridurre il valore del rischio, per quanto ragionevolmente praticabile.

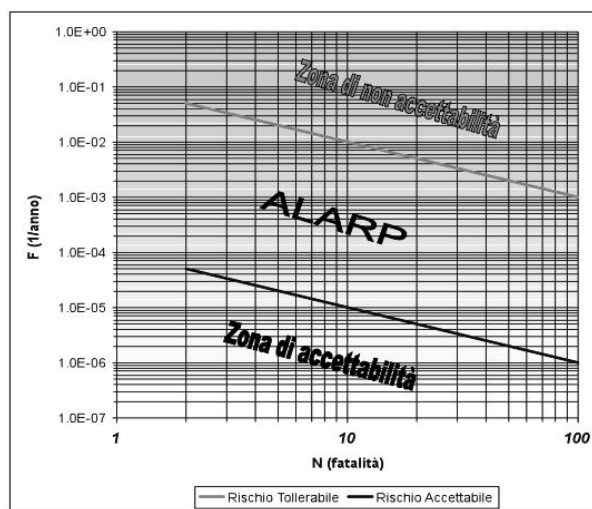


Figura 7: Rappresentazione sul piano f-N del criterio di accettabilità del rischio ALARP (ANAS S.P.A., 2009)

2.3.2 Rischio associato al trasporto in galleria

Considerando il rischio come prodotto di probabilità e conseguenza, si osserva che le gallerie sono caratterizzate da una frequenza incidentale ridotta rispetto alle tratte a cielo aperto: in particolare dai dati statistici emerge che maggiore è la lunghezza dei tunnel stradali, minore è la probabilità di incidente. A fronte di una diminuzione della probabilità, si riscontra però un aumento della severità delle conseguenze.

Come specificato nelle Linee Guida ANAS, “[...] l'analisi di rischio richiesta dalle norme si riferisce esclusivamente all'analisi degli eventi considerati critici nello specifico ambiente

⁵ Il principio GAMAB risulta comunque rapido ed efficace nell'applicazione in particolare quando si confrontano sistemi di trasporto simili nelle caratteristiche e dotazioni

confinato delle gallerie, vale a dire incendi, collisioni, sversamento di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e nocive e sono quindi esclusi gli eventi propri dell'incidentalità stradale, connessi a caratteristiche geometriche dell'infrastruttura e non indotti dallo specifico ambiente galleria”.

Le gallerie rappresentano strutture particolarmente critiche nel caso in cui si verifichi un incendio al loro interno: l'azione di confinamento esercitata dalla galleria, infatti, comporta una rapida saturazione dell'ambiente da parte delle fiamme e dei fumi, rendendo rapidamente l'aria irrespirabile, limitando la visibilità, innalzando la temperatura e aumentando progressivamente la difficoltà di esodo dei soggetti che al momento dell'innesco si trovano all'interno della struttura.

Analizzando i dati sotto riportati, si evince chiaramente che l'incendio in galleria non è l'evento principale, in quanto associato ad una bassa probabilità, ma è il più pericoloso.

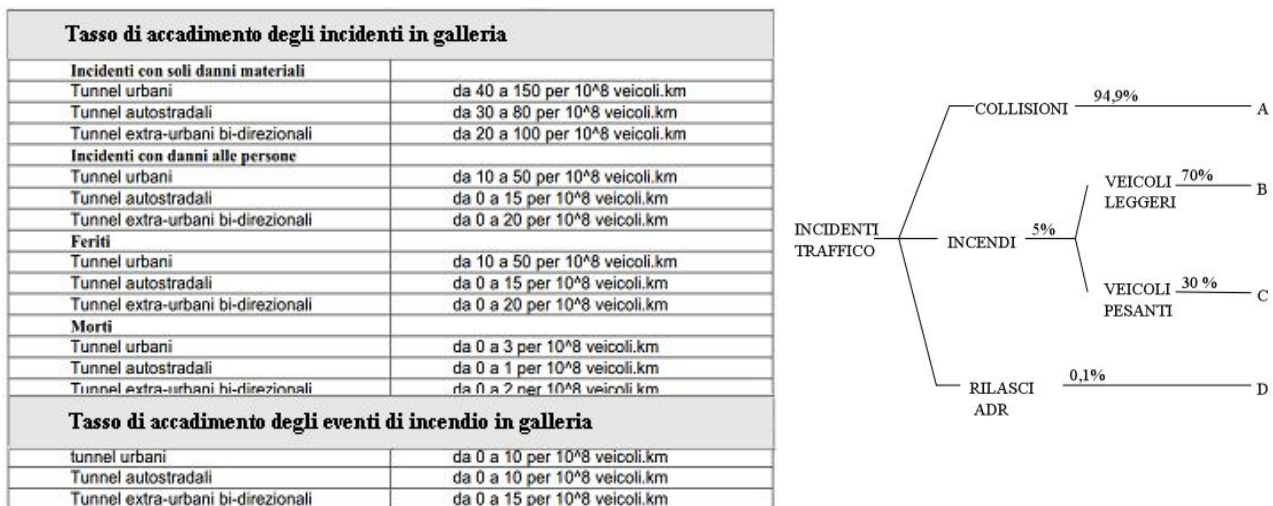


Figura 8: Analisi di dati incidentali in galleria (ANAS s.p.a., 2009)

L'incidente più serio della storia provocato da un incendio in galleria è avvenuto in Italia nel 1944, nel tunnel delle Armi a Balvano, tunnel ferroviario a sud di Napoli, in cui 400-500 persone persero la vita per via dell'esposizione⁶. Analizzando casi prettamente riguardanti tunnel stradali, si riportano in tabella i principali avvenimenti.

⁶ E' bene ricordare che non si trattò di un vero e proprio incidente quanto di una serie di malaugurate coincidenze che bloccarono il treno e ed i suoi motori a vapore all'interno della galleria

Data	Tunnel	Causa d'incendio	Danni al tunnel	Morti/feriti
Maggio 1949	Holland L = 2550 m	Crollo di carico da 1 HGV con 11 ton di CS ₂	Gravi danni per 200 m	66 feriti
Agosto 1978	Velsen L = 770 m	Tamponamento tra 2 HGV e 4 automobili	Gravi danni per 30 m	5 morti 5 feriti
Luglio 1979	Nibonzaka L = 2045 m	Tamponamento tra 4 HGV e 2 automobili	Gravi danni Per 1100 m	7 morti 2 feriti
Aprile 1980	Kajiwara L = 740 m	Collisione con muro laterale e cappottamento di 1 autotreno con 3600 litri di vernici	Gravi danni Per 280 m	1 morto
Aprile 1982	Caldecott L = 1083 m	Tamponamento tra 1 automobile, 1 bus, 1 HGV, 1 autocisterna con 33000 litri di petrolio	Gravi danni per 580 m	7 morti 2 feriti
Febbraio 1983	Frèjus L = 12868 m	Rottura della scatola del cambio di 1 HGV caricato con materiali plastici	Gravi danni Per 200 m	0 / 0
Settembre 1984	Felbertauern L = 5130 m	Bloccaggio dei freni di 1 bus	Danni al soffitto ed alle attrezzature per 100 m	0 / 0
1987	Gumefens L = 340 m	Collisione di 1 HGV	Lievi danni	2 morti
1993	Serra a Ripoli L = 442 m	Collisione tra 1 automobile e 1 HGV caricato con rulli di carta	Gravi danni ai fianchi della galleria	4 morti 4 feriti
Luglio 1994	San Gottardo 16322 m	Attrito tra ruote e piano di carico di 1 HGV con rimorchio caricato con 750 biciclette avvolte in carta e plastica	Gravi danni al soffitto, al pavimento ed alle attrezzature per 50 m Tunnel chiuso per 2,5 giorni	0 / 0
Febbraio 1996	Isola delle femmine L = 150 m	Collisione di 1 bus con 1 autocisterna carica di gas liquido, ferma per una precedente collisione	Danni alle pareti ed al sistema di illuminazione	5 morti 34 feriti
Marzo 1999	Monte Bianco L = 11600 m	Incendio spontaneo su 1 HGV	Gravi danni per 900 m tunnel chiuso per 3 anni	39 morti
Maggio 1999	Tauern L = 6400 m	Collisione multipla per la presenza di lavori di manutenzione	Dispersione di vernici Tunnel chiuso per 3 mesi	12 morti
Luglio 2000	Seljestads L = 1272 m	Collisione multipla e incendio di 1 serbatoio	Gravi danni	6 feriti
Ottobre 2001	San Gottardo L = 16322 m	Collisione tra 2 HGV	Gravi danni per 200 m Danni per 700 m Tunnel chiuso per 2 mesi	11 morti
Novembre 2003	Flofjell L = 3100 m	Collisione di 1 automobile con propagazione delle fiamme lungo i fianchi della galleria	Lievi danni	1 morto
Giugno 2005	Frèjus L = 12868 m	Incendio del serbatoio di 1 HGV caricato con pneumatici	10 km di attrezzature danneggiate	2 morti 1 ferito

Tabella 1: Gli incendi più seri della storia verificatisi all'interno di tunnel stradali (Carvel e Marlair, "A history of fire incidents in tunnels", London, UK, 2005)

Un'altra analisi importante è la valutazione dei punti più critici della galleria; secondo la letteratura infatti, la frequenza maggiore di eventi incidentali si registra nelle zone di imbocco e di uscita, a causa della variazione di alcuni parametri, quali ad esempio luminosità, geometria, vento in uscita; si ha invece un andamento contrario per quanto riguarda la severità delle conseguenze: la pericolosità dei sinistri diminuisce in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita.

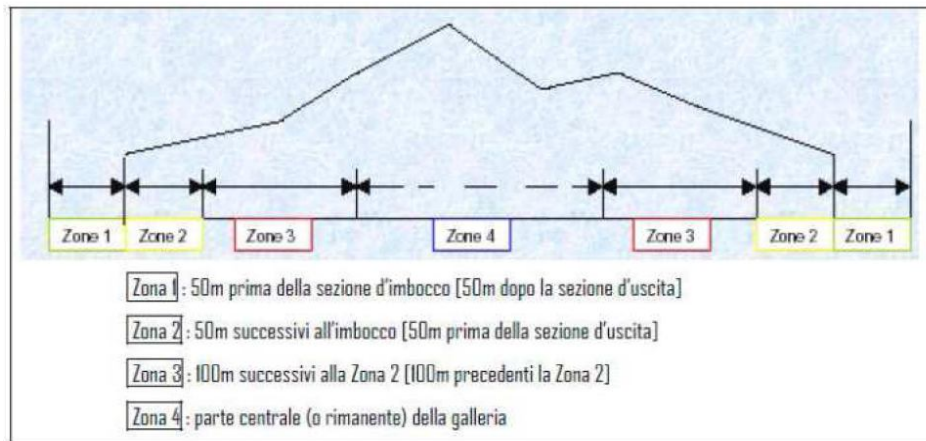


Figura 9: Suddivisione della galleria in funzione del pericolo [Maja, 2011]

2.3.2.1 Merci pericolose in galleria

Appare opportuno soffermarsi sul trasporto di merci pericolose: è risaputo che questa tipologia di merci può provocare eventi catastrofici, sia nel caso di rilascio sia nel caso di esplosioni ed incendi.

Tuttavia, impedire la circolazione di queste merci al fine di eliminare un potenziale pericolo non sarebbe sostenibile: questo non eliminerebbe i rischi, ma li sposterebbe semplicemente in un luogo differente; è stato quindi necessario definire le condizioni per cui è possibile garantire la libera circolazione dei beni e al contempo la sicurezza in ambienti particolari quali le gallerie.

Il trasporto di tali merci su strada è regolamentato dall'Accordo Europeo relativo al Trasporto Internazionale di Merci Pericolose su Strada - ADR (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road).

Il testo identifica le merci e le classifica in funzione dei pericoli ad esse associati; per le diverse sostanze si definiscono eventuali restrizioni e si indicano gli accorgimenti necessari per un trasporto sicuro.

In relazione al trasporto di merci pericolose in galleria, sono previste delle restrizioni attraverso la sua assegnazione ad una delle 5 categorie individuate:

Categoria A

Nessuna restrizione al trasporto

Categoria B

Restrizione all'accesso per merci esplosive

Categoria C

Restrizione per le merci esplosive e tossiche con rischio di rilascio rilevante

Categoria D

Oltre alle restrizioni previste dalla categoria C, si vieta l'accesso anche a merci infiammabili

Categoria E

Restrizione all'accesso per tutti i tipi di merci pericolose tranne rifiuti ospedalieri e scorie radioattive.

La necessità di vietare il transito ad alcuni tipi di merci, nasce dalla necessità di diminuire il più possibile il rischio, ed in particolare limitare le conseguenze di un ipotetico evento incidentale: come definito precedentemente, particolare attenzione viene posta verso l'evento incendio, a cui sono associate le conseguenze più gravose.

2.4 Scenari incidentali in galleria: l'incendio

Tra i possibili rischi da considerare in galleria, come detto gli incendi sono quelli che danno maggiori preoccupazioni. Per tale ragione, nel corso degli anni, le grandi organizzazioni mondiali per la sicurezza stradale (PIARC, ITA, OECD⁷) si sono occupate con particolare interesse del tema dell'antincendio.

Le Linee Guida ANAS 2009 individuano tra tutti gli eventi che possono accadere in galleria 5 principali tipologie:

- eventi di incendio
- eventi di collisione che degenerano in eventi di incendio
- eventi di sversamento di combustibili liquidi infiammabili

⁷ PIARC (World Road Association Mondiale de la Rue) rappresenta a livello mondiale la principale fonte di informazione riguardante strade, trasporto stradale e sue applicazioni;
ITA (International Tunnel and Underground Space Association) affronta gli aspetti legati alla realizzazione di tutti i tipi di opere sotterranee, tra cui anche le gallerie stradali;
OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) si occupa di aiutare, attraverso l'analisi e l'elaborazione dei dati che possiede, i governi dei paesi membri a favorire lo sviluppo economico, la stabilità finanziaria e la riduzione della povertà

- eventi di detonazione e deflagrazione
- eventi di rilascio di sostanze tossiche e nocive.

Di questi, 4 sono assimilabili in un unico evento, appunto l'incendio.

Per questo motivo, all'interno degli obiettivi per la sicurezza il fenomeno incendio riveste un ruolo molto rilevante; il principale problema, è riuscire ad interpretare il comportamento dei fumi ed il propagarsi delle fiamme, in modo da poter intervenire adeguatamente: esistono a tale scopo modelli fluido-dinamici particolarmente articolati che, unitamente allo studio legato alla potenza termica posseduta dai veicoli coinvolti, permettono l'individuazione di una serie di possibili scenari, a cui saranno associate conseguenze diverse.

2.4.1 Principali scenari incidentali che possono verificarsi in una galleria stradale

Gli scenari incidentali che si possono verificare in galleria sono molteplici; come definito nella normativa vigente, eventi considerati critici nell'ambiente confinato delle gallerie sono principalmente collisioni con incendio, sversamento di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e/o nocive ed esplosioni, generalmente derivanti dalle precedenti situazioni.

Le modalità di innesco delle sostanze infiammabili sono molteplici, e principalmente si dividono in incendio, esplosione e dispersione.

Soffermandosi sull'esplosione, si definisce come una *reazione rapida di ossidazione o di decomposizione che produce un aumento della pressione o di entrambe simultaneamente*: è caratterizzata da una velocità di combustione molto elevata, che assume appunto un carattere esplosivo; si diversifica in deflagrazione (esplosione che si propaga a velocità subsonica, cioè qualche centinaio di m/s) e detonazione (esplosione che si propaga a velocità supersonica, cioè qualche migliaio di m/s).

Nel seguito del paragrafo si definiscono 4 particolari fenomeni tipici dell'ambiente galleria.

– TORCH FIRE

Questo fenomeno è identificabile con un getto libero di gas, e si verifica generalmente durante il rilascio in atmosfera di gas liquefatti infiammabili, inizialmente contenuti in un'autobotte che è stata perforata: se questo flusso viene acceso si genera un fiamma chiamata, appunto, *torch fire*.

– POOL FIRE

Generalmente, le fiamme prodotte da un incendio vengono classificate in base al loro comportamento, facendo una distinzione tra laminari e turbolente, o in base al tipo di combustione, definendole “di pre-miscelazione” o “di diffusione”.

Il “*pool fire*” identifica incendi di pozze liquide, ed è un fenomeno caratterizzato da fiamme di diffusione corrispondenti alle zone di miscela turbolenta.

– BLEVE

BLEVE è l’acronimo di “*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*” e rappresenta, quindi, un’esplosione fisica: tale fenomeno non può essere trascurato vista l’importanza delle sue conseguenze.

Originariamente indicava una rottura importante di un’autobotte contenente un liquido ad una temperatura elevata, in particolare superiore al suo punto di ebollizione a pressione atmosferica.

Se l’autobotte presenta una grossa rottura, l’improvvisa liberazione produce una vaporizzazione estremamente veloce (una fiammata) di una frazione del liquido immagazzinato. L’energia proveniente dalla rapida espansione disperde l’aerosol/liquido, spinge in tutte le direzioni i frammenti del serbatoio e crea un’onda di pressione. Inoltre, se il liquido è infiammabile, si crea, quasi immediatamente, una miscela composta da gas infiammabile ed aria che può prendere fuoco. In questo caso, le fiamme coprono inizialmente il terreno e poi aumentano formando una cosiddetta “*fireball*” (ovvero l’incendio della miscela creata), che ovviamente genera radiazioni termiche.

Gli effetti principali del BLEVE sono dovuti comunque ad una rottura di tipo duttile dell’involucro a seguito di un incendio circostante.

– VCE

VCE (“*Vapour Cloud Explosion*”) rappresenta un’esplosione di una nube contenente una miscela infiammabile di gas/vapore ed aria.

Lo sviluppo di un VCE richiede che i vapori dei prodotti infiammabili si mescolino con l’aria in modo da formare una miscela in un volume sufficientemente elevato.

Gli effetti del VCE sono principalmente di tipo meccanico e di riscaldamento: per quanto riguarda i primi si tratta di onde di pressione prodotte dalle esplosioni; i secondi sono principalmente i prodotti dalle fiamme, sempre derivanti dalle esplosioni (generalmente nel caso di un VCE la fiamma è molto breve e solo alcuni materiali subiscono tale effetto essendo

direttamente a contatto con i gas dell'esplosione).

Fattore comune di questi particolari eventi, è sempre l'incendio; nei paragrafi successivi si analizza l'evoluzione di tale fenomeno e se ne definiscono le possibili conseguenze.

2.4.2 Cause d'incendio in galleria

L'incendio di un autoveicolo può svilupparsi:

- quale evento originario, causato da malfunzionamento meccanico o guasto elettrico al veicolo
- quale evoluzione dello scenario incidentale tipico stradale, e quindi in seguito a collisione di veicoli

In genere la maggior parte degli incendi di veicoli stradali sono causati da malfunzionamenti elettrici o meccanici; una quota inferiore al 10% degli incendi si sviluppano a seguito di incidente stradale.

Da analisi dell'incidentalità sulla rete di Autostrade per l'Italia nel periodo 2001-2005 si evince che circa il 7% degli incendi in galleria (3 su 42) si è sviluppato in seguito a collisione tra veicoli; studi meno recenti posizionano questa percentuale fra il 5 e il 10% sul totale di eventi cui fa seguito l'incendio, come visibile nella tabella sotto riportata.

Cause della fermata	Frequenza %
Guasto meccanico	60
Perdita di oggetti	15
Mancanza di carburante	3.5
Foratura di pneumatici	2.5
Urto contro marciapiedi/pareti	2.5
Urto tra veicoli	1.5
Urto tra veicoli con incendio	1
Incendio per perdita di carburante	1

Tabella 2: Motivo di fermate in galleria (XVIII World Road Congress, dati aggiornati al 1987)

2.4.3 Evoluzione dell'incendio

L'incendio è un fenomeno di combustione particolarmente complesso, che si sviluppa nel tempo aumentando potenza e temperature ad esso associate, fino ad estinguersi.

Si analizza ora il fenomeno studiando le caratteristiche delle diverse fasi in cui si articola, con particolare attenzione all'ambiente galleria.

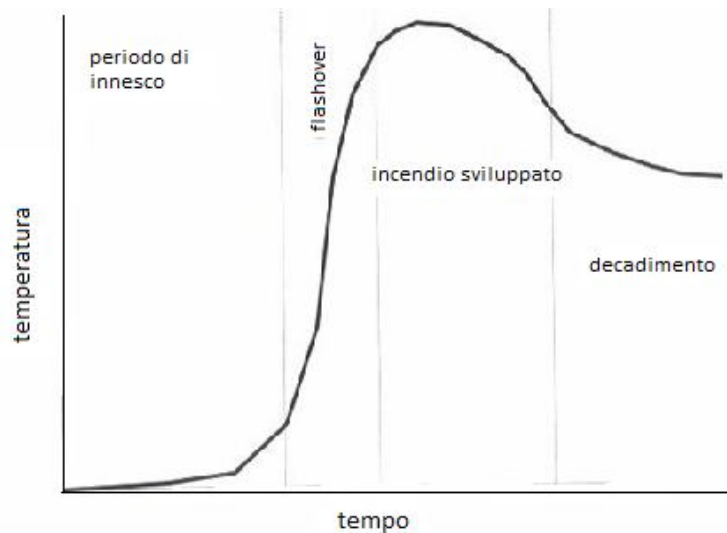


Grafico 4: Andamento della temperatura durante l'evoluzione di un incendio

La forma dell'andamento mostrato nel grafico rimane uguale al variare della potenza globale associata all'incendio.

Come visibile dal grafico sopra, è possibile distinguere 4 fasi comuni ad ogni incendio:

1) Fase di innesco

Questa prima fase è caratterizzata dall'insorgere della fiamma a causa di una sorgente di calore, con un aumento relativamente basso della temperatura media. L'innesco corrisponde ad un regime particolarmente instabile: la temperatura media cresce rapidamente mentre il campo termico tende ad omogeneizzarsi.

La fase di innesco si può suddividere in due sotto-fasi:

Avvio della agnizione

Evento in cui un oggetto di natura combustibile viene posto a contatto con una sorgente di calore, anche di modesta entità.

Propagazione

Stadio in cui vengono coinvolti altri oggetti combustibili, quali per esempio i rivestimenti di

un veicolo, e l'incendio, in funzione delle caratteristiche di infiammabilità dei materiali, progredisce.

La combustione continua ad una velocità sempre maggiore e si ha una progressiva crescita della temperatura ambiente, che influenza il tasso di crescita della combustione stessa.

Se la ventilazione non risulta sufficiente, la quantità disponibile di ossigeno si riduce, determinando l'instaurarsi di una combustione incompleta, caratterizzata da una diminuzione di temperatura.

2) Fase di Flashover

Convenzionalmente questa fase è suddivisa in due momenti successivi: la fase di pre-flashover e la fase di flashover propriamente detto.

Fase di pre-flashover

L'incendio si propaga inizialmente ad un oggetto adiacente e le fiamme raggiungono le pareti della galleria dove si accumulano i gas caldi. Si ha un aumento di temperatura sempre più rapido, senza però il raggiungimento di valori tali da determinare l'ignizione spontanea delle superfici combustibili. Con una adeguata ventilazione, l'incendio prosegue da oggetto a oggetto, mentre le fiamme e i gas caldi irradiano energia termica in tutte le direzioni.

Fase di flashover propriamente detto

A seguito della fase di pre-flashover, si registra una rapida propagazione dell'incendio: la temperatura media supera i 500°C e si ha l'accensione di gran parte del materiale combustibile; si sviluppano inoltre grandi quantità di gas di combustione che fuoriescono dal veicolo in fiamme.

Tutto il materiale combustibile viene coinvolto nell'incendio, e la maggior parte dei materiali combustibili esposti emettono gas infiammabili. L'incendio si sviluppa con pieno vigore, e le temperature crescono molto rapidamente.

Lo stadio descritto rappresenta uno stato irreversibile al di là del quale vi è scarsa probabilità che l'incendio si spenga da solo prima che il combustibile sia del tutto consumato.

3) Fase di incendio sviluppato

La distribuzione di temperatura nell'area interessata all'evento non è uniforme: nella parte superiore della galleria si raggiungono generalmente temperature superiori a quelle registrabili al piano stradale e nelle porzioni inferiori delle pareti della galleria, anche se le differenze di temperatura non sono eccessive.

Come mostrato in figura, in questa fase si ha una diminuzione della temperatura, a seconda

delle caratteristiche dell'incendio, degli impianti presenti e dei veicoli, in cui si passa dalla temperatura massima sviluppata durante la fase di flashover alla fase finale di estinzione.

4) Fase di estinzione o di decadimento

La diminuzione di temperatura può avvenire in seguito ad un proficuo intervento di estinzione realizzato per azione di raffreddamento, per soffocamento, per allontanamento delle materie combustibile non ancora coinvolte nell'incendio, oppure essere semplicemente determinata dall'esaurimento del combustibile.

In questa fase si registra il raffreddamento delle strutture, che ritornano alle condizioni di resistenza iniziali, salvo una percentuale di materiale danneggiato irrimediabilmente nel corso del riscaldamento alle alte temperature, che potrà solo parzialmente o per nulla collaborare alla resistenza complessiva della struttura.

Ulteriori lesioni e distacchi nelle strutture sono provocati dai bruschi raffreddamenti per rapida immissione di aria fredda o per l'azione violenta di sottrazione di calore dei getti d'acqua, principalmente per le repentine variazioni di dilatazione dei materiali.

2.4.3.1 Il tasso di rilascio termico: la grandezza HRR

Ai fini della previsione dell'evoluzione di un incendio in un ambiente, il dato di maggiore interesse è dato dalla potenza termica rilasciata dal materiale durante l'incendio.

L'insieme dei dati che definiscono per un dato materiale il rilascio di calore nel tempo è riassumibile nelle curve di rilascio termico: l'informazione principale derivabile da tali curve risulta il tasso di rilascio termico noto a livello internazionale come HRR (Heat Release Rate).⁸ Anche se il valore dell'HRR varia continuamente nel tempo durante l'evoluzione di un incendio, in cui si ha una diminuzione della quantità di ossigeno presente, generalmente ogni incendio è caratterizzato da un valore di riferimento di HRR.

Si riportano a titolo di esempio i valori di riferimento indicati in letteratura per alcuni tipi di veicoli⁹ (elenco aggiornato al 2003).

⁸ HRR indica l'energia termica emessa da un incendio per unità di tempo; il valore effettivo di tale indice può essere determinato dalla teoria o attraverso specifiche prove

⁹ Si sottolinea che alla luce di quanto osservato negli eventi degli ultimi anni i valori presentati sembrano notevolmente bassi

Tipo di veicolo	PIARC	Norme Francesi	NFPA
1 piccola automobile	2,5 MW	2,5 MW	-
1 grande automobile	5 MW	5 MW	5 MW
Da 2 a 3 automobili	8 MW	8 MW	-
1 furgone	15 MW	15 MW	-
1 bus	20 MW	20 MW	20 MW
1 HGV	20 : 30 MW	20 : 30 MW	-
1 autocisterna	100 MW	100 MW	100 MW

Tabella 3: Valori di progetto per HRR nella valutazione di incendi nei tunnel secondo differenti normative¹⁰

2.4.4 Prodotti della combustione

Durante lo sviluppo ed evoluzione dell'incendio, si generano una serie di sostanze che peggiorano progressivamente le condizioni di vivibilità nell'ambiente, in particolare se confinato. Tali elementi sono definiti prodotti della combustione, e possono essere suddivisi in: gas di combustione, calore, fiamme e fumo.

2.4.4.1 Gas di combustione

Per definizione, i gas di combustione includono tutti quei prodotti della combustione che restano allo stato gassoso anche quando vengono raffreddati alla temperatura ambiente (15°C). La maggior parte dei combustibili contengono carbonio che bruciando forma anidride carbonica quando è presente ossigeno in abbondanza; quando invece l'ossigeno è scarso si forma principalmente ossido di carbonio.

Gli altri gas che si formano in un incendio dipendono da una serie di fattori quali la quantità di ossigeno disponibile, la temperatura raggiunta durante l'incendio e la composizione chimica dei combustibili.

Tra i gas di combustione si possono incontrare, oltre a quelli già citati:

- l'idrogeno solforato, si sviluppa in tutti gli incendi in cui bruciano materiali contenenti zolfo, come ad esempio lana, gomma e pelli
- l'anidride solforosa, si può formare nella combustione di materiali che contengono zolfo, quando questa avviene con abbondanza di aria

¹⁰ HGV corrisponde a Heavy Goods Vehicle, e indica mezzi pesanti per il trasporto di beni civili

- l'acido cianidrico, gas altamente tossico, che in genere si forma solo in modeste quantità negli incendi ordinari; se ne trova nelle combustioni incomplete della lana, della seta, di resine acriliche e poliammidiche
- l'acido cloridrico, prodotto dalla combustione di tutti quei materiali che contengono cloro
- ammoniaca, si forma nella combustione di materiali che contengono azoto (lana, seta, acrilici).

2.4.4.2 Calore e temperatura

Energia che si sviluppa durante combustione. In genere è fissata una temperatura limite di sopportabilità per l'uomo di 150°C, per un tempo limitato inferiore ai 5 minuti e con aria sufficientemente secca; negli incendi purtroppo sono presenti notevoli quantità di vapore acqueo, che abbassano sensibilmente la massima temperatura sopportabile.

2.4.4.3 Fiamme

Fra i sottoprodotti della combustione si hanno calore e luce (fiamme); negli incendi di combustibili gassosi è possibile valutare approssimativamente la temperatura di combustione dal colore della fiamma.

Colore della fiamma		Temperatura (°C)
Rosso nascente		525
Rosso scuro		700
Rosso ciliegia		900
Giallo scuro		1100
Giallo chiaro		1200
Bianco		1300
Bianco abbagliante		1500

Figura 10: Scala cromatica delle temperature nella combustione dei gas

2.4.4.4 Fumo

E' costituito da piccolissime particelle solide, quali catrami, particelle di carbonio ed altre sostanze incombuste presenti in particolare quando la combustione avviene in mancanza di ossigeno, liquide, nebbie o vapori.

Durante un incendio si ha sviluppo di notevolissime quantità di fumo, ed è da ritenere che nella stragrande maggioranza dei casi questo invada gli ambienti delle strutture in fiamme in tempi molto rapidi, rendendo impossibile la presenza dell'uomo molto prima che si raggiunga

la temperatura di 150°C¹¹.

I colori del fumo

Il colore del fumo è variabile in funzione del materiale soggetto a combustione: questo può facilitare il riconoscimento del combustibile, e quindi l'approccio da utilizzare per domare l'incendio.

Colore del fumo	Combustibile
Bianco	Fosforo, Paglia
Giallo/Marrone	Nitrocellulosa, Polvere da sparo, Zolfo, Ac. Solf.
Grigio/Marrone	Carta, Legno, Staffa
Marrone	Olio da cucina
Marrone/Nero	Nafta, Diluente per vernici
Nero	Catrame, Plastica, Benzina, Lubrificante
Viola	Iodio

Figura 11: Variazione del colore del fumo al variare del combustibile¹²

2.4.5 Effetti sul corpo umano

Durante un incendio, il calore e i prodotti della combustione possono produrre danni elevati alle persone coinvolte nello scenario.

L'evoluzione dell'incendio e dei prodotti sopra citati, definisce l'evoluzione delle condizioni ambientali all'interno del tunnel, in particolare visibilità, temperatura e tossicità, il cui peggioramento tende ad ostacolare il processo di evacuazione delle persone.

La riduzione di visibilità, causata dalla presenza di fumo, induce un individuo a procedere più lentamente rispetto alle proprie potenzialità; il fumo ha anche un effetto irritante.

¹¹ La temperatura di 150°C risulta la temperatura massima a cui si può ancora respirare per poco tempo

¹² Tabella usata dai vigili del fuoco per definire le modalità di intervento a seconda del combustibile identificato

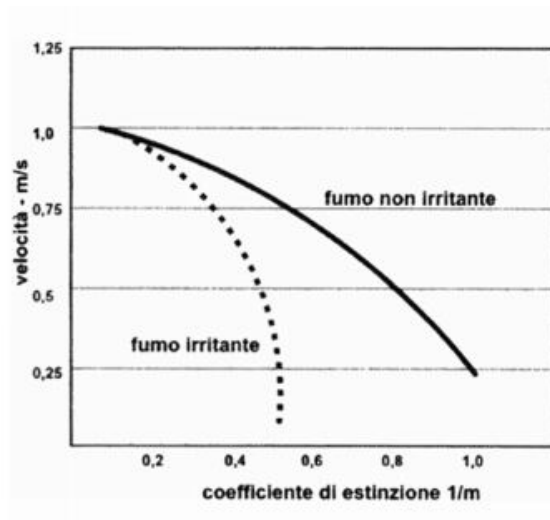


Grafico 5: Rapporto tra velocità di esodo e densità del fumo

Il calore può causare disidratazione, difficoltà respiratorie (fino al blocco totale) e scottature. Per una persona in fuga da un incendio, la sorgente di calore verso cui proteggersi sono i gas caldi: lo scambio termico tra aria calda e pelle dipende dalla ventilazione, dall'umidità, dalla resistenza termica dei vestiti indossati e dalla temperatura dell'aria. L'aria secca è abbastanza tollerabile dal corpo umano, ma se ha alti livelli di umidità non solo si riduce lo scambio termico attraverso il sudore, ma cresce il calore trasmesso alla pelle ed esiste il rischio di incapacitazione per ipotermia¹³.

Le scottature avvengono quando alla profondità di 0,1 mm della pelle si raggiungono i 44,8°C; la sensazione di dolore che si accompagna è presto seguita da un'ustione, che causa problemi a seconda della sua gravità.

I danni all'apparato respiratorio sono sempre accompagnati da ustioni al viso, e dipendono dal tasso di umidità dell'aria inalata.

Il seguente grafico mostra, per differenti livelli costanti di radiazione termica, il tempo in corrispondenza del quale una persona potrebbe cominciare ad avvertire dolore (P è un coefficiente di sicurezza che tiene conto delle diverse modalità di vestizione¹⁴).

¹³ L'umidità è quindi un fattore da non trascurare: temperature di 60°C accompagnate da un tasso di umidità del 100% sono le condizioni limite di aria che può essere respirata

¹⁴ P=1 corrisponde alla pelle nuda, P=26 corrisponde a vestiti con caratteristiche di resistenza al fuoco

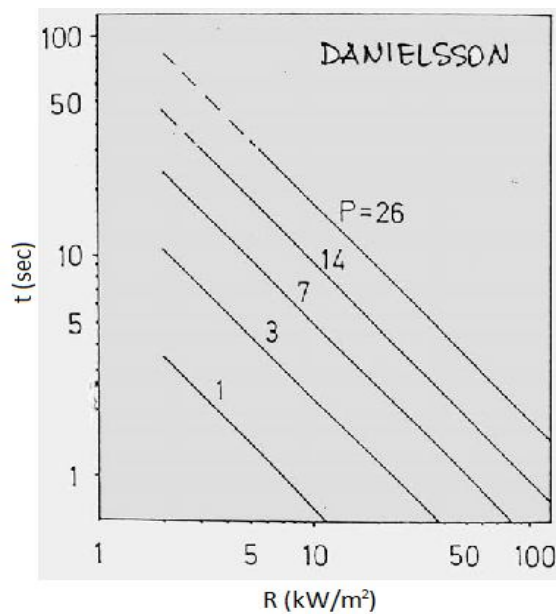


Grafico 6: Rappresentazione della variabilità del tempo in corrispondenza del quale un soggetto potrebbe iniziare ad avvertire dolore al variare della radiazione termica a cui è esposto (Mazziotti, 2002)

Risulta opinione comune che durante un incendio la morte delle persone coinvolte sopraggiunga per esposizione al calore delle fiamme. Contrariamente a questa convinzione, l'esperienza insegna che la maggior parte delle vittime in realtà muore per asfissia o intossicazione, per effetto dei gas di combustione, molto prima di essere esposto alle fiamme. Per quanto riguarda i prodotti tossici, il grado di tossicità viene determinato da fattori come la concentrazione di tali prodotti in alcuni organi del corpo ed il periodo di tempo per cui si è esposti a tale concentrazione. Per i prodotti asfissianti, il principale criterio è la concentrazione nel sangue, per i prodotti irritanti invece il fattore più importante è la concentrazione nella cavità nasale, gola o polmoni.

Per ciascuna sostanza esiste una concentrazione di soglia: per definirla si ipotizza che al di sotto di tale concentrazione non si manifestano effetti dannosi, superandola si manifestano invece danni alla salute dell'individuo.

Particolare importanza riveste tra le conseguenze dannose dei prodotti di combustione sull'uomo la perdita di conoscenza, che riduce la capacità di un individuo di far fronte al pericolo e può condurlo al decesso. L'incoscienza può essere provocata sia dalla permanenza del soggetto in ambienti con ridotta concentrazione di ossigeno, che dalla presenza di gas, quali il CO, l'HNC, la CO₂. L'effetto tossico dell'ossido di carbonio è principalmente causato dalla reazione con l'emoglobina (Hb) del sangue: legandosi formano la carbossiemoglobina (COHb), la quale riduce drasticamente la capacità del sangue di trasportare ossigeno.

COHb nel sangue	Effetti
15%	emicrania e nausea
20% - 30%	emicrania, nausea e destrezza manuale anormale
30% - 40%	nausea, vomito e perdita di conoscenza
40% - 50%	nausea, vomito, stordimento, collasso al minimo sforzo
50% - 60%	Coma
Oltre 60%	morte

Tabella 4: Effetti della concentrazione di COHb nel sangue dell'uomo(Rotini, 2012)

Il monossido di carbonio sviluppato in un incendio è la principale causa di morte, in quanto causa confusione ostacolando la fuga. In figura 19 è riportato il tempo necessario per la perdita di conoscenza di un uomo di 70 kg esposto a diversi livelli di concentrazione di COHb limite per 3 diverse attività.

- A : seduto a riposo
- B : lavoro leggero – camminata
- C : lavoro pesante – corsa lenta

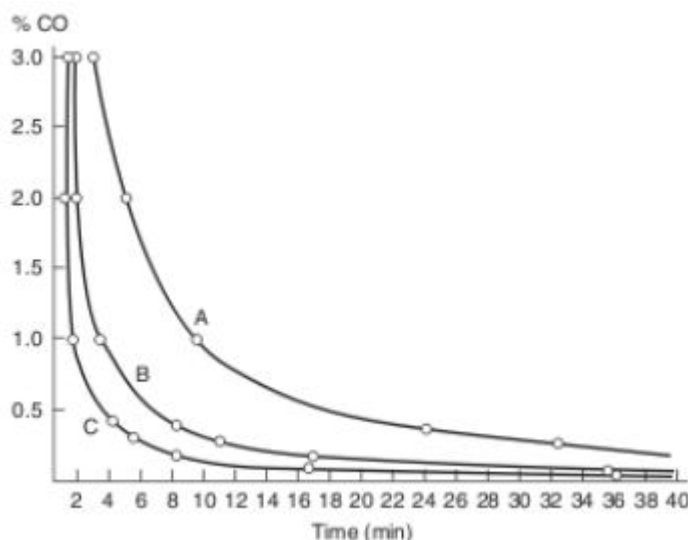


Grafico 7: Tempo di incapacità da monossido di carbonio, per uomo di 70 kg a diversi livelli di attività

Un'altra sostanza che si forma in grande quantità durante la combustione di sostanze che contengono carbonio è l'anidride carbonica (CO₂), gas asfissiante.

L'acido cianidrico (HCN) impedisce l'utilizzo dell'ossigeno da parte delle cellule ed ha una tossicità pari circa a venti volte a quella del CO.

Gli effetti di queste sostanze tossiche possono tra loro sommarsi, aumentando il pericolo a cui risultano esposti gli individui presenti.

L'incapacità psico-fisica di un individuo può subentrare quando la concentrazione di ossigeno nell'aria scende al di sotto dell'8-12%, oppure per una concentrazione volumetrica di CO nell'atmosfera pari a 0,015-0,04%.

Un altro effetto arrecato da alcuni prodotti della combustione è quello irritante. Gas quali l'acido cloridrico (HCl), l'idrogeno solfato (HF), l'aldeide acrilica derivante dalla combustione del legno ed altri possono essere dannosi alle vie respiratorie e agli occhi, anche se non risultano fatali durante l'inalazione. Tuttavia possono arrecare danni agli organi che si manifestano in una fase successiva, e possono risultare pericolosi e addirittura mortali.

2.4.5.1 Criteri di sopravvivenza

I parametri di sopravvivenza sono rappresentativi delle condizioni di vivibilità all'interno della galleria, in particolare lungo i percorsi di esodo.

Gli andamenti nel tempo dei valori dei parametri di rischio costituiscono la base dei dati utilizzata per l'applicazione dei modelli di esodo; gli effetti sulla salute sono determinati in base ai valori assunti dai parametri di rischio lungo la galleria ed al tempo di esposizione dei soggetti ai diversi elementi di rischio. Gli effetti sono funzione del prodotto delle concentrazioni di ciascun parametro di rischio pesato con il tempo di esposizione e normalizzato rispetto ad un valore limite costituente il parametro di riferimento per il calcolo del tempo disponibile per l'esodo.

Risulta fondamentale il concetto di dose frazionale inabilitante (FED, Fractional Effective Dose), intesa come la quantità di sostanza inabilitante assorbita dall'uomo o con cui viene a contatto; tali dosi sono classificate¹⁵ come indicatori di rischio chimico e termico[2].

L'ipotesi NFPA (National Fire Protection Association) circa il modello delle dosi frazionarie prevede di valutare il condizionamento all'autosoccorso al raggiungimento della dose frazionaria pari a 0,3 e il raggiungimento dell'impossibilità all'autosoccorso per una dose pari a 1, secondo le caratteristiche riportate nei seguenti grafici[29]:

¹⁵ Secondo la norma ISO 13571, Life threat of fires – Guidance on the estimation of time available for escape using fire data

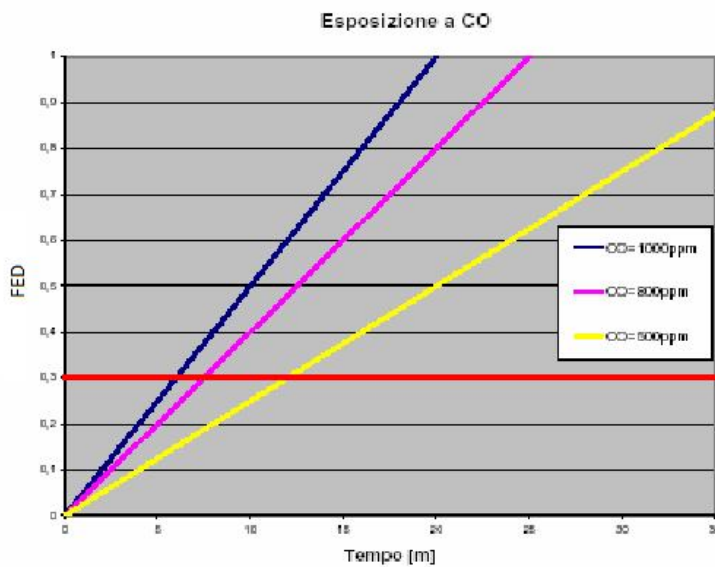


Grafico 8: Relazione FED – tempo di esposizione al variare della concentrazione di monossido di carbonio

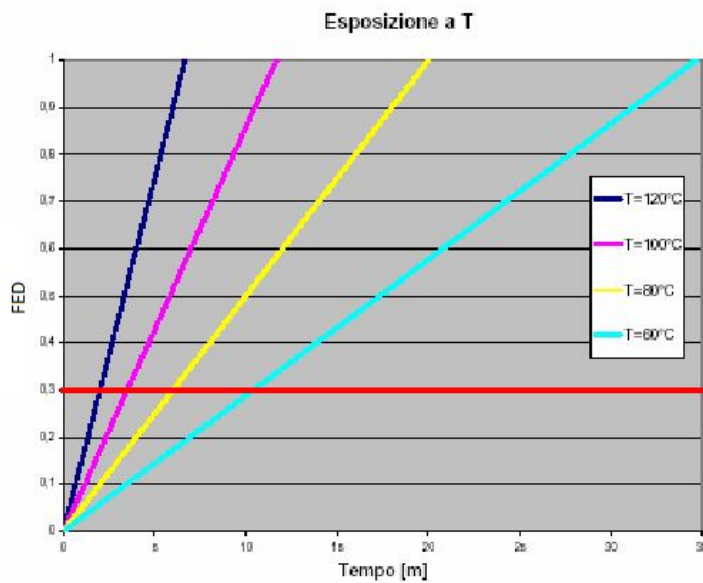


Grafico 9: Relazione FED – tempo di esposizione a temperature a severità variabile

Si può facilmente dedurre quanto il tempo sia determinante nella definizione del numero di vittime in un evento incidentale.

2.4.5.2 Effetto della stratificazione dei fumi

Una stratificazione stabile in volta mantiene, per un certo intervallo di tempo, la zona sottostante con aria respirabile, circostanza molto importante per gli utenti esposti; l'entità e la direzione della velocità prodotta dai sistemi di ventilazione diversi può avere effetti differenti

sulla circolazione del fumo.

Per determinare l'andamento dei fumi all'interno di una galleria, è necessario conoscerne la velocità di propagazione; all'interno di un ambiente chiuso come una galleria stradale, il movimento dei fumi (stratificato o meno) viene determinato confrontando la velocità dell'aria all'interno del tunnel con una velocità critica U_c .

La velocità critica corrisponde alla velocità a partire dalla quale, nel caso di un'aspirazione dei fumi longitudinale, questi siano respinti su un lato solo, nel senso della corrente d'aria, senza alcun rischio di risalita dei fumi controcorrente (effetto backlayering).

La velocità critica dipende principalmente dalla potenza termica dell'incendio e dalla pendenza e sezione della galleria. La determinazione di questo parametro avviene a partire da formule empiriche.

Si possono considerare a titolo esemplificativo tre probabili soluzioni: la prima prevede che la galleria sia totalmente sgombra di fumo, e si verifica in genere se sono previsti sistemi di estrazione dei fumi; la galleria può contenere strati di fumo sovrapposti in entrambi le direzioni, oppure i fumi possono essere completamente mescolati su tutta l'altezza del tunnel.

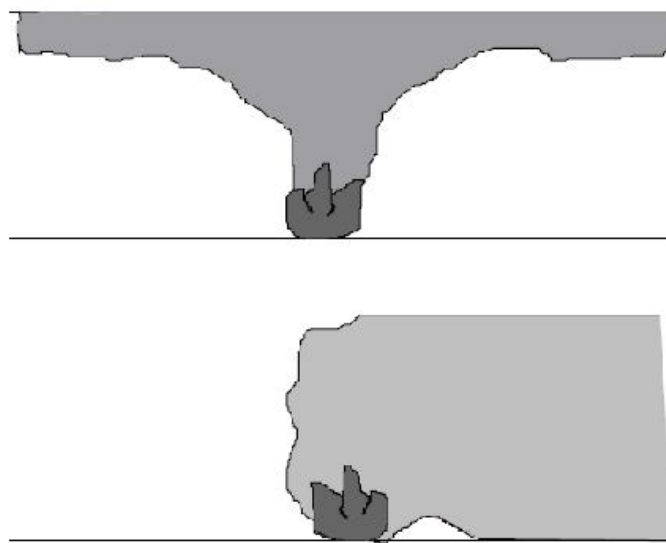


Figura 12: Due diversi regimi di fumo riscontrabili: nel primo caso i fumi salgono verso l'alto mentre nel secondo sono completamente mescolati all'aria su tutta l'altezza del tunnel¹⁶

Per determinare l'andamento dei fumi all'interno di una galleria, è necessario dunque conoscere la velocità di propagazione degli stessi: a seconda che essa sia maggiore, minore o uguale alla velocità critica precedentemente citata, si avrà un certo regime di distribuzione

¹⁶ Il primo caso si verifica se la velocità dei fumi supera la velocità critica, mentre se avviene il contrario si avrà una miscelazione di aria e fumi su tutta l'altezza del tunnel

fumi.

I regimi di fumo sono particolarmente importanti in quanto legati sia alla visibilità, che alla tossicità e all'andamento delle temperature.

Per quanto riguarda gli effetti tossici, si suppone che la concentrazione dei prodotti derivanti dalla combustione sia uniforme su tutta la profondità dello strato di fumo, nel caso di regime stratificato, e su tutta l'altezza della galleria nel caso di regime completamente miscelato. Al di sotto dello strato di gas la concentrazione è prevista nulla.

Pertanto, i suoi effetti sono significativi solo quando il fumo si è completamente mescolato lungo tutta l'altezza del tunnel.

Si ipotizza poi che la visibilità sia perfetta al di sotto dello strato di fumo.

2.4.6 Comportamento umano nell'incendio

Le analisi sin qui fatte sull'evoluzione delle condizioni di un incendio, ed in particolare dei prodotti che hanno effetti negativi sulla salute dell'uomo, definiscono l'esigenza di caratterizzare il comportamento di un soggetto esposto all'evento, fondamentale per definirne le modalità di allontanamento.

Nello studio del comportamento umano in caso di incendio si riscontrano difficoltà non facilmente superabili, poiché molte delle situazioni di cui sarebbe importante conoscere i dati non sono simulabili in laboratorio. Inoltre, l'attendibilità delle informazioni ottenute a seguito di esercitazioni può essere considerata solo parziale, in quanto mancano l'effetto sorpresa, l'ansia, lo stress e la possibilità di panico che possono manifestarsi nelle situazioni reali. La difficoltà di previsione aumenta inoltre a causa della complessità del comportamento umano.

L'evacuazione di un ambiente interessato da incendio ha inizio quando le persone divengono consapevoli dell'esistenza di una situazione di emergenza e mettono in atto una serie di processi mentali ed azioni al fine di raggiungere un luogo sicuro.

Gli indizi iniziali possono essere legati alla percezione diretta dell'incendio oppure essere indiretti, risultanti da elementi quali la comunicazione con altri soggetti o l'attivazione di segnali di allarme. Una volta ricevuti questi indizi, l'evacuante inizierà un processo di validazione degli stessi, che proseguirà anche durante la fuga.

Quando la persona avrà raggiunto una via di fuga, sarà passato un certo intervallo di tempo: nella letteratura tecnica internazionale viene definito RSET (Required Safety Egress Time). Il tempo massimo consentito dall'incendio per garantire condizioni di sopravvivenza è invece conosciuto come ASET (Available Safety Egress Time): per garantire la salvabilità di un

utente il primo dovrà necessariamente essere inferiore del secondo.

Il tempo RSET risulta fondamentalmente legato alle caratteristiche di reazione delle persone all'incendio, mentre il tempo massimo disponibile necessita della valutazione delle condizioni ambientali e dei materiali in relazione ai prodotti della combustione derivanti dall'incendio (fumi, specie tossiche ed irritanti, calore).

2.4.6.1 Interazione uomo - ambiente

La medesima situazione può assumere caratteri completamente differenti a seconda ad esempio dai soggetti costituenti la folla, giovani o anziani. Altri fattori comportamentali¹⁷, come anche i diversi livelli di percezione del pericolo, contribuiscono a definire un'ampia diversità di azioni.

Il comportamento delle persone in caso di incendio, è legato quindi a numerosi fattori, tra cui il più importante risulta essere l'informazione: più questa sarà chiara ed esplicita, più i soggetti avranno un comportamento coerente con le esigenze di sicurezza.

La percezione è basata su fattori fisici e sociali: la parte inerente ai fattori fisici riguarda proprio l'informazione che giunge all'individuo; la parte sociale riguarda invece l'interazione con altri soggetti.

Per dimostrare l'importanza dell'informazione, si può pensare ad esempio all'incendio dell'aeroporto di Dusseldorf (Germania, 1995): qui alcuni visitatori dell'aerostazione rimasero intrappolati nel piano interrato dopo aver scelto di prendere l'ascensore, per l'assenza di indicazioni di pericolo specifiche; la presenza di tali indicazioni avrebbe potuto salvare le vite di questi soggetti.

Un altro fondamentale fattore per la definizione del comportamento di un individuo, è l'interazione delle sue capacità fisiche e cognitive con l'ambiente.

Per dimostrare questa affermazione, basta pensare all'attacco alle Torri Gemelle (New York, USA, 2001): qui persone perfettamente a conoscenza del piano di esodo non riuscirono a fuggire a causa della paura e dello stress.

¹⁷ Ad esempio persone che hanno già avuto esperienze di emergenza generalmente saranno portate a reagire più prontamente di altre

2.4.6.2 Caratteristiche degli occupanti

Per la previsione della risposta in caso di incendio, risultano fondamentali le caratteristiche degli occupanti¹⁸.

Nella valutazione delle caratteristiche di tali soggetti bisogna analizzare le caratteristiche di gruppi specifici¹⁹.

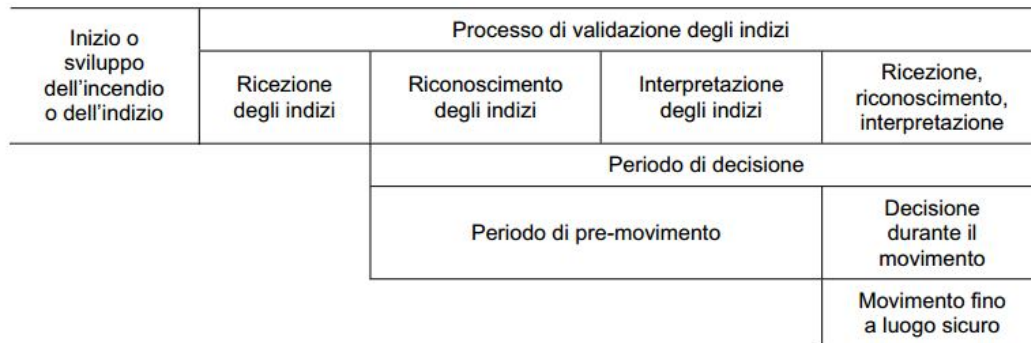


Figura 13: Processo di esodo e processi di decisione e di movimento

Questo tipo di valutazione è basato sulla conoscenza del processo di ricezione, interpretazione e validazione degli indizi.

Gli indizi che possono essere considerati da una persona coinvolta in un incendio all'interno di una struttura sono numerosissimi, ed in particolare sono forniti dai sistemi di rilevazione e di allarme, dalla percezione diretta dei prodotti della combustione, dalla comunicazione da parte di altre persone, fino ad arrivare all'interruzione dei servizi (comunicazione, energia elettrica, etc.). Tutti questi segnali devono essere valutati in relazione alle caratteristiche dei gruppi di persone coinvolti.

Per quanto riguarda il processo di decisione, risulta necessario considerare quali azioni le persone possono adottare dopo aver ricevuto ed interpretato gli indizi provenienti dall'ambiente circostante: la documentazione di eventi avvenuti nel passato dimostra che queste azioni possono ritardare l'inizio del movimento verso un luogo sicuro.

Un ulteriore elemento da valutare riguarda le persone che si trovano solitarie in un ambiente. Solitamente, la presenza di altre persone ha un effetto di inibizione sull'avvio dell'esodo quando gli indizi sono incerti.

Nell'analisi delle caratteristiche di comportamento di ogni individuo i fattori da considerare

¹⁸ Termine che indica, in conformità con i testi normativi e tecnici reperibili, le persone presenti nell'ambiente oggetto di studio

¹⁹ Per esempio la conoscenza dei luoghi, la familiarità con le procedure di emergenza, la capacità e la velocità di reazione possono essere elementi determinanti

riguardano aspetti come l'età, le capacità fisiche e sensoriali, il genere, l'informazione e l'esperienza.

Si riportano in tabella alcune tra le principali caratteristiche degli occupanti che risultano rilevanti nella definizione della velocità di esodo.

Caratteristiche delle persone	Descrizione
da soli o con altri	la presenza di altri individui inibisce l'avvio di azioni particolari quando gli indizi sono incerti, ma garantisce una migliore comunicazione
familiarità con i percorsi	procedure di esodo più rapide sono garantite in caso di conoscenza delle vie di esodo e dei sistemi di allarme
Ubicazione	risulta fondamentale per la definizione del tempo di movimento, e può influenzare la comprensione dell'allarme e della sua ricezione
condizioni delle persone	le condizioni delle persone possono variare durante l'esodo, in relazione all'evoluzione delle condizioni ambientali
Età	la variazione dell'età porta ovviamente ad una variazione delle capacità, ed scomponibile nelle tre categorie della capacità, del processo decisionale e delle azioni: l'aspetto più rilevante nella resistenza all'esposizione ad agenti tossici ed irritanti risulta la variazione delle prestazioni fisiche

Tabella 5: Schematizzazione della risposta umana in relazione alle caratteristiche più significative delle persone coinvolte in un'evacuazione

La risposta agli indizi²⁰

Il processo di risposta agli indizi è composto dalle tre fasi di ricezione (sentire fisicamente), riconoscimento (riconoscere l'indizio come tale) e interpretazione (dare all'indizio il suo significato). Sulla base dell'esperienza di incendi reali, si deve ricordare che le persone iniziano l'esodo solo immediatamente dopo la ricezione dei primi indizi: per l'elaborazione del messaggio ricevuto trascorre quindi una discreta quantità di tempo. Tale periodo è definito nella letteratura tecnica come tempo di validazione dell'indizio.

La ricezione dei segnali di allarme è principalmente legata alle capacità percettive dell'individuo ed alle caratteristiche del segnale. La realizzazione di sistemi di allarme di solito presuppone che gli stessi mettano in grado i presenti di avviare l'esodo di emergenza

²⁰ Per indizi, ai fini della sicurezza antincendio, si intendono i prodotti della combustione, i segnali di allarme, le comunicazioni da parte di altre persone e l'interruzione dei servizi dell'ambiente in cui ci si trova

con un ritardo minimo²¹.

2.4.6.3 Aspetto psicologico dell'evacuazione

Generalmente una persona che deve decidere come evacuare una struttura che ha preso fuoco lo fa sotto stress e in condizione di panico.

Le decisioni prese in circostanze stressanti hanno due principali differenze rispetto alle decisioni prese quotidianamente: la scelta è difficile ed il tempo è limitato. La natura dell'informazione in base alla quale si deve decidere è inoltre incompleta ed eccezionale.

Lo stress causato da un tempo limitato è un fattore estremamente importante durante l'evacuazione, principalmente perché non permette una corretta valutazione delle circostanze. Questo può comportare difficoltà anche rilevanti, per esempio nell'individuazione delle vie d'uscita. Da un altro punto di vista però, gli effetti dello stress sono considerati necessari e positivi, in quanto inducono anche un effetto di iperattività durante una situazione di pericolo.

Lo stress limita la capacità di interpretare le informazioni, ad esempio un evacuante può non accorgersi dei segnali che indicano le uscite di emergenza; ha inizio quando si ricevono informazioni ambigue e persiste finché il soggetto in evacuazione non si è stabilizzato in un luogo sicuro per un tempo discreto.

Secondo la definizione classica di panico, il panico di un individuo è causato da due fattori, e cioè la consapevolezza di essere in immediato pericolo di vita e la convinzione che la possibilità di scampare al pericolo sia sempre minore.

Il panico è considerato un comportamento non razionale, in quanto appare spesso come non desiderabile.

Diversi ricercatori sono tuttavia concordi nell'affermare che le situazioni di panico soltanto raramente hanno un impatto sulle condizioni di esodo in una situazione di incendio; i comportamenti errati sono solitamente alimentati dalla scarsità di informazione, non dal panico.

²¹ I dati sperimentali, quasi senza eccezioni, contraddicono questa assunzione e suggeriscono l'idea che un allarme da solo non avvii l'esodo ma dia inizio alla ricerca di ulteriori indizi, e cioè alla fase di conferma dell'indizio

2.4.7 Test e simulazioni reali nella ricerca scientifica

Nel corso degli anni, l'aumento di sensibilità verso il possibile insorgere di incendi in galleria, ed in particolare l'attenzione a prevederne la probabile evoluzione, ha portato alla ricerca sempre più dettagliata di informazioni riguardanti questo problema. Le migliori fonti di informazioni sullo sviluppo dell'incendio e sul comportamento del fumo sono derivate da un certo numero di prove su grande scala, tra cui vale la pena di menzionare:

- Ofenegg, 1965 (Svizzera)
- Eureka EU 499 “Firetun”, 1991-92 (progetto europeo effettuato in Norvegia)
- Memorial Tunnel, 1993-95 (USA)
- Runehamar, 2003 (Norvegia)

Nel primo test si è analizzato l'evoluzione di un incendio all'interno di una galleria provocato da 4 m³ di benzina, senza l'apporto di un sistema di ventilazione meccanizzato, con lo scopo di simulare l'incendio di due automobili.

Eureka 499 è invece un programma di ricerca che ha coinvolto molti stati europei, con lo scopo di ottenere informazioni sia sullo sviluppo dell'incendio che sulle condizioni di fuga dal tunnel. In questi test si è simulato l'incendio di tre diversi tipi di veicoli: un autobus, una carrozza ferroviaria con la scocca completamente in acciaio e una carrozza ferroviaria con scocca in alluminio; durante i due test sui veicoli ferroviari fu impiegata una ventilazione forzata di circa 0,5 m/s.

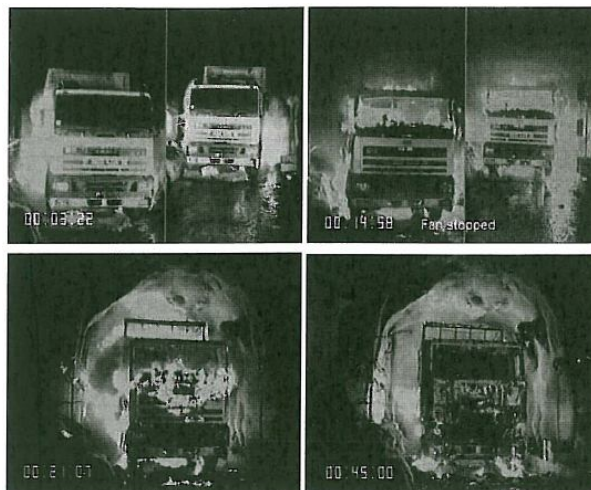


Figura 14: Sviluppo dell'incendio di un veicolo pesante (prove Eureka 499)

Nei test del Memorial Tunnel, la galleria è stata oggetto di del Memorial Tunnel Fire Ventilation Program, programma di test finalizzati ad ottenere un set di dati a supporto delle scelte progettuali e operative riguardanti i sistemi di ventilazione; il test prevedeva l'utilizzo di un sistema di ventilazione meccanizzato basato sull'utilizzo di 24 jetfan dislocati nel tunnel: questi sono rimasti spenti nei primi due minuti di test, e attivati successivamente variando il numero di elementi attivi. Ci si soffermerà in questo paragrafo in particolare sul test 615b, in cui fu utilizzata come sorgente di fuoco una tanica di gasolio posizionata a circa 1 m di altezza dal piano stradale, caratterizzata da una potenza nominale di fuoco di circa 100 MW²². Infine nei test più recenti, svolti nel Runehamar Tunnel norvegese in associazione con il programma di ricerca UPTUN²³, sono state svolte quattro prove in cui furono incendiati pallets in legno e altri materiali: in figura si riporta il set-up del test T2, in cui furono incendiati 220 pallets in legno e 240 materassi in poliuretano.

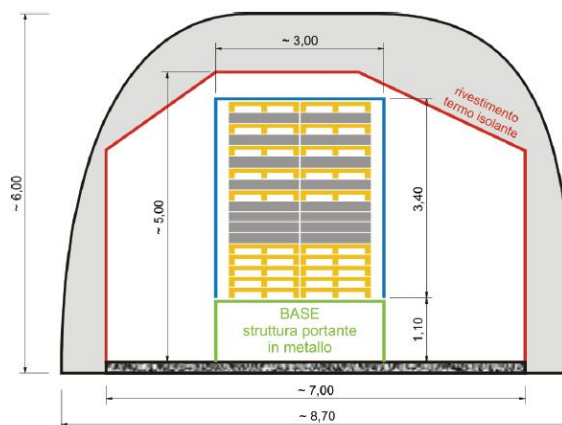


Figura 15: Rappresentazione schematica di uno dei test svolti all'interno del Runehamar Tunnel: sezione trasversale test T2

2.4.7.1 Analisi critica dei risultati ottenuti

Nel seguito del paragrafo sono descritti alcuni dei risultati ottenuti nelle sopra citate prove.

Fumi e visibilità

La propagazione del fumo può essere molto veloce; tale fenomeno viene ben illustrato tramite alcuni risultati della serie di prove del Memorial Tunnel.

²² Questi test furono incentrati particolarmente sullo studio di tre parametri: tasso di rilascio termico HRR, temperatura e visibilità, in diverse posizioni all'interno del tunnel e in diverse situazioni caratterizzanti l'incendio

²³ Cost effective, sustainable and innovative UPgrading methods for fire safety in existing TUNnels

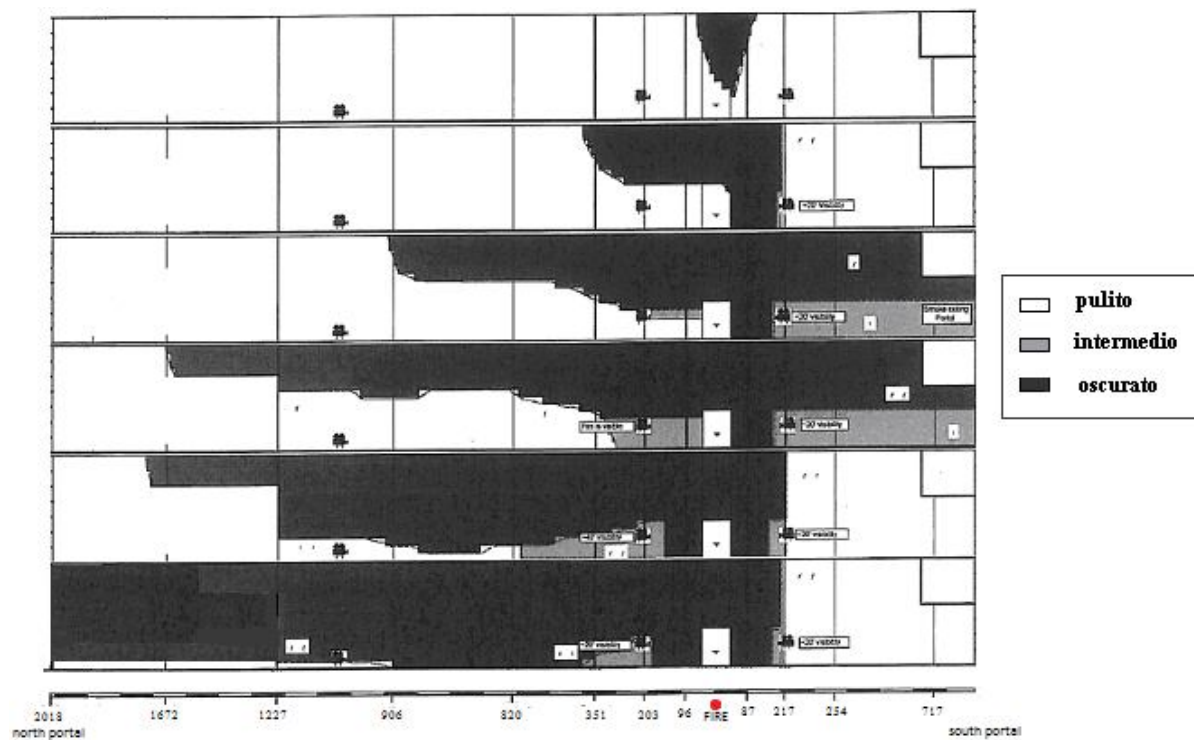


Figura 16: Alcuni risultati ottenuti in una delle prove effettuate nel Memorial Tunnel: propagazione del fumo dopo 0,1,2,3,4,5 minuti dall'accensione (Bettolini, 2003)

Questa prova particolare si riferisce ad un incendio con potenza nominale di 20 MW senza ventilazione meccanizzata²⁴.

Anche a questa intensità di incendio relativamente bassa (senza però l'apporto di un sistema di ventilazione meccanizzato), si nota una rapida propagazione dei fumi, in cui il fumo arriva a riempire praticamente l'intera galleria (lunghezza 854 m) in soli 3-5 minuti con velocità variabile tra i 2,5 e i 3 m/s nel caso di incendio di 20 MW, 4-4,5 m/s nella prova a 50 MW [3].

I risultati dell'Offenegg illustrano l'influenza della velocità longitudinale sulla stratificazione dei fumi²⁵: a velocità longitudinale bassa il livello di visibilità nella parte inferiore del tunnel è ragionevolmente buono fino circa 8-10 minuti su una lunghezza di circa 600-800 m; con una velocità maggiore, di circa 2 m/s (velocità comunque ancora moderata), l'intervallo di tempo utile per la fuga è ancora più corto. Con valori di velocità più elevati, si nota un deterioramento molto più rapido delle condizioni di stratificazione.

²⁴ Furono fatte all'interno di questo tunnel 2 prove, una con potenza nominale di 20 MW e l'altra con potenza maggiore, raggiungente i 50 MW

²⁵ Il problema è trattato nel paragrafo 2.4.5.2, in cui si è illustrato la necessità di confrontare la velocità dei fumi con un valore critico, che definisce il regime di fumi all'interno del tunnel

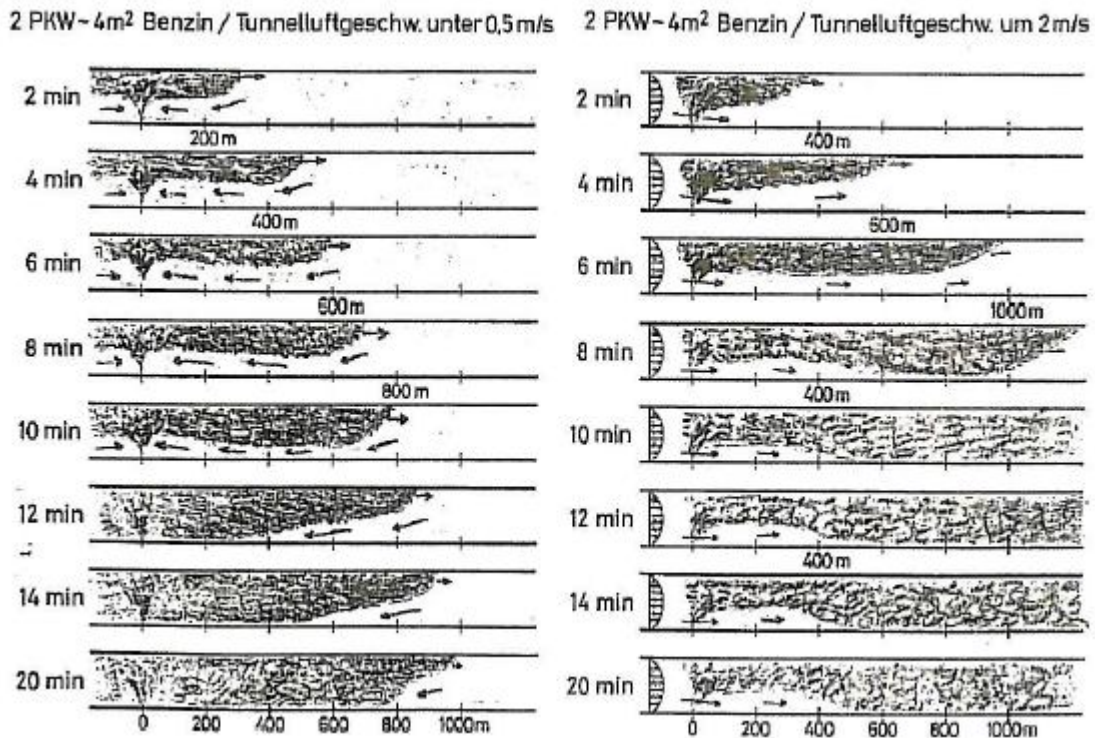


Figura 17: Propagazione e stratificazione dei fumi risultanti da prove Ofenegg: a sinistra velocità molto basse (meno di 0,5 m/s), mentre nella prova riportata a destra le velocità risultano più elevate (circa 2 m/s) (Bettolini, 2003)

Studiando invece i risultati dei test del programma EUREKA 499, e analizzando in particolare i dati a disposizione riguardanti la prova con oggetto l'incendio dell'autobus, si evidenzia che ad una distanza di 100 m dall'incendio i valori di visibilità risultano inferiori ai limiti previsti già dopo 10 minuti²⁶.

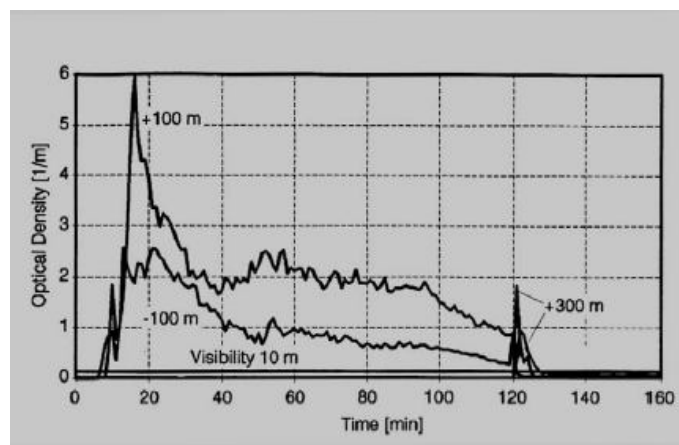


Grafico 10: Andamento della densità ottica durante il test sullo scuolabus del programma di studio EUREKA 499 (EUREKA-PROJECT, EU 499)

²⁶ In questi test si considera un valore limite di visibilità basato sulla densità ottica, e si pone un limite corrispondente ad una visibilità di 10 m

Temperature

come indicato in letteratura, valori indicativi di picchi di temperatura che possono essere previsti per diversi incendi sono dell'ordine di:

- autoveicoli per il trasporto di persone 400°C
- bus/piccolo camion 700 °C
- veicolo pesante 1000°C
- autocisterna 1200-1400 °C

Si mostrano nella figura alcuni dati ricavati nei test svolti nel Memorial Tunnel: in particolare è possibile vedere l'andamento delle temperature in una sezione di rilevamento posta a 29 m dall'incendio²⁷.

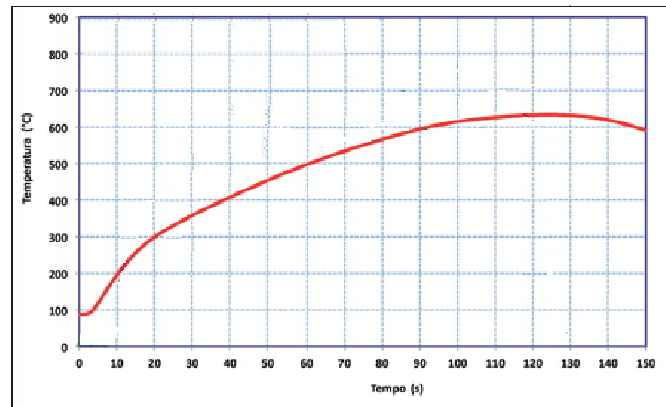


Grafico 11: Andamento della temperatura durante il test 615b nel Memorial Tunnel, a 29 m dall'innesco dell'evento (Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program)

Dal grafico si evince che la temperatura massima viene raggiunta dopo circa due minuti, pari a 620 °C circa; le temperature di vivibilità²⁸ a questa breve distanza vengono raggiunte dopo pochi secondi: si deduce che la rilevazione ha avuto inizio ad incendio già avviato e non dal momento dello scoppio, ma si può comunque notare l'andamento della temperatura nel tempo. Nei test svolti nel Runehamar Tunnel, in particolare nel test T2 sopra descritto (che può essere paragonato all'incendio di un veicolo pesante), è stato raggiunto un valore di HRR di picco

²⁷ Durante questi test sono stati posti dispositivi di rilevamento in tre differenti sezioni di controllo, rispettivamente poste a 29 m, 107 m e 189 m dallo scoppio dell'incendio

²⁸ Come già indicato nel capitolo la normativa di riferimento (DLgs 264/06) indica la temperatura massima sopportabile dall'uomo per pochi minuti pari a 150 °C, in condizioni di aria secca: nella realtà lo sviluppo di vapore acqueo durante l'incendio porta ad una diminuzione di tale temperatura

pari a circa 160 MW²⁹.

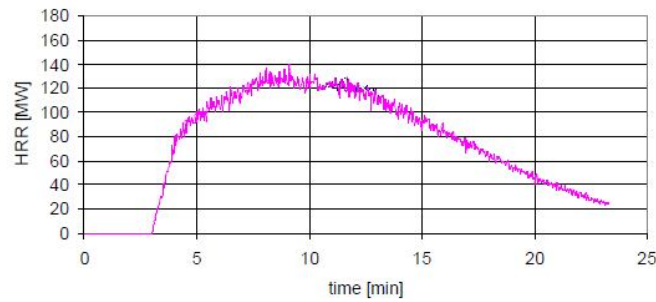


Grafico 12: Test T2, Runehamar Tunnel (2003), andamento del valore HRR

Sono inoltre stati registrati diversi andamenti della temperatura a distanze diverse dalla zona di incendio, il cui andamento è riportato sotto.

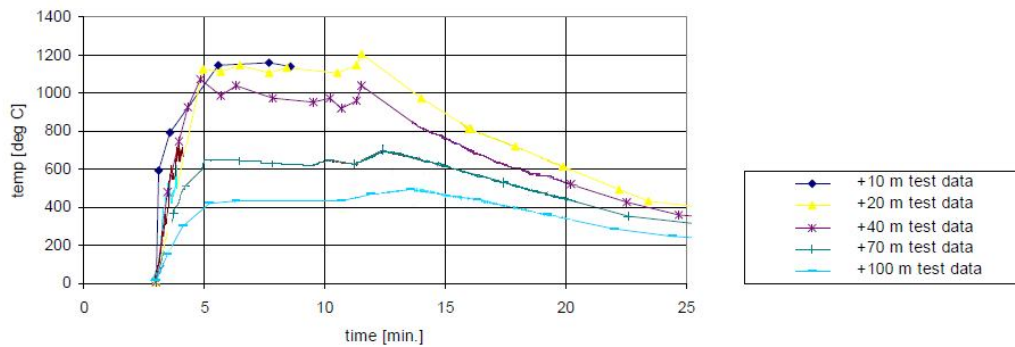


Grafico 13: Test T2, Runehamar Tunnel (2003), andamento della temperatura in diverse sezioni di rilevamento

Il grafico mostra che la temperatura massima di 1200°C è raggiunta a 20 m dall'evento iniziatore, dopo circa 12 minuti; le temperature risultano dopo 25 minuti ovunque inferiori a 400°C.

Dal grafico si evince che la temperatura di 150 °C, indicata dal Dlgs 264/2006 come la massima sopportabile dall'uomo per alcuni minuti, è superata in ognuna delle sezioni di rilevamento già dopo circa 3-4 minuti.

Come già indicato, un incendio con un indice di potenza elevato come in questo test non è nemmeno preso in considerazione delle norme, ma mette in mostra le caratteristiche di sviluppo dell'incendio.

²⁹ Il valore risulta sensibilmente più alto di quello massimo ipotizzato dalla normativa, che non prevede il superamento di 100 MW: come già indicato, i valori raggiunti nella realtà risultano maggiori di quelli previsti dalle norme, sia da PIARC che da NFPA che dalle norme francesi

Si può supporre, soprattutto per quanto riguarda le temperature, che in un evento reale le condizioni siano alquanto differenti dai dati ricavati da questi test, che comunque risultano molto utili per studiare e prevedere l'evoluzione di un possibile incendio all'interno di un tunnel.

In particolare, l'incendio di uno o più veicoli porterebbe molto probabilmente a dei valori di picco simili considerando i soli veicoli coinvolti nell'incendio iniziale, ma la presenza di altri mezzi incolonnati e potenzialmente incendiabili alimenterebbe la combustione: si può ragionevolmente supporre che in una situazione reale l'incendio si prolunghi per più tempo e per delle distanze maggiori.

Distribuzione del monossido di carbonio

Nei test svolti nel programma EUREKA, sono state eseguite anche misure riguardanti la distribuzione dei gas tossici sviluppati durante l'incendio, in particolare del monossido di carbonio.

Tra i tre diversi test eseguiti, si è appurato che il test condotto sullo scuolabus ha prodotto la maggior quantità di CO: dopo circa 20 minuti dallo scoppio dell'incendio, venne registrata una concentrazione di tale elemento nell'aria di circa 0,29 Vol.% molto superiore al limite previsto, pari a 0,05 Vol.%.

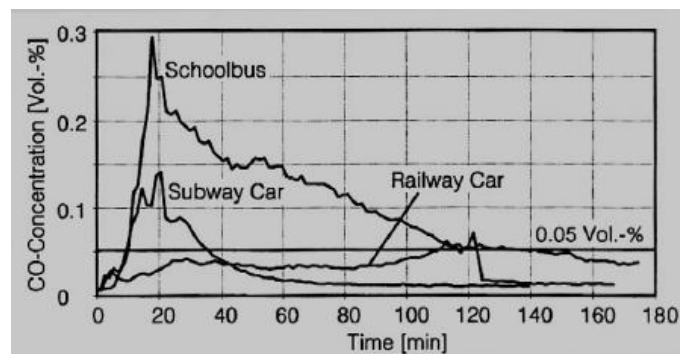


Grafico 14: Concentrazione dell'ossido di carbonio nei tre test del progetto EUREKA 499 (misura eseguita ad una distanza di 30 m dal fuoco) (EUREKA-PROJECT, EU 499)

Si sottolinea che l'utilizzo di un impianto di aspirazione fumi, porterebbe a dei risultati migliori sia in termini di visibilità che di temperatura e concentrazione di inquinanti.

Alla luce delle sperimentazioni esaminate, si può definire che:

- specialmente nelle immediate vicinanze dell'incendio, le alte temperature derivanti dagli incendi di veicoli all'interno di un tunnel rappresentano una minaccia per la vita delle persone;
- la diminuzione della visibilità e la presenza di gas tossici, portano all'insorgere di situazioni pericolose, che possono rilevarsi anche ad elevata distanza dall'incendio;
- al variare dei veicoli coinvolti nell'evento, si ha una diversa evoluzione dell'incendio, sia in termini di densità che di durata.

Come evidenziato nelle conclusioni dei test EUREKA, si deduce che [...] *anche incendi relativamente piccoli possono produrre considerevoli quantità di fumo e dare origine a situazioni critiche per i passeggeri, il veicolo e le squadre di soccorso.*

Trovarsi in un tunnel al momento dello scoppio di un incendio, è altamente pericoloso sia per chi si trova direttamente coinvolto che per le eventuali squadre di soccorso che intervengono in un momento successivo.

3. Formulazione di un metodo di analisi e stima delle conseguenze

Dalle analisi presenti nel precedente capitolo, emerge quanto possa risultare complicato definire un preciso percorso per la definizione del rischio, e quindi della sicurezza.

Focalizzandosi sul trasporto ed in particolare sul trasporto in galleria, risulta evidente la presenza di infiniti scenari analizzabili, alla cui definizione concorrono numerosi parametri.

Per un'opportuna analisi, risulta prima di tutto indispensabile definire gli scenari su cui porre l'attenzione, e sviluppare su di essi idonee procedure metodologiche che possano caratterizzarne l'evoluzione; nell'ambito dell'analisi della sicurezza, risulta particolarmente utile prevedere l'evoluzione del sistema complessivo durante una potenziale situazione di emergenza: in base a tale evoluzione è possibile definire la validità e l'efficacia di una determinata soluzione progettuale.

Come già analizzato nel capitolo due, le gallerie rappresentano strutture particolarmente critiche dal punto di vista della sicurezza stradale nel caso in cui si verifichi un incendio al loro interno.

Il modello proposto in questo elaborato di tesi, pone l'attenzione proprio su una situazione di incendio all'interno di un tunnel stradale; l'obiettivo dello strumento di calcolo che verrà presentato è quello di definire l'evoluzione del sistema ed in funzione di questa determinare le conseguenze associate all'evento.

Tramite un questionario sottoposto all'utente viene definito il contesto, cioè le caratteristiche del tunnel (struttura e traffico) e dell'evento incendio analizzati; tramite questi attraverso una serie di sottomodelli vengono definite le condizioni di esodo degli utenti esposti, e ne viene valutata la salvabilità.

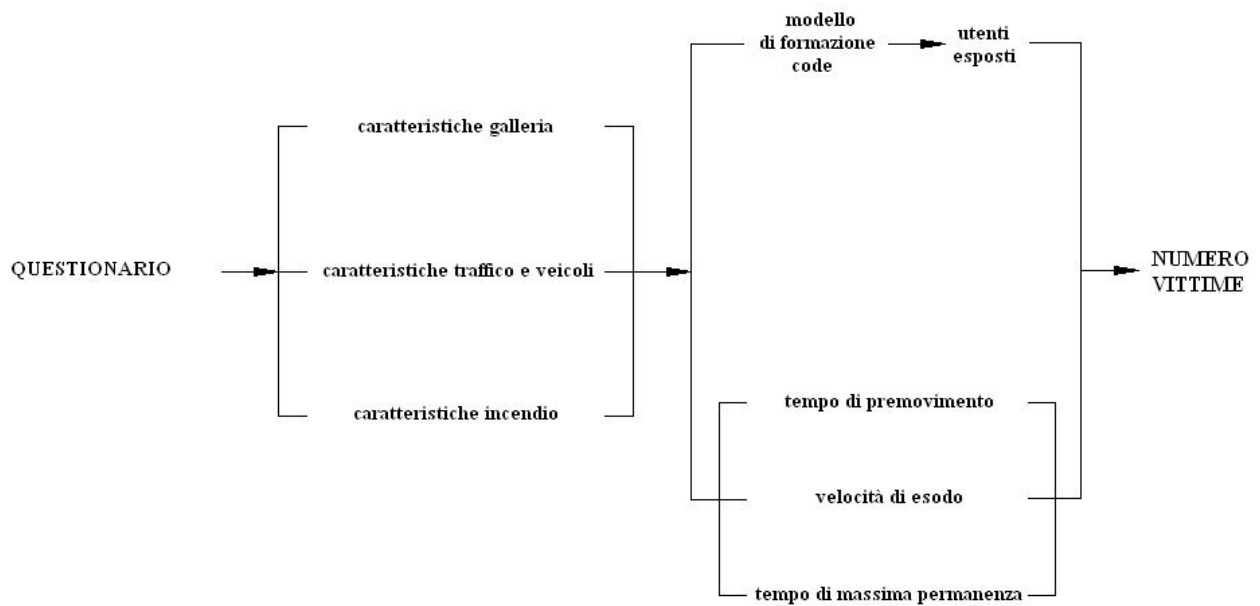


Figura 18: Rappresentazione schematica del funzionamento del modello di elaborazione definito

Nei paragrafi seguenti verranno analizzati in dettaglio i punti citati.

3.1 Analisi di scenario: individuazione delle informazioni preliminari

L'analisi di scenario è una fase fondamentale dell'analisi del rischio: viene condotta con la finalità di misurare il livello di gravità delle conseguenze di un “evento critico iniziatore”, in fissate condizioni al contorno:

- dimensioni della galleria
- volume e tipo di traffico
- modalità di formazione della coda
- numero, tipo e prestazioni dei sottosistemi presenti nel tunnel

Ogni singolo scenario rappresenta un possibile evento conseguenza con un suo danno atteso ed una sua probabilità [32].

Ponendo l'attenzione sullo scenario ‘incendio’, per poter stimare l'evoluzione del sistema galleria in presenza di tale evento risulta quindi necessario costruire un modello del sistema con lo scopo di:

- a. definire l'esistenza e l'estensione di zone di pericolo all'interno del tunnel
- b. valutare i possibili danni alle persone
- c. determinare i tempi di esodo delle persone dalla struttura.

Il modello di calcolo qui presentato ha proprio questo scopo: definite le caratteristiche della galleria analizzata, in funzione di queste e dell'intensità dell'incendio viene fatta una zonizzazione del flusso del pericolo all'interno del tunnel; in base a questa si stabiliscono le modalità di esodo degli utenti coinvolti, e si valutano i danni subiti da questi (definendone la salvabilità).

Nel seguito del capitolo, verranno analizzate in dettaglio le caratteristiche dello strumento di calcolo, definendo le varie ipotesi che si sono rese necessarie per parametrizzare il problema: si propone un modello di tipo macroscopico³⁰, suddiviso in 3 parti: il questionario, il foglio di calcolo, e il report finale.

Oltre a rispettare i principi metodologici precedentemente esposti, lo strumento si presenta in modo tale da risultare il più intuitivo possibile.

Prima di tutto, risulta fondamentale selezionare un insieme ridotto di parametri per poter modellare le conseguenze di un evento: le gallerie variano enormemente per quanto riguarda le loro lunghezze, sistemi di ventilazione e di drenaggio, sistemi di controllo del traffico ed in molte altre proprietà.

Pertanto risulta molto difficile sviluppare una metodologia che sia completa ed idonea per poter affrontare questa vasta gamma di caratteristiche di progettazione.

3.1.1 Sistema galleria

Le Linee Guida ANAS, individuano una serie di caratteristiche strutturali ed impiantistiche fondamentali per garantire la sicurezza all'interno di un tunnel stradale.

La complessità del sistema galleria e la numerosità di tali elementi che ne caratterizzano il funzionamento ha reso necessario un processo di selezione delle informazioni analizzabili: l'obiettivo di tale selezione è stato quello di individuare un numero ridotto ma significativo di informazioni su cui basare le successive analisi, in modo da garantire la spedività dello strumento senza compromettere la bontà dei risultati.

Tra le dotazioni analizzate dalle LG si sono selezionate quelle considerate maggiormente significative nella definizione della salvabilità degli utenti in caso di evento incidentale, in particolare in presenza di incendio.

³⁰ I modelli macroscopici trattano le persone come un unico gruppo omogeneo, senza fare distinzioni tra i comportamenti dei singoli individui; si differenziano dai modelli microscopici in cui le persone vengono modellate singolarmente, e ad ognuna possono essere assegnate diverse regole di comportamento

Nel presente paragrafo vengono analizzate le diverse caratteristiche individuate, necessarie per garantire o migliorare la sicurezza all'interni di una galleria, in condizioni normali e soprattutto in presenza di un evento incidentale.

La normativa di riferimento³¹ definisce anche per i diversi impianti e caratteristiche strutturali esaminati degli standard minimi che devono essere garantiti per tutte le gallerie soggette a tali norme.

Le misure di sicurezza da garantire sono diverse in funzione delle caratteristiche della galleria stessa; in particolare, come previsto nell'Allegato 3 delle Linee Guida ANAS “Gruppi omogenei di requisiti minimi di sicurezza”, i diversi tunnel stradali sono suddivisi in base a 3 parametri fondamentali, quali lunghezza, traffico e direzionalità.

gallerie unidirezionali	500<L<1000	L>1000	500<L1000	1000<L<3000	L>3000
VT<2000 veic/g cors	I	II			
VT>2000 veic/g cors			III	IV	V
gallerie bidirezionali	500<L<1000	L>1000	500<L1000	1000<L<3000	L>3000
VT<2000 veic/g cors	VI	VII			
2000<VT<10000 veic/g cors			VIII	IX	X

Tabella 6: Suddivisione delle gallerie in base alle proprie caratteristiche prevista dalla normativa (ANAS s.p.a., 2009)

Lunghezza

Uno dei parametri più significativi utilizzati per la distinzione tra gallerie è la lunghezza; si ricorda che oggetto delle recenti normative in materia di sicurezza sono le gallerie con lunghezza superiore a 500 m, mentre non sono previsti requisiti minimi per quelle di lunghezza inferiore.

Vengono inoltre evidenziate differenze tra gallerie di lunghezza inferiore a 1000 m, lunghezza compresa tra 1000 e 3000 m e maggiore ai 3000 m.

Oltre a determinare le misure di sicurezza necessarie, la lunghezza influenza anche l'autosalvabilità degli utenti e l'efficacia degli interventi di soccorso, anche se è evidente che le conseguenze di un evento incidentale dipendono fortemente dalla posizione in cui l'incidente ha luogo.

³¹ Direttiva Europea 2004/54/CE, recepita in Italia con il DLgs 264/2006 sviluppato poi da ANAS nelle “Linee Guida per la progettazione della sicurezza secondo la normativa vigente”

Traffico

Per la definizione di gruppi omogenei di gallerie, si utilizza il traffico giornaliero medio per corsia.

In particolare per le gallerie bidirezionali si distingue tra traffico superiore o inferiore a 2000 veicoli/giorno/corsia, mentre per quelle unidirezionali si considerano anche i casi di traffico superiore a 10000 veicoli/giorno/corsia.

Direzionalità

Evidente è la distinzione tra gallerie unidirezionali e bidirezionali; nelle gallerie unidirezionali è prevista generalmente l'esistenza di due fornici, e la sezione trasversale è maggiore.

La direzionalità è particolarmente importante anche nella scelta di alcune misure impiantistiche, quale ad esempio la tipologia di ventilazione, dipendente dalla direzionalità del traffico; nel caso di incidente se la galleria è bidirezionale la direzione dei fumi e l'espansione del focolaio potranno essere favorevoli per gli utenti provenienti da una direzione e sfavorevoli per quelli provenienti dalla direzione opposta.

3.1.1.1 Caratteristiche strutturali

Le caratteristiche strutturali riguardano il design della galleria.

Le Linee Guida definiscono le seguenti misure di sicurezza strutturali:

- dislivelli
- banchine pedonali di emergenza
- uscite di emergenza
- piazzole di sosta
- drenaggio liquidi infiammabili e tossici
- attraversamento spartitraffico imbocchi
- resistenza al fuoco delle strutture

Geometria della struttura

In relazione alla geometria della struttura il DLgs 264/2006 definisce diversi aspetti che “influiscono significativamente sulla probabilità che si verifichino incidenti e sulla gravità di questi”. Le principali caratteristiche che caratterizzano il layout geometrico di una galleria sono due: la pendenza e gli spazi esterni alla carreggiata. Mentre la prima è legata all'andamento longitudinale, la seconda riguarda l'andamento trasversale.

Per quanto riguarda la pendenza, è importante sottolineare che la limitazione di questa permette un aumento della capacità e del volume di traffico e ha un impatto notevole sul dimensionamento del sistema di ventilazione [26]. Una pendenza elevata può inoltre portare a rallentamenti, soprattutto se è prevista la circolazione di mezzi pesanti: questo aumenta le potenziali conseguenze di un incidente, nonché la concentrazione di inquinanti nell'aria.

Il limite massimo previsto è del 5%, laddove non ci siano particolari impedimenti geomorfologici, come indicato dalle norme; oltre il 3% è prevista la necessità di valutare misure di sicurezza supplementari.

L'altro aspetto caratterizzante la geometria della galleria, in particolare della sezione trasversale, è lo spazio esterno alla carreggiata: i due elementi che più caratterizzano gli spazi esterni alla carreggiata sono la banchina e la corsia d'emergenza.

La corsia d'emergenza è definita come una “area di tolleranza stradale per parcheggiare i veicoli in caso di emergenza” [26].

In galleria, le tolleranze stradali sono spesso restrittive, soprattutto per ragioni economiche: in molti paesi la larghezza prevista per le corsie d'emergenza è troppo stretta per poter parcheggiare un veicolo. Per questo sono predisposte a determinata distanza delle piazzole, che ovviamente non possono sostituire completamente le corsie d'emergenza, ma che comunque aumentano il livello di sicurezza di una galleria.

Laddove le corsie d'emergenza, non obbligatorie per il DLgs 264/2006, non siano previste, è comunque necessario garantire l'autosalvataggio degli utenti attraverso le banchine pedonali: nel decreto legislativo citato si ritiene alternativa la presenza dei marciapiedi o delle corsie d'emergenza per garantire la salvabilità degli utenti in caso di necessità.

Uscite di emergenza

La normativa definisce un'uscita di emergenza come “apertura realizzata sull'involucro della struttura finalizzata a favorire l'esodo degli utenti verso vie di fuga e luoghi sicuri”. I portali della galleria sono per definizione uscite di emergenza; oltre a questi sono individuate come tali tutte le uscite dirette verso l'esterno della galleria, verso il collegamento pedonale tra le due canne della galleria, e uscite verso un cunicolo o galleria di emergenza.

PIARC definisce che “[...] le uscite di emergenza sono previste in tutte le gallerie, tranne in quelle più corte, per consentire agli utenti di evacuare a piedi dalla canna del traffico verso un luogo sicuro durante un'emergenza. Nelle gallerie corte, gli imbocchi rappresentano delle adeguate uscite d'emergenza. Nella maggior parte delle gallerie tuttavia, ne sono necessarie altre per limitare il tragitto che gli utenti devono percorrere per raggiungere un luogo di

sicurezza”.

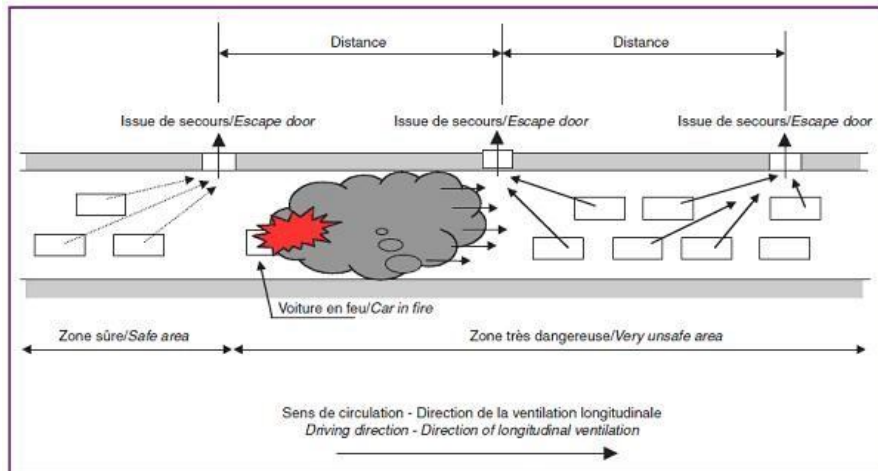


Figura 19: Rappresentazione schematica dell'esodo verso le uscite di sicurezza in caso di evento incidentale; l'esempio riguarda una galleria monodirezionale con impianto di ventilazione longitudinale (PIARC, 2011)

Le uscite di emergenza devono essere corredate da idonei dispositivi di sicurezza atti ad impedire all'interno delle vie di fuga la propagazione di fumi ed energia termica, consentendo agli utenti di usufruire delle vie di esodo in condizioni di sicurezza e ai soccorritori di accedere alla galleria.

In generale, durante l'evacuazione, un utente tende a portarsi verso l'uscita più vicina se questa è facilmente riconoscibile: è quindi opportuno che queste siano opportunamente individuabili, sia attraverso una corretta illuminazione e colorazione che grazie ad un'opportuna segnaletica.

Un altro importante aspetto è la dimensione di un'uscita di sicurezza, che deve anche poter essere utilizzata come entrata dai soccorritori: è necessario quindi che sia sufficientemente larga.



Figura 20: Esempio di via di fuga con relativa segnaletica

In base alla normativa prevista le uscite devono anche essere costituite da porte con una resistenza al fuoco che impedisca la propagazione di fumi e calore all'interno delle vie di fuga,

per garantire la salvabilità degli utenti: le Linee Guida ANAS suggeriscono una resistenza minima al fuoco pari a REI120³².

Per garantire l'autosalvataggio degli utenti, è fondamentale anche che le uscite di sicurezza siano sufficientemente vicine: infatti non è sufficiente che un'uscita soddisfi i requisiti di sicurezza richiesti, ma deve far parte di un sistema in grado di garantire agli utenti un tempo minimo per l'abbandono della struttura in caso di necessità. È stato sperimentato che i soggetti in fuga difficilmente riescono a stimare la loro posizione rispetto all'ingresso del fornice: spesso capita che questa distanza sia sottostimata e che tendano a portarsi verso le uscite del fornice piuttosto che verso le uscite di emergenza, e questa tendenza aumenta con l'aumentare della distanza dell'uscita di sicurezza.

Il limite massimo previsto per l'interdistanza tra due uscite di emergenza è individuato dalle Linee Guide ANAS in 300 m.

Un'uscita non sarà visibile né raggiungibile dagli utenti che si trovano ad una distanza maggiore di 500 m³³, e anche per gli utenti che riuscissero a raggiungerla potrebbe non avere sufficiente capacità per garantire l'evacuazione rapida e sicura di tutti. Ovviamente questa distanza dovrà essere tanto minore quanto maggiore è il volume di traffico previsto, per garantire una sufficiente capacità.

Piazzole di sosta

Nel DLgs 264/2006 si definiscono come spazi destinati ad ospitare veicoli con necessità di sostare in galleria, oppure sufficientemente agevoli da consentire agli utenti con disabilità di mettersi in salvo o comunque contattare i soccorsi, tramite SOS.

Il DLgs prevede la presenza di piazzole di sosta per gallerie con lunghezza superiore ai 1500 m e con un traffico veicolare piuttosto sostenuto (è fissato il limite di 2000 veicoli/giorno/corsia).

Per garantire le funzioni richieste, ogni piazzola deve avere dimensioni tali da ospitare un mezzo, anche pesante, essere dotata di attrezzature di pronto intervento e deve essere soggetta a controllo da parte degli operatori preposti, per individuare eventualmente veicoli fermi.

Nel caso in cui le caratteristiche della galleria non consentano la presenza di una piazzola di sosta adeguata, non è obbligatorio prevederla se la larghezza della parte della galleria

³² Significa che si assicura un livello di resistenza al fuoco pari almeno a 120 minuti, per un incendio caratterizzato dalla curva nominale degli idrocarburi (par. 3.6.1.5.1 DM 14/01/2008)

³³ Ovviamente questa distanza assume valori diversi in funzione di diversi elementi, quali l'entità e la posizione dell'evento e le dotazioni impiantistiche presenti

accessibile ai veicoli, escluse le parte sopraelevate e le corsie normali, è pari almeno alla larghezza di una corsia normale³⁴.

Per garantire l'utilità di queste piazzole il parametro fondamentale è la distanza: l'unione europea³⁵ fissa un valore massimo di 1000 metri, mentre le linee guida ANAS per la progettazione e realizzazione della sicurezza in galleria individuano un valore di 600 m; uno studio tedesco [6] indica che le piazzole di sosta non sempre vengono utilizzate ed in particolare se la loro distanza supera i 110 m, limite impossibile da raggiungere soprattutto per motivi economici.

Drenaggi

Il sistema di drenaggio della piattaforma stradale in galleria assume anche il ruolo di impianto di sicurezza. Il suo dimensionamento deve garantire la rapida intercettazione e l'allontanamento dei liquidi defluenti in carreggiata, siano essi oli o liquidi infiammabili originati da sversamenti accidentali, reflui dei lavaggi, reflui dell'impianto antincendio, acque di percolazione o infiltrazione, nonché acque meteoriche in prossimità degli imbocchi.

La rete idraulica di raccolta e smaltimento delle acque di piattaforma deve essere separata dal sistema di raccolta dei drenaggi, con collettori disposti, dove possibile, ai margini della carreggiata per agevolarne la manutenzione.

I sistemi di drenaggio sono solitamente costituiti da fessure continue sul ciglio della strada oppure da aperture discrete distribuite lungo tutta la lunghezza della galleria: in quest'ultimo caso le Linee guida ANAS definiscono che le caditoie di raccolta siano posizionate a distanza non superiore a 25 m. Devono inoltre garantire l'ispezione e manutenzione dei collettori di smaltimento, ed essere dotate di dispositivi anti-fiamma; dovrà inoltre essere prevista una vasca di intercettazione e accumulo, posta all'esterno della galleria in area accessibile per ispezione e manutenzione: è necessario valutare la necessità di installare sistemi di monitoraggio e controllo del livello idrico nelle vasche.

Accesso per i servizi di emergenza

Si prevede che per le gallerie unidirezionali, dove possibile, siano presenti dei collegamenti tra fornic per consentire l'intervento dei soccorsi: ovviamente la presenza di questi collegamenti non sempre è realizzabile, sia per le caratteristiche plano-altimetriche dei singoli

³⁴ Allegato 2.2.5.3 del DLgs 264/2006

³⁵ Direttiva 2004/54/CE

fornici che per motivi geomorfologici. Questi accessi aumentano notevolmente la capacità difensiva di una galleria, in quanto consentono il raggiungimento da parte dei mezzi di soccorso della parte più critica del tunnel, la parte centrale.

Il DLgs 264/2006 individua come accessi per i mezzi di soccorso le gallerie carrabili: si specifica che questi debbano rimanere solitamente chiusi, e si definiscono limiti di pendenza e resistenza al carico, nonché dimensioni minime (pari a 350x400 cm).

Si prevede anche che queste siano realizzate con grado di compartimentazione minimo REI 120, e che il portone di accesso sia dotato di sensori in grado di attivarsi all'apertura.

Questi collegamenti devono essere previsti, secondo le Linee guida ANAS, ad una distanza di 900 metri circa, mentre non devono essere garantiti per gallerie con lunghezza inferiore a 1000 m. Il DLgs 264/2006 individua una distanza minima di 1500 m.

Alimentazione e circuiti elettrici

La normativa vigente prevede che tutte le gallerie con lunghezza superiore a 500 m dispongano di un'alimentazione di emergenza ed un'alimentazione di sicurezza.

L'alimentazione di emergenza deve essere in grado di garantire il funzionamento dell'impianto di alimentazione di sicurezza, l'impianto di ventilazione in galleria per la gestione dei fumi, l'impianto di ventilazione delle vie di fuga e l'impianto idrico antincendio, e deve avere un'autonomia pari almeno a 1 ora.

L'alimentazione di sicurezza deve garantire il funzionamento dei sistemi di emergenza per almeno 24 ore.

Resistenza al fuoco strutture

Come previsto dal DLgs 264/2006, la struttura di una galleria deve assicurare una sufficiente resistenza al fuoco. Secondo le linee guida ANAS, occorre garantire per le gallerie, ed in particolare per quelle in cui un cedimento locale possa avere conseguenze catastrofiche (ad esempio gallerie sommerse), livelli di prestazione e conseguenti classi di resistenza al fuoco indicati all'interno del capitolo 3.6 del DM 14/01/2008 "approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni".

In particolare si deve assicurare un livello di resistenza al fuoco opportuno.

La reazione al fuoco viene indicata con la sigla REI, e si definisce come l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare capacità portante, tenuta e isolamento termico.

R	CAPACITA' PORTANTE	Attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco
E	TENUTA	Attitudine di un elemento da costruzione a non far passare né produrre fiamme, vapori, gas caldi sul lato non esposto
I	ISOLAMENTO TERMICO	Attitudine di un elemento da costruzione a ridurre la trasmissione del calore

Tabella 7: Definizione REI (D.M. 16/02/2007,2007)

La sigla REI è seguita da un numero che indica la classe di resistenza al fuoco dell'elemento considerato, cioè il tempo, in minuti primi, durante il quale la resistenza al fuoco deve essere garantita.

La resistenza al fuoco di una struttura può essere rappresentata dall'intervallo di tempo di esposizione massima di un elemento ad un incendio; dopo questo tempo le caratteristiche di stabilità meccanica e tenuta a fumi e gas non sono più garantite: quanto espresso nelle linee guida, può essere sintetizzato nell'indicatore REI 120³⁶.

REI 120 corrisponde quindi a dire che gli elementi considerati sono in grado conservare capacità portante, tenuta e isolamento termico per almeno 120 minuti³⁷.

Per quanto riguarda le caratteristiche della pavimentazione, studi hanno dimostrato che l'asfalto non contribuisce significativamente all'estensione dell'incendio, ma si evidenzia che l'asfalto drenante non è raccomandato, in quanto eventuali perdite di liquidi infiammabili si accumulerebbero sotto la superficie stradale e costituirebbero potenziale fonte di incendio senza la possibilità di essere rimossa.

3.1.1.2 Impianti e sistemi di sicurezza

Se le gallerie sono più lunghe di poche centinaia di metri, sono indispensabili specifici impianti al fine di accrescere la sicurezza degli utenti, sia in condizioni normali che in caso di eventi incidentali.

Per ridurre i rischi incidentali e limitarne le possibili conseguenze, ma anche per mantenere un

³⁶ Definito nel D.M. 16/2/2007, "classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione"

³⁷ Al di là dei valori numerici, il *manuale delle gallerie stradali* (PIARC, 2011) riassume 4 obiettivi della resistenza strutturale al fuoco nelle gallerie: 1.le persone all'interno delle gallerie devono poter provvedere all'auto-evacuazione o essere assistite fino a luogo sicuro; 2.le operazioni di soccorso devono essere possibili in condizioni di sicurezza; 3.occorre adottare misure protettive contro il crollo della struttura della galleria; 4.limitare il periodo durante il quale il traffico sarà interrotto a causa delle riparazioni successive all'evento. I materiali usati nella costruzione della galleria devono avere determinate proprietà, in particolare bassa emissione di calore (che riduce le dimensioni dell'incendio), bassa infiammabilità (che riduce il tasso di propagazione dell'incendio), riduzione al minimo dei prodotti tossici dell'incendio

adeguato livello di confort per gli utenti, è possibile installare impianti fissi differenziati.

Un primo tipo di impianto è dato dai sistemi di comunicazione e allerta. Questi includono i sistemi usati per verificare periodicamente le condizioni in galleria e anche per informare l'operatore in merito ad un eventuale danno o un incidente.

Insieme ai sistemi di per la sorveglianza e il controllo del traffico, si possono installare anche dei sistemi di rilevamento, che includono la rilevazione automatica degli incendi e in rilevamento di fumi: queste informazioni possono provenire anche direttamente dai soggetti coinvolti, che le comunicano mediante eventuali pulsanti di allarme o telefoni di emergenza.

Per garantire il confort degli utenti e ridurre i rischi di incidente, è importante garantire un'adeguata visibilità e ridurre la concentrazione di contaminanti: a tal fine sono necessari adeguati sistemi di illuminazione e ventilazione. La ventilazione è inoltre essenziale in condizioni di emergenza, in quanto influisce sia sullo sviluppo di un incendio che sulla propagazione del fumo prodotto.

Un ulteriore elemento per la gestione dei rischi è la segnaletica: questa è importante in quanto pone in evidenza possibili ostacoli o pericoli, ma anche perchè aiuta ad individuare le uscite di emergenza, i pulsanti e telefoni di emergenza, gli estintori e tutti i luoghi necessari a garantire la salvabilità degli utenti in caso di incidente.

Un altro impianto è l'impianto per l'estinzione degli incendi. Questo include i dispositivi antincendio disponibili in galleria sia per gli utenti che per le squadre antincendio che intervengono in seguito ad eventi incidentali. In queste condizioni particolarmente importanti sono anche i dispositivi posti all'imbocco della galleria per segnalare l'evento, e quindi comunicare agli utenti il pericolo o impedirgli di entrare nel tunnel: possono essere utilizzati semafori, pannelli a messaggi variabili, vere e proprie barriere, o un'integrazione di questi.

Nel seguito si analizzano in dettaglio le voci introdotte.

Sistemi di supervisione, controllo e acquisizione dati

Un rilevamento tempestivo di un incendio in galleria contribuisce in maniera decisiva alla sicurezza degli automobilisti e ne favorisce le probabilità di salvataggio.

Le linee guida ANAS prevedono che [...]un centro di controllo sia realizzato per tutte le gallerie di lunghezza superiore a 3000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia; inoltre [...]la sorveglianza di diverse gallerie può essere accentrata in un unico centro di controllo.

Il centro di controllo è strettamente legato ai diversi impianti presenti, che richiedono gestione e monitoraggio continui da parte degli operatori.

Nelle gallerie stradali le condizioni di esercizio richiedono il puntuale controllo dei parametri che potenzialmente potranno concorrere alla generazione di situazioni di pericolo, quali ad esempio livello degli inquinanti e livello di opacità dell'aria. Pertanto è necessario prevedere l'utilizzo di idonei sottosistemi in grado di rilevare i diversi parametri e segnalare eventuali anomalie.

In condizioni di normale esercizio le funzioni del centro sono prevalentemente passive, mentre in caso di evento incidentale il coordinamento dei soccorsi è fondamentale per limitare le conseguenze.

Molti dispositivi e impianti presenti in galleria sono servo-controllati e funzionano in modo autonomo (ventilazione e illuminazione), altri sono attivati a distanza da operatori che devono essere in grado di comandarli.

Le diverse funzioni di sorveglianza, comando e controllo e archiviazione dei dati sono spesso riunite in un unico sistema di supervisione, controllo e acquisizione dati, detto SCADA (da "Manuale delle gallerie stradali", PIARC).

Gli impianti di supervisione e controllo sono raggruppabili in sistemi di video-sorveglianza e rilevatori di fumo e incendi.

I sistemi di video-sorveglianza permettono di visualizzare immagini provenienti dall'interno della galleria su appositi display presso il centro di controllo e comando. Più spesso sono presenti sistemi automatici per la rilevazione di incidenti, basata su un'analisi computerizzata dei flussi d'immagini video generati dalle telecamere disposte per monitorare il traffico; sono disponibili diversi algoritmi che permettono di rilevare eventi di vario genere, tra cui veicoli fermi, veicoli lenti, cali di velocità presenza di detriti o fumo. Una volta che il sistema rileva un'anomalia viene inviato un allarme e l'operatore può controllare l'entità del problema: questa metodologia assicura in caso di evento incidentale una sufficiente tempestività di individuazione e intervento.



Figura 21: Centro di controllo e telecamera di video-sorveglianza in galleria stradale

I rilevatori di fumo e incendi sono costituiti da sensori e allarmi che formano un sistema denominato allarme antincendio; questi sistemi hanno lo scopo di individuare il più in fretta possibile la formazione di fumo e incendi, così da poter informare tempestivamente sia gli utenti della galleria sia i diversi operatori preposti al controllo della sicurezza.

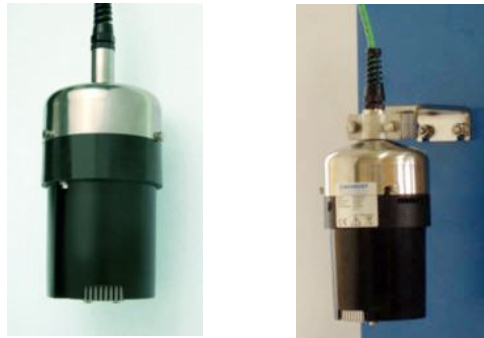


Figura 22: Rilevatori di fumo del tipo FireGuard, galleria stradale del San Gottardo

I sistemi di rilevazione devono, inoltre, essere in grado di attivare automaticamente gli impianti di protezione attiva, in particolare impianti di estrazione fumi e di spegnimento.

I principali sono:

- rilevatori di fumi
- rilevatori di temperatura
- rilevatori di radiazioni luminose.

Sistemi di comunicazione

E' importante che l'operatore possa comunicare con l'utente, e che questa comunicazione possa avere luogo in entrambe le direzioni: dall'operatore verso l'utente e dall'utente verso l'operatore.

Vi sono diversi dispositivi che rendono possibile questa funzione di comunicazione, non tutti però offrono la stessa funzionalità: alcuni consentono una trasmissione dall'utente all'operatore (come i pulsanti d'allarme), altri consentono all'operatore di comunicare all'utente (ad esempio altoparlanti); solo i telefoni per le emergenze permettono uno scambio completo di informazioni.

Telefoni per le emergenze

Consentono a un utente rimasto vittima di un incidente in galleria di contattare il centro di comando e controllo: oltre a stabilire un contatto verbale, l'utilizzo di questo dispositivo da

parte dell'utente ne permette anche l'esatta localizzazione.

I telefoni per le emergenze sono installati in cabine di vario tipo a distanze fisse, spesso definita dai diversi paesi.



Figura 23: Esempi di telefoni di emergenza installabili in galleria

Pulsanti d'allarme

Consentono all'utente di inviare un allarme in caso di incidente; non essendo particolarmente costosi, possono essere installati ad intervalli frequenti.

L'utilizzo di questo dispositivo comunque è scarso in quanto non consente una comunicazione bidirezionale tra utente e centro di controllo.

Allarme automatico associato a sistemi di emergenza destinati agli utenti

In questo caso si tratta di dispositivi che informano l'operatore di un eventuale utilizzo dei sistemi di emergenza presenti, in particolare estintori e uscite d'emergenza. In genere vi sono dei sensori che rilevano un cambiamento di condizione e comunicano tale informazione al centro di controllo.

Trasmissione radio

La galleria spesso non permette la trasmissione di onde radio: per ristabilire la propagazione di queste occorre installare opportuni dispositivi. Possono essere ritrasmessi diversi tipi di servizi, quali servizi di salvataggio, frequenze operatori, servizi d'emergenza, frequenze pubbliche e per telefoni cellulari.

Dove previsti questi dispositivi, in caso di emergenza le trasmissioni radio sono interrotte e vengono trasmessi dei messaggi riguardanti la galleria in modo da fornire agli utenti informazioni sulle azioni da compiere.

Altoparlanti

Permettono all'operatore di rivolgersi direttamente all'utente per comunicare informazioni.

In genere gli altoparlanti comunicano istruzioni all'utente, o emettono un segnale acustico per indicare un pericolo.

Illuminazione

Gallerie e sottopassi devono essere provvisti di illuminazione diurna e notturna, in quanto, nella maggioranza dei casi, 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 utenti.

Lunghezza della galleria	<25 m	25 m ≤ L < 75 m	75 m ≤ L ≤ 125 m
L'uscita è ben visibile dalla distanza di arresto? ¹⁾		si / no	si / no
La luce naturale penetra liberamente in galleria? ²⁾		si / no	si / no
La luminanza delle pareti è adeguata? ³⁾		si / no	si / no
Il traffico orario è scarso? ⁴⁾		si / no	si / no
Illuminazione da realizzare	Nessuna	Illuminazione di livello pari al 50% di quanto previsto per le gallerie lunghe	Illuminazione di livello pari al 100% di quanto previsto per le gallerie lunghe

Figura 24: Schema previsto per stabilire la necessità di illuminazione nelle gallerie stradali (D.M. 5 novembre 2005)

L'utente che percorre la galleria, non deve avere la percezione di entrare in un “buco nero”, ma devono essere garantite:

- buona illuminazione diurna e notturna
- percezione della variazione di guida senza lo sviluppo di incertezze da parte dell'utenza
- assenza di ombre, abbagliamenti o riflessi

Come previsto dal DLgs 264/2006, l'illuminazione in galleria deve essere progettata secondo le norme fissate dal D.M. n. 347 del 14.09.05 “norme di illuminazione delle gallerie stradali”; lo stesso distingue l'illuminazione in 3 tipologie:

- illuminazione ordinaria; tale illuminazione, costituita dall'illuminazione permanente e da quella di rinforzo, “*deve essere prevista in modo tale da assicurare una visibilità adeguata ai conducenti nella zona di ingresso e*

all'interno della galleria, di giorno e di notte” come definito nella sopraccitata normativa.

- illuminazione di emergenza, costituita dall'illuminazione della galleria in condizioni di interruzione di erogazione dell'energia elettrica; questa per definizione deve essere in grado di garantire un livello minimo di luminanza³⁸ pari a 1 cd/mq all'interno del tunnel per almeno 30 minuti.
- illuminazione di sicurezza, costituita dall'illuminazione delle vie di fuga. Nelle linee guide ANAS si specifica in particolare che questa deve essere adeguatamente alimentata da un gruppo elettrogeno che garantisca un'autonomia minima di 24 ore.

Per definire il sistema di illuminazione, la galleria viene suddivisa in 3 parti principali:

- zona di transizione, tratta almeno pari alla distanza di arresto, che serve per avere una graduale diminuzione di luminanza tra la zona di entrata e la zona interna;
- zona interna, in cui si prevede che la luminanza sia almeno pari a 1,5 volte la luminanza dell'entrata per le gallerie a senso unico, 2 volte per quelle a doppio senso di marcia;
- zona di uscita, che consente di riportare l'illuminazione ad un livello quasi pari all'illuminazione esterna, in funzione della distanza dall'uscita.

Un sistema di illuminazione deve inoltre essere progettato nel rispetto di diversi criteri, tra i quali livello di luminosità ed illuminazione della pavimentazione, delle pareti laterali e delle colonne, valori di riverbio, valori di uniformità per i diversi regimi operativi [26].

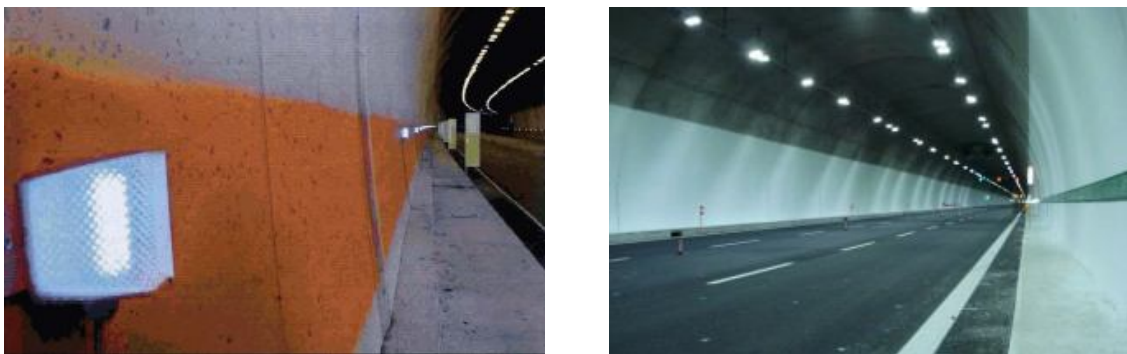


Figura 25: Sistema di illuminazione a lampade led: plafoniere di evacuazione e impianto di illuminazione ordinaria

³⁸ La luminanza è una grandezza fotometrica definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente verso una superficie normale alla direzione del flusso e l'area della superficie stessa

Ventilazione meccanizzata

Gli impianti di ventilazione meccanizzata nelle gallerie hanno 2 diverse funzioni:

- nel funzionamento in condizione normale garantisce una sufficiente qualità dell'aria in galleria, generalmente attraverso la diluizione degli inquinanti (ventilazione sanitaria);
- in una situazione di emergenza, in particolare in caso di incendio, serve a rendere l'ambiente più sicuro per gli utenti della galleria e i servizi di salvataggio attraverso un adeguato controllo del flusso del fumo (ventilazione d'emergenza).

Nelle gallerie si possono usare diverse strategie di ventilazione meccanica: la scelta dipende in genere sostanzialmente da considerazioni di sicurezza in relazione agli incendi.

Fondamentalmente si impiegano due sistemi di ventilazione meccanica: il sistema longitudinale, nel quale l'aria viene fatta fluire longitudinalmente secondo l'asse del traforo, e il sistema trasversale, in cui l'aria viene immessa e ripresa trasversalmente in modo da ventilare la galleria per sezioni trasversali. I due sistemi possono essere combinati, in modo da offrire soluzioni idonee al tipo di ventilazione che si prevede di applicare.

Ventilazione longitudinale

La strategia longitudinale consiste nel creare un flusso d'aria longitudinale nella galleria allo scopo di spingere tutto il fumo prodotto da un veicolo in fiamme verso un lato dell'incendio.

L'aria è mossa da ventilatori assiali a impulso installati sulla volta della galleria, singolarmente o a coppie.

L'utilizzo di tale modalità in gallerie bidirezionali e/o congestionate richiede grande attenzione, in quanto gli utenti che si trovano in direzione del flusso d'aria possono essere esposti a gas tossici e visibilità ridotta: per questo motivo questa tipologia di ventilazione è usata soprattutto nelle gallerie monodirezionali. Può essere usato anche per gallerie bidirezionali, ma in questo caso è necessario incrementare il numero di ventilatori, in quanto la “spinta” necessaria per indurre l'aria all'interno della galleria deve vincere la resistenza dei veicoli viaggianti in senso opposto rispetto all'aria di ventilazione³⁹.

³⁹ E' comunque fortemente sconsigliato l'utilizzo di questa tipologia di ventilazione meccanizzata in gallerie bidirezionali

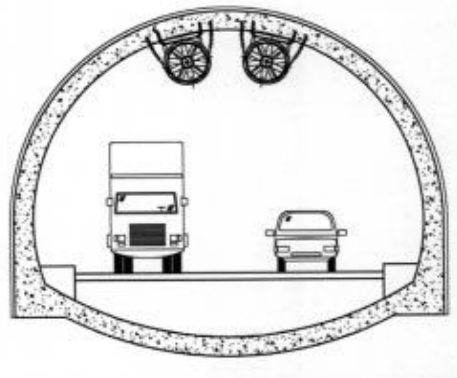


Figura 26: Esempio di sistema di ventilazione longitudinale con ventilatori a induzione

Ventilazione trasversale

Questo sistema, prevalentemente utilizzato in gallerie bidirezionali, prevede l'esistenza di due cunicoli paralleli all'asse della galleria: da uno attraverso delle bocchette si immette l'aria fresca, dall'altro si estrae l'aria viziata. L'aria fresca immessa e l'aria viziata estratta “depurano” trasversalmente la galleria.

Questa strategia di ventilazione è applicabile a qualunque galleria, ma richiede maggiori difficoltà e costi per progettazione, costruzione e funzionamento del sistema.

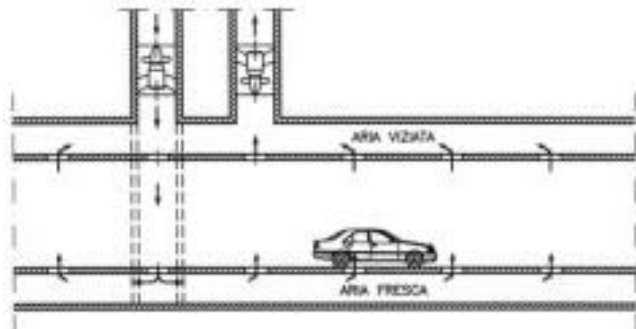
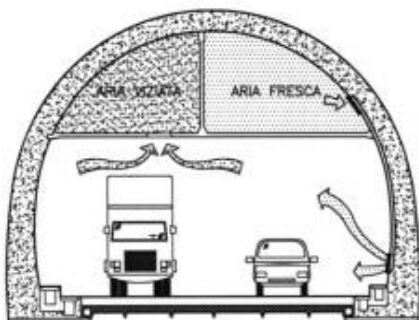


Figura 27: Esempio di schema di ventilazione trasversale: nel primo caso i due condotti di entrata ed uscita dell'aria sono affiancati nella parte superiore del tunnel, mentre nel secondo l'aria viene immessa dal basso e asportata dall'alto

Ventilazione semi-trasversale

Si possono distinguere 2 tipi di ventilazione semi-trasversale:

- semi-trasversale in mandata, in cui si immette aria fresca da griglie poste lungo la galleria e l'aria viziata esce per sovrappressione dai portali; questo tipo di sistema prevede in genere che, in caso di formazione di tappi di fumo, entri in funzione un sistema di aspirazione trasversale.
- semi-trasversale in ripresa, in cui si estrae aria inquinata da griglie mentre l'aria fresca entra dai portali per depressione.

In caso di incendio il fumo tende a concentrarsi nella parte superiore dello spazio della galleria, da dove può essere estratto meccanicamente. Un buon sistema di ventilazione prevede di preservare uno strato di aria fresca nella parte inferiore della sezione (in cui si avranno quindi buona visibilità e bassa tossicità), per consentire l'autosalvamento degli utenti.

Si cerca quindi di mantenere una ridotta velocità longitudinale del fumo (1-1,5 m/s), che ne consente appunto una buona e stabile stratificazione verso la volta della galleria facilitandone l'estrazione (se è previsto un sistema di estrazione fumi).

I sistemi di ventilazione sono utilizzati non soltanto per lo spazio destinato al traffico, ma anche per diversi ambienti della galleria, in particolare:

- i collegamenti pedonali tra le 2 canne di gallerie monodirezionali, in modo da impedire l'ingresso dei fumi generati da un incendio in una delle due canne nell'altra; si prevede questo impianto per lunghezze superiori a 100 m (Linee guida ANAS)
- i cunicoli di sicurezza e le gallerie di emergenza, in cui l'impianto di ventilazione deve garantire l'assenza di fumi e un livello accettabile di qualità dell'aria agli utenti.

Come definito dal DLgs 264/2006, per le diverse gallerie stradali sono raccomandati differenti sistemi di ventilazione:

Sistema di ventilazione	Lunghezza galleria[Km]
Ventilazione naturale	≤ 1.0
Ventilazione longitudinale	
con jet-fans	≤ 4.0
con jet-fans ed estrazione di fumi	≤ 6.0
Ventilazione semi-trasversale	≥ 2.0
Ventilazione trasversale	≥ 6.0

Tabella 8: Sistemi di ventilazione meccanizzata consigliati al variare della lunghezza del tunnel (DLgs 264, 2009)

Erogazione idrica

L'erogazione idrica in galleria deve provvedere all'alimentazione dell'impianto idrico antincendio; si prevede in particolare che il sistema di alimentazione idrica sia in grado di

garantire la continuità di erogazione idrica almeno per due ore.[2]

In base al DLgs 264/2006, devono essere dotate di un impianto idrico antincendio tutte le gallerie soggette a tale norma (cioè con lunghezza superiore a 500 m).

Il sistema è costituito dalla rete idrica, le linee di alimentazione in caso di incendio o le colonne montanti. Gli idranti vengono utilizzati per fornire un punto di raccordo ai quali i vigili del fuoco possano installare le manichette.

Come evidenziato dalla normativa, è previsto che “[...] vicino ai portali e all’interno delle gallerie devono essere disponibili idranti a intervalli non superiori a 250 m.”

Sistemi fissi di contenimento e spegnimento

I sistemi di contenimento e spegnimento servono principalmente per rallentare il processo di combustione, l'aumento di temperatura e la produzione di fumi, garantendo così un minor danno all'utenza coinvolta e alla struttura.

I sistemi fissi in genere si attivano automaticamente per effetto dell'aumento di calore sprigionato dalla combustione. I sistemi attualmente utilizzabili si dividono in sistemi ad acqua frazionata, sistemi ad acqua nebulizzata, sistemi a schiuma, sistemi con monitor automatici distribuiti lungo la galleria.

Queste dotazioni sono fondamentali nel caso di piccoli incendi ordinari; a poco servono però in condizioni particolarmente gravose, ad esempio quando l'incendio è causato da sostanze pericolose trasportate su autocarri, a causa delle ingenti quantità di merce coinvolta, e della possibile rapidità dell'evoluzione dell'incendio, spesso accompagnato da esplosioni.

Segnaletica

La segnaletica è uno dei mezzi a disposizione dell'operatore per comunicare con l'utente.

In galleria si possono trovare cartelli direzionali fissi, cartelli di polizia fissi, cartelli variabili, nonché specifici cartelli di sicurezza in prossimità dei diversi dispositivi presenti.

Il problema principale dei cartelli indicatori in galleria riguarda la posizione: nella pratica è necessario trovare un compromesso tra una buona visibilità dei segnali e lo spazio a disposizione.

Le linee guida ANAS definiscono i requisiti minimi della segnaletica delle gallerie in funzione della lunghezza, evidenziando che comunque il progetto complessivo deve considerare attentamente le singole ubicazioni ed i raggruppamenti di segnali per evitare l'affollamento od il disordine della segnaletica stessa.

In caso di emergenza, particolarmente utili risultano i segnali a messaggio variabile, che

consentono all'operatore di comunicare in tempo reale con gli utenti e comunicare diverse informazioni.

Quando si verifica un evento grave, deve essere possibile da subito impedire agli utenti di entrare nella galleria: in questo modo è possibile evitare agli utenti che si trovano all'esterno di finire in una situazione potenzialmente pericolosa, limitando in numero di esposti.

Agli imbocchi di tutte le gallerie di lunghezza superiore ai 500 m devono essere installati semafori che consentano la chiusura della galleria in caso di emergenza, e dovranno essere previsti pannelli a messaggio variabile.



Figura 28: esempio di semaforo e pannello a messaggio variabile posizionati all'imbocco di una galleria stradale

In generale l'esperienza mostra che se una galleria viene chiusa semplicemente per mezzo di un segnale di stop, questo non è particolarmente efficace [26].

Pertanto spesso viene integrato, oltre con dei pannelli a messaggio variabile, con delle barriere: oltre che nelle situazioni di emergenza, queste possono trovare impiego anche in altre situazioni, quali ad esempio le chiusure programmate per interventi di manutenzione.

Caratteristiche ignifughe impianti

Tutti gli impianti della galleria devono mirare al mantenimento delle loro funzioni anche in caso di incendio; in particolare è previsto che una serie di impianti garantiscano una determinata resistenza al fuoco e alle alte temperature:

- ventilatori di estrazione
- acceleratori in volta
- serrande motorizzate di estrazione fumi
- supporti

La normativa vigente prevede che tali dispositivi siano in grado di resistere ad una temperatura di 400 °C per un periodo minimo di 90 minuti.

Sono previste anche dei requisiti minimi di resistenza al fuoco per tutti gli elementi di emergenza presenti in galleria.

Nel modello di elaborazione proposto, la definizione dei parametri appena descritti avviene tramite la compilazione da parte dell'utente di un questionario, dove in maniera chiara vengono evidenziate le caratteristiche da definire.

3.1.2 Definizione dello scenario: il questionario

Per rendere pratico la definizione dell'evento considerato, nel presente lavoro di tesi si propone uno strumento di interfaccia con l'utente; per la realizzazione dello strumento è stato utilizzato un elaboratore di calcolo elettronico.

La fase di raccolta e selezione delle informazioni utili, è gestita dal primo foglio di calcolo, strutturato appunto come un questionario.

Oltre alle caratteristiche strutturali ed impiantistiche del tunnel, attraverso questo strumento vengono definite anche tutte le altre proprietà che concorrono alla definizione delle conseguenze di un possibile evento all'interno del tunnel: si definiscono cioè anche le caratteristiche di traffico della galleria e dei veicoli presenti, nonché quelle dell'ipotetico incendio di cui si studia l'evoluzione.

Le informazioni richieste sono raggruppate in quattro sottogruppi: informazioni generiche, caratteristiche della galleria, caratteristiche dell'evento incidentale, caratteristiche dei veicoli.

Tutte le domande presenti nel questionario sono di natura quantitativa⁴⁰. In alcuni casi è semplicemente richiesto di indicare la presenza/assenza di un particolare elemento impiantistico o scegliere tra diverse alternative, in altri è richiesto di specificare la quantità della misura analizzata.

Alcune domande sono di natura tipologica; ad esempio si richiede la tipologia di sistemi di comunicazione presenti, o la tipologia del sistema di ventilazione meccanizzata.

Se alcuni dati non sono noti, si attribuisce il valore peggiore possibile, applicando un approccio cautelativo e a favore di sicurezza.

Si ricorda che si ipotizza che la presenza di un impianto ne implichi il funzionamento. Per tale ragione non è prevista una distinzione tra dispositivo 'presente' e 'presente funzionante'.

⁴⁰ La forma quantitativa si basa solitamente sull'attribuzione di un punteggio, corrispondente ad una scala di valori studiata appositamente per ogni elemento valutato; si differenzia dalla forma qualitativa che prevede di esprimere i risultati tramite giudizi

Le informazioni richieste sono state identificate come quelle maggiormente significative per la definizione del risultato conseguito. Il numero esiguo di informazioni richieste è compensato da un'elevata bontà delle stesse: s'intende cioè che l'informazione oltre ad essere vera deve essere anche completa⁴¹.

Lo strumento è configurato in maniera sintetica e semplice. Le maschere di inserimento sono di diversi tipi, selezionate dal menu dello strumento di calcolo.

La prima tipologia è quella destinata all'inserimento di un semplice numero.

La seconda tipologia è invece la '*casella di controllo*', che presentano in genere un quesito relativo alla presenza o assenza di un dispositivo. Per la scelta tra diverse situazioni possibili si utilizzano i '*pulsanti di opzione*'.

Per evitare eventuali condizionamenti dell'utente, si è scelto di non raggruppare le informazioni richieste in base agli indicatori e livelli di importanza: si può ragionevolmente pensare che a richieste più pesanti (intendendosi con maggior peso nel calcolo finale) risponderebbe con maggior attenzione che altre. Le figure 29:45 illustrano il questionario descritto, dove si possono riconoscere gli strumenti di controllo appena definiti.

3.1.2.1 Informazioni generiche

In questa prima parte del questionario si identifica il tunnel analizzato, indicandone la posizione geografica e la classe stradale di appartenenza. Vengono indicati la direzionalità del tunnel (se prevede un solo senso di marcia o 2 sensi di marcia), il numero di corsie presenti, la lunghezza, nonché informazioni riguardanti il traffico presente; in particolare si indica il valore di TGM previsto⁴², la velocità dei veicoli⁴³, lo spettro di traffico del tunnel⁴⁴ e l'eventuale possibilità di trasportarvi merci classificate come pericolose⁴⁵.

Come visibile in figura, vengono definiti anche i coefficienti di occupazione dei diversi tipi di veicoli e il coefficiente dell'ora di punta: questi valori sono reimpostati, ma possono essere modificati dall'utente direttamente dal questionario.

⁴¹ L'eventuale non funzionamento o funzionamento inadeguato di un dispositivo viene comparato all'assenza dello stesso: se un dispositivo è presente significa anche poter fare affidamento su di esso

⁴² Caratterizzante il tratto di strada e reperibile da analisi di dati storici

⁴³ Velocità media o massima

⁴⁴ % veicoli pesanti-bus

⁴⁵ I diversi tipi di materiali pericolosi trasportabili e relative misure di sicurezza, accennati al paragrafo 2.1.2.1., sono riportate nel regolamento ADR

QUESTIONARIO GALLERIA

INFORMAZIONI GENERICHE

<p>nome <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>località <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>tratto stradale di appartenenza <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>gestore <input style="width: 100%;" type="text"/></p>	<p><i>caratteristiche tecniche generali</i></p> <p>la galleria è <input checked="" type="radio"/> monodirezionale <input type="radio"/> bidirezionale</p> <p>numero corsie <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="2"/></p> <p>lunghezza galleria <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="3500"/> m</p> <p>traffico giornaliero medio (TGM) <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="4200"/> veicoli/giorno</p> <p>velocità (<i>v media o vmax se nn disponibile</i>) veicoli leggeri <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="75"/> km/h pesanti-autobus <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="60"/> Km/h</p> <p>spettro di traffico % veicoli pesanti <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="14"/> % % autobus <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="1"/> %</p> <p>trasporto ADR <input type="radio"/> consentito <input checked="" type="radio"/> non consentito</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<i>coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:</i>		
coefficienti di occupazione veicoli:		
leggeri		1,5
pesanti		1
autobus		30
coefficiente ora di punta		2,6

Figura 29: Prima parte del questionario utilizzato per definire le caratteristiche della galleria analizzata (i valori riportati hanno scopo puramente indicativo)

3.1.2.2 Definizione caratteristiche galleria

Questa fase prevede la definizione di una serie di caratteristiche impiantistiche precedentemente selezionate: queste verranno poi successivamente suddivise in indicatori, all'interno dei quali verranno definiti diversi pesi in funzione dell'importanza attribuita.

Si richiedono in particolare informazioni riguardanti:

Uscite di sicurezza

Come previsto dalla normativa, le uscite di sicurezza devono consentire agli utenti di abbandonare a piedi la galleria e raggiungere un luogo sicuro in caso di incidente o incendio.

Nel modello è chiesto di identificarne il numero presente nel tunnel, e indicare un valore di interdistanza⁴⁶: se questa risulta irregolare, viene richiesto di indicare il valore più vincolante (ossia il valore di interdistanza massimo presente tra 2 uscite).

Possibili vie di fuga sono considerate gli ingressi delle gallerie, presente inevitabilmente in ognuna di esse; in molte gallerie, specialmente quelle di lunghezza considerevole, possono esserci delle vie di fuga laterali, presenti ad una certa distanza l'una dall'altra. Nel caso di

⁴⁶ Distanza tra 2 elementi contigui

gallerie parallele, possono esserci dei by-pass che collegano le due gallerie, e che possono rappresentare una via di fuga in caso d'incendio di una delle due.

The image shows two screenshots of a questionnaire interface for safety exits. The top screenshot is titled 'USCITE DI SICUREZZA' and contains the following fields: 'numero uscite di sicurezza' with a text input containing '2'; 'interdistanza' with radio buttons for 'regolare' (unchecked) and 'non regolare' (checked); and 'inserire valore interdistanza massima tra 2 uscite' with a text input containing '600' and a unit 'm'. The bottom screenshot is also titled 'USCITE DI SICUREZZA' and contains: 'numero uscite di sicurezza' with a text input containing '12'; 'interdistanza' with radio buttons for 'regolare' (checked) and 'non regolare' (unchecked); and 'inserire valore interdistanza tra uscite' with a text input containing '200' and a unit 'm'.

Figura 30 a-b: Questionario, uscite di sicurezza

Sistema di ventilazione

Come precedentemente esposto⁴⁷, la presenza e l'adeguatezza di un impianto di ventilazione meccanizzata è uno degli elementi principali per la determinazione delle conseguenze di un evento incidentale in galleria, in particolare in caso di incendio.

Attraverso il questionario viene definito il tipo di impianto, se presente, attraverso 4 possibili scelte: è prevista la presenza di un sistema longitudinale, trasversale o semitrasversale; la quarta opzione prevede l'assenza di un impianto di ventilazione meccanizzato.

Vi è inoltre la possibilità di specificare la presenza di un impianto di aspirazione fumi⁴⁸.

The image shows a screenshot of a questionnaire interface for mechanical ventilation. The title is 'SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANIZZATA'. It contains two main sections: 'sistema di ventilazione presente' with radio buttons for 'longitudinale' (unchecked), 'semitrasversale' (unchecked), 'trasversale' (checked), and 'non presente' (unchecked); and 'impianto di aspirazione fumi' with radio buttons for 'presente' (unchecked) and 'non presente' (checked). There is also a small empty text input field at the bottom.

⁴⁷ Capitolo 3, paragrafo 3.1.1

⁴⁸ Che risulta fondamentale solo in caso di sistema di ventilazione longitudinale

SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANIZZATA

sistema di ventilazione presente

longitudinale
 semitrasversale
 trasversale
 non presente

impianto di aspirazione fumi

presente
 non presente

fumi spostati verso entrata o uscita?
 (specificare ENTRATA o USCITA)

USCITA

Figura 31.a-b: Questionario, sistema di ventilazione; sotto particolare caso di galleria bidirezionale con sistema di ventilazione longitudinale

Nel particolare caso in cui si vada a studiare un evento in galleria bidirezionale e con sistema di ventilazione longitudinale⁴⁹ viene richiesto di indicare la direzionalità dei fumi imposta dall'impianto.

La differenza tra entrata e uscita è scelta arbitrariamente dall'utente, ed è specificata unicamente per motivi di calcolo all'interno nel modello, come si vedrà in seguito⁵⁰.

Segnaletica

In questa parte sono definite le caratteristiche dei diversi sistemi di segnaletica presenti nel tunnel e all'esterno di esso.

Viene in primo luogo analizzata la segnaletica esterna: deve essere specificato se è previsto un sistema di chiusura della galleria in caso di necessità, e successivamente si identificano gli impianti eventualmente presenti, selezionando tra semafori, pannelli a messaggio variabile e barriere all'imbocco (la presenza di più dispositivi contemporaneamente aumenta la funzionalità degli impianti stessi)⁵¹.

Successivamente si analizza la segnaletica interna, ed in particolare la segnaletica di emergenza: ne viene specificata l'eventuale presenza, e si evidenziano poi i dispositivi presenti. Vi è anche qui la possibilità di scegliere tra semafori, pannelli a messaggio variabile e barriere: si sottolinea che sono specificatamente richiesti dal dlgs 264/2006 per il solo

⁴⁹ Impianto assolutamente non adatto al tipo di galleria specificato, ma in alcuni casi ancora utilizzato

⁵⁰ Par. 3.1.2: qui sarà richiesto di definire, per galleria bidirezionale, la distanza dall'uscita di emergenza più vicina ad ognuno dei 2 forni, identificati con entrata e uscita: questa distinzione nasce esclusivamente per poter differenziare le 2 zone, che evidentemente risultano entrambi entrate ed uscite allo stesso tempo

⁵¹ Come specificato dal DLgs 264/2006 gli impianti adibiti alla chiusura della galleria sono in primo luogo i semafori, mentre pannelli a messaggio variabile e barriere sono indicati come dispositivi supplementari; è indubbio comunque che la presenza in particolare di questi ultimi porti ad un aumento di efficacia del sistema di chiusura

gruppo X⁵².

SEGNALETICA

esterna: sistema di chiusura galleria: selezionare i dispositivi presenti

<input checked="" type="radio"/> previsto	
<input type="radio"/> non previsto	

selezionare i dispositivi presenti

<input checked="" type="checkbox"/> semafori	
<input type="checkbox"/> pannelli a messaggio variabile	
<input type="checkbox"/> barriere all'imbocco	

interna: segnaletica di emergenza

selezionare i dispositivi presenti

<input checked="" type="radio"/> presente	
<input type="radio"/> non presente	

selezionare i dispositivi presenti

<input checked="" type="checkbox"/> semafori	
<input checked="" type="checkbox"/> pannelli a messaggio variabile	
<input type="checkbox"/> barriere	

Figura 32: Questionario, segnaletica

Illuminazione

Qui è semplicemente previsto che l'utente specifichi l'eventuale presenza dei 3 principali impianti di ventilazione prevedibili in galleria:

- impianto di illuminazione ordinaria
- impianto di illuminazione di emergenza
- impianto di illuminazione di sicurezza

ILLUMINAZIONE

illuminazione ordinaria

<input checked="" type="radio"/> presente	
<input type="radio"/> non presente	

illuminazione di emergenza

<input checked="" type="radio"/> presente	
<input type="radio"/> non presente	

illuminazione di di sicurezza

<input checked="" type="radio"/> presente	
<input type="radio"/> non presente	

Figura 33: Questionario, illuminazione

La presenza di un impianto di illuminazione ordinaria è necessario per garantire condizioni di visibilità e comfort adeguate agli utenti, è deve sempre essere prevista (ad eccezione di galleria particolarmente corte, dove comunque è fortemente consigliata).

L'illuminazione di emergenza deve garantire visibilità in caso di mancanza di alimentazione elettrica nel tunnel, per un periodo minimo di 30 minuti.

L'illuminazione di sicurezza, costituita dall'illuminazione delle vie di fuga, deve consentire

⁵² Per approfondimenti si rimanda a tabella 6 (“Gruppi omogenei di gallerie”)

all'utente in caso di necessità di individuare nel minor tempo possibile le uscite di sicurezza⁵³.

Sistema di rilevazione e controllo

Si richiede all'utente di specificare l'eventuale presenza di sistemi di rilevazione, con la possibilità di indicare sistemi di video-sorveglianza e rilevatori di fumo e/o incidenti (non evidenziare uno dei 2 sistemi corrisponde a dire che non sono presenti sistemi di rilevazione nel tunnel).

Questi dispositivi rivestono un ruolo fondamentale per la sicurezza degli utenti, in quanto sono generalmente collegati all'entrata in funzione degli impianti di emergenza (ad esempio illuminazione e ventilazione); possono essere servo-controllati⁵⁴ o gestiti da un centro di controllo.

Nel questionario è richiesto di specificare anche l'eventuale presenza appunto di un centro di controllo: questo è strettamente legato agli impianti che richiedono un controllo ed una gestione costante da parte degli operatori: la possibilità di verificare la necessità dell'entrata in funzione di impianti di emergenza da parte di un operatore, in continuo nelle 24 ore, aumenta notevolmente l'efficacia degli stessi impianti.

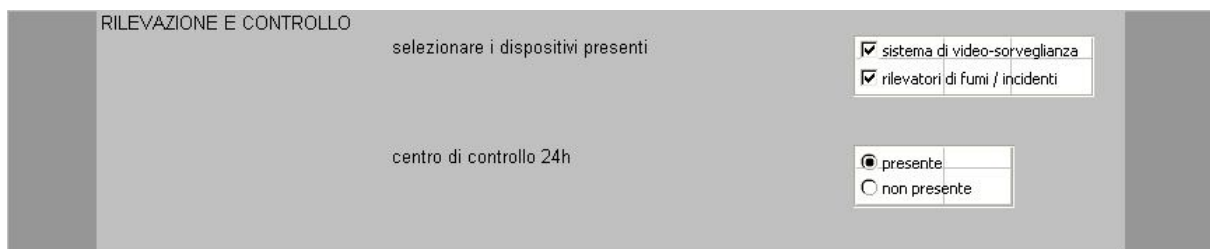


Figura 34: Questionario, sistemi di rilevazione e controllo

Stazioni di comunicazione di emergenza

La possibilità di comunicare tra operatori e utenti, soprattutto in caso di emergenza, è uno dei fattori fondamentali per la definizione della sicurezza, in quanto generalmente gli utenti non decidono di evacuare spontaneamente in caso di pericolo, se non quando questo è direttamente visibile. Ovviamente la tempestività dell'evacuazione determina anche le conseguenze di un eventuale evento incidentale.

Si prevede di indicare gli impianti previsti, selezionando tra telefoni, trasmissioni radio, altoparlanti e pulsanti d'allarme.

⁵³ Per approfondimenti vedere paragrafo 3.1.1.2

⁵⁴ In questo caso si prevede che gli impianti di emergenza entrino in funzione al superamento di determinate soglie di accettabilità delle condizioni rilevate

Questi sistemi di comunicazione hanno funzionalità ed efficacia diverse, in particolare perché alcuni permettono la comunicazione solo da operatori ad utente o viceversa, mentre altri permettono uno scambio completo di informazioni tra le 2 parti; è anche evidente che mentre alcuni di questi sistemi permettono di raggiungere tutti gli utenti, altri non lo consentono.

The screenshot shows a questionnaire section titled "STAZIONI DI COMUNICAZIONE EMERGENZA" with the instruction "selezionare i sistemi di comunicazione di emergenze previsti". To the right, there is a table with four rows and two columns. The first row has a checked checkbox and the text "telefoni per le emergenze". The second row has an unchecked checkbox and "trasmissioni radio". The third row has an unchecked checkbox and "altoparlanti". The fourth row has a checked checkbox and "pulsanti d'allarme".

<input checked="" type="checkbox"/>	telefoni per le emergenze
<input type="checkbox"/>	trasmissioni radio
<input type="checkbox"/>	altoparlanti
<input checked="" type="checkbox"/>	pulsanti d'allarme

Figura 35: Questionario, comunicazione di emergenza

Erogazione idrica

Il DLgs 264/2006 dà indicazioni precise su quali siano le installazioni necessarie per l'erogazione idrica in galleria: secondo le indicazioni all'interno di tali strutture è necessario fornire acqua per spegnere gli incendi, tramite idranti o valvole per manichette.

Nel questionario si richiede semplicemente di definire l'eventuale presenza di un impianto idrico antincendio ed in particolare di idranti: si chiede di evidenziare l'interdistanza tra questi ultimi, specificando di inserire il valore più vincolante se non regolare (quindi il valore di interdistanza massima tra 2 idranti contigui)⁵⁵.

The screenshot shows a questionnaire section titled "EROGAZIONE IDRICA" with the instruction "impianto idrico antincendio". To the right, there are two radio buttons: "presente" (selected) and "non presente". Below this, there is a text input field containing "220" followed by "m". The text above the input field reads "inserire valori interdistanza idranti (se presenti) (se non regolare inserirer valore maggiore)".

Figura 36: Questionario, sistema di erogazione idrica

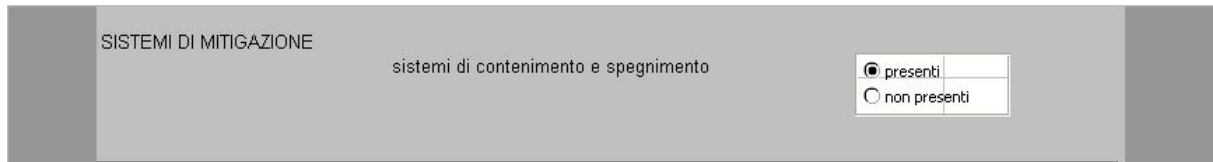
Sistemi di mitigazione

La presenza di questi sistemi, come già illustrato nei paragrafi precedenti, ha il principale scopo di garantire un minor danno ad utenti e strutture coinvolte in un'emergenza, in particolare in caso di incendio: all'aumentare delle dimensioni dell'incendio si registra una perdita di utilità.

Si richiede all'utente di specificare l'eventuale presenza di sistemi di contenimento e spegnimento (senza specificarne le caratteristiche) semplicemente selezionando uno tra i

⁵⁵ Nel questionario si prevede che non specificare un valore di interdistanza tra gli idranti equivalga all'assenza degli stessi

pulsanti d'opzione “presente” e “non presente”.



SISTEMI DI MITIGAZIONE

sistemi di contenimento e spegnimento

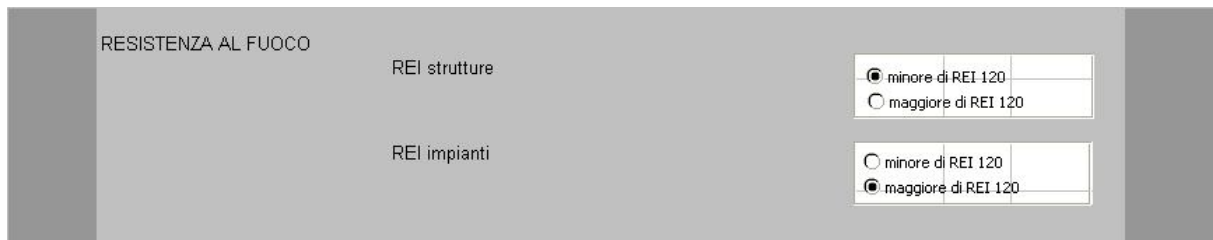
presenti

non presenti

Figura 37: Questionario, sistemi di mitigazione

Resistenza al fuoco

E' definito un valore di resistenza al fuoco di strutture e impianti pari a REI 120: si chiede all'utente di indicare se le caratteristiche di resistenza al fuoco della struttura e degli impianti della galleria corrispondono ad un valore maggiore o minore di questo.



RESISTENZA AL FUOCO

REI strutture

minore di REI 120

maggiore di REI 120

REI impianti

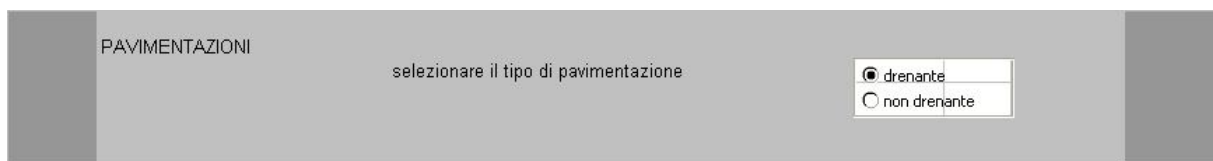
minore di REI 120

maggiore di REI 120

Figura 38: Questionario, resistenza al fuoco strutture e impianti

Pavimentazioni

Un'altra caratteristica richiesta riguarda la tipologia di pavimentazione presente: come indicato nel par. 3.1.1 si sconsiglia in galleria l'utilizzo di asfalto drenante.



PAVIMENTAZIONI

selezionare il tipo di pavimentazione

drenante

non drenante

Figura 39: Questionario, pavimentazione

Drenaggi

Come già illustrato, il sistema di drenaggio è fondamentale per allontanare dalla piattaforma stradale eventuali liquidi infiammabili; nel foglio qui descritto si richiede di specificare la presenza o assenza di tale sistema, e l'eventuale possibilità di dreno di liquidi infiammabili: in questo caso si considerano elementi drenanti in grado di impedire la propagazione della

fiamma⁵⁶.

DRENAGGI

sistema di drenaggio della piattaforma stradale

presente
 non presente

se previsto:

è previsto drenare liquidi infiammabili

Figura 40: Questionario, sistemi di drenaggio

Accesso mezzi di contenimento

In questo caso si considera la possibilità da parte dei mezzi di soccorso di raggiungere nel più breve tempo possibile la zona dell'evento: le 3 possibilità previste sono la presenza di collegamenti tra fornici (prevedibili solo in caso di galleria a doppia fornice, con 2 canne unidirezionali), la presenza di gallerie carrabili, o l'esistenza di stazioni di emergenza all'interno del tunnel (prevedibile per gallerie particolarmente importanti). Viene anche richiesto di inserire l'interdistanza tra questi, supponendo che un numero maggiore di accessi (o di stazioni dei VVF presenti) ne aumenti la funzionalità.

ACCESSO MEZZI DI CONTENIMENTO

selezionare accessi presenti
(collegamento fornici solo per monodirezionale)

collegamenti tra fornici
(solo per monodirezionali)
 gallerie carrabili
 stazioni in loco

inserire valore interdistanza accessi (se presenti)
(se interdistanza non regolare inserire valore maggiore)

2900 m

Figura 41: Questionario, accesso mezzi di soccorso

Si evidenzia che nel modello di calcolo è prevista la possibilità che eventuali mezzi di contenimento possano aumentare il limite massimo di permanenza del tunnel degli utenti, ma non possano spegnere l'incendio⁵⁷.

3.1.2.3 Definizione evento

Questa parte del questionario permette di definire l'evento incidentale che porta all'incendio all'interno del tunnel definito nella precedente fase. In particolare si definisce il tipo di

⁵⁶ Viene evidenziata la differenza tra sistemi in grado di drenare liquidi infiammabili e sistemi dotati anche della possibilità di drenare liquidi già in fiamme senza subire danni

⁵⁷ Nel modello l'incendio si sviluppa e si consuma in ogni caso, con tempi e modalità diversi a seconda degli impianti e delle diverse caratteristiche previste

veicolo/i coinvolti nell'evento iniziatore, si posiziona l'evento nel tunnel, e si dà la possibilità di definire una condizione di visibilità .

Per quanto riguarda i veicoli coinvolti, viene fatta una distinzione tra 3 categorie: automobili, veicoli pesanti, e veicoli trasportanti merci pericolose.

Questa suddivisione è legata alle diverse potenze di fuoco scaturibili dai diversi veicoli, sia in relazione alle dimensioni che alle merci trasportate.

In genere si prevede una potenza dell'incendio crescente al crescere delle dimensioni dei veicoli coinvolti, con situazioni particolarmente gravose se risultano coinvolte merci classificate come pericolose⁵⁸; valori indicativi sono riportati in tabella.

Evento	Potenza associata
Piccoli incendi (automobili)	5-10 MW
Incendi di veicoli pesanti	20-30 MW
Grossi incendi(merce pericolosa)	100-200 MW

Tabella 9: Valori comunemente rappresentanti la potenza di un incendio in funzione del tipo di veicolo da cui scaturisce

Per quanto riguarda la posizione dell'incendio, questa risulta fondamentale per la determinazione delle conseguenze ad esso legate.

A seconda del tipo di galleria, in base alla posizione dell'evento risulteranno coinvolte un numero variabili di persone; in caso ad esempio di gallerie monodirezionali i due casi estremi sono rappresentati dal posizionamento dell'evento iniziatore in corrispondenza dell'entrata o dell'uscita del tunnel: nel primo caso non si avranno decessi, in quanto l'ingresso alla galleria risulta impedito ad ogni veicolo (ad eccezione di quelli presenti precedentemente all'evento, che è logico presupporre si allontanino da questo senza problemi); nel secondo caso invece, il numero di utenti in grado di entrare in galleria (determinabile con un modello di formazione code) risulta massimo.,Particolarmente rilevante risulta anche posizionare l'evento in relazione alle diverse uscite di sicurezza presenti, il cui raggiungimento determina la salvabilità degli utenti coinvolti nell'incendio. Si richiede di specificare la distanza dell'uscita più vicina all'evento, ed in funzione dell'interdistanza precedentemente definita il modello calcola questa distanza per tutte le uscite presenti nel tunnel.

⁵⁸ Il trasporto di merci pericolose in galleria è trattato al paragrafo 2.3.2.1

DEFINIZIONE EVENTO INCIDENTALE

veicoli coinvolti nell'evento incidentale

<input checked="" type="checkbox"/>	automobili	
<input type="checkbox"/>	veicoli pesanti	
<input type="checkbox"/>	veicoli trasportanti merci pericolose	

posizione incendio

distanza da entrata galleria m
(se galleria bidirezionale indicare distanza minore)

distanza da uscita galleria (= lunghezza - dist. entrata) m

distanza uscite di emergenza più vicine a monte e a valle dell'evento* m
(in caso di galleria monodirezionale considerare solo le uscite posizionate nella direzione dei veicoli in coda)

condizioni di visibilità**

1 2 3

(1 corrisponde a condizioni standard, 2 prevede condizioni di fumo denso, 3 condizioni di fumo molto denso)

**il modello è impostato in base a condizioni di visibilità mediamente presenti in seguito ad un incendio in galleria: qui è possibile prevedere delle condizioni peggiori, date per esempio da fumi particolarmente densi

Figura 42: Questionario, definizione delle caratteristiche dell'evento incidentale

Come si vede in figura è anche prevista la possibilità di definire delle condizioni di visibilità particolarmente gravose: sono previste tre diverse possibilità, partendo dalla situazione definita standard e passando a fumo denso e fumo molto denso.

L'aumento di densità del fumo è legato principalmente alle sostanze coinvolte nell'incendio: esistono ad esempio particolari sostanze il cui incendio porta alla formazione di fumo particolarmente rapida e con caratteristiche molto gravose per la visibilità.

3.1.2.4 Caratteristiche veicoli

In questa ultima fase del questionario si definiscono le dimensioni dei veicoli e le relative interdistanze.

Per rendere l'analisi il più oggettiva possibile, sono individuati 3 tipi di veicoli rappresentativi (automobili, veicoli pesanti, bus), e per ognuno viene indicata una lunghezza media; Viene poi definita un'interdistanza.

Il modello, come sarà esposto in seguito, prevede di suddividere la galleria in zone, di dimensioni diverse a seconda del tipo di evento analizzato e delle caratteristiche della galleria definite.

All'interno di una stessa zona, il valore di interdistanza si prevede costante, indipendentemente dai veicoli presenti.

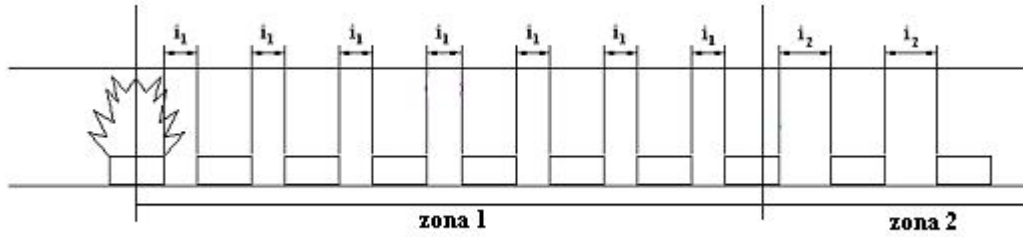


Figura 43: Schematizzazione della disposizione dei veicoli incolonnati:⁵⁹

I diversi valori sotto indicati sono pre-impostati nel modello, ma possono essere eventualmente variati dall'utente semplicemente sovrascrivendo quelli presenti.

CARATTERISTICHE VEICOLI			
lunghezza media mezzi: (i valori preimpostati possono essere modificati dall'utente direttamente da qui)	automobili	5	m
	veicoli pasanti	12	m
	bus	12	m
interdistanza veicoli: (variabile in base alla vicinanza della zona in cui si sviluppa l'incendio)	zona 1 (zona più vicina all'evento)	1	m
	zona 2	2	m
	zona 3	3	m
	zona 4 (zona più lontana dall'evento)	5	m
le zone evidenziano una distanza crescente dall'evento:	zona 1	da 0	a 100 m
	zona 2	da 100	a 200 m
	zona 3	da 200	a 350 m
	zona 4	da 350	a 1550 m

Figura 44: Questionario, definizione delle caratteristiche dei veicoli: in questo caso si ipotizza che l'interdistanza aumenti all'aumentare della distanza dall'evento⁶⁰

A questo punto, la situazione che si va a studiare risulta definita, avendo a disposizione tutti i dati necessari per l'elaborazione: caratteristiche del tunnel, del traffico e dell'evento incidentale, che rappresentano quindi i dati di input della trattazione.

La fase successiva alla raccolta dei dati è l'elaborazione degli stessi.

⁵⁹ Come si vede, nella zona 1 (come in tutte le altre zone) si ha un univoco valore di interdistanza tra i veicoli, indicato in figura con i (passando da una zona all'altra si può invece prevedere di variare questo valore)

⁶⁰ Questa ipotesi viene fatta presupponendo che aumentando la distanza dall'evento incidentale, un'utente sia in grado di arrestare il veicolo prontamente vedendo i mezzi che lo precedono in coda; si ipotizza valori relativamente bassi, presupponendo che l'utente in coda con veicolo fermo cerchi di avvicinarsi il più possibile a quello che lo precede

3.1.3 Impostazione del foglio di calcolo

Il processo di definizione delle conseguenze è suddivisibile in alcune fasi: in primo luogo è necessario raccogliere le informazioni; successivamente queste devono essere correlate tra loro in indicatori, che andranno a definire i diversi parametri utilizzati nel calcolo finale.

I dati definiti dal questionario, sono elaborati in un opportuno foglio di calcolo: come previsto dal programma di elaborazione utilizzato, ad ogni quesito è associata una casella di controllo, in cui ad ogni risposta data nel precedente questionario è associato un valore numerico o letterale⁶¹, che può essere facilmente utilizzato nella modellazione.

Come già descritto, le informazioni richieste nel questionario sono suddivise in caratteristiche generali, caratteristiche dell'evento incidentale e caratteristiche proprie della galleria analizzata.

Queste ultime sono poi suddivise in 4 sottogruppi, e saranno la base per lo sviluppo di altrettanti sottomodelli che verranno descritti nei prossimi paragrafi: uno per il calcolo del tempo di chiusura della galleria (se gli impianti presenti lo consentono), un sottomodello per la definizione del tempo di premovimento, uno per la definizione del tempo massimo di permanenza, l'ultimo per il calcolo della velocità di esodo degli utenti in fuga.

In figura 45 si riporta il foglio di elaborazione dati appena descritto.

⁶¹ Ad ogni opzione viene assegnato un numero, se è prevista un'opzione a scelta multipla, o una scritta ('VERO' o 'FALSO') in caso sia proposta una scelta univoca

<i>caratteristiche galleria:</i>			
<i>uscite di sicurezza:</i>			
	numero		5
	interdistanza(1=regolare 2=non regolare)		1
	valore interdistanza		333
<i>caratteristiche che condizionano t_{chiusura}:</i>			
	sistema chiusura galleria(1=previsto, 2=non)		1
	sistemi di comunicazione	telefoni	VERO
		pulsanti allarme	VERO
	sistemi di rilevazione-controllo	video-sorveglianza	VERO
		rilevatore fumi	VERO
		centro di controllo (1=presente, 2=assente)	1
	segnaletica	semafori	VERO
		pannelli mex variabile	FALSO
		barriere imbocchi	VERO
<i>caratteristiche che influenzano V_{esodo}:</i>			
	illuminazione	ordinaria	1
		di emergenza	1
		di sicurezza	1
		(1=presente, 2=assente)	
	ventilazione	sistema ventilazione	3
		(1=longitudinale, 2=trasversale, 3=semitrasversale, 4=non presente)	
		impianto aspiraz. fumi	1
	segnaletica d'emergenza (1=presente, 2=non)		1
<i>caratteristiche che influenzano t_{max}(tempo massimo di permanenza in zone):</i>			
	drenaggi	drenaggio piattaforma	1
		(1=previsto, 2=non previsto)	
		dreno incombustibili	FALSO
	pavimentazione (1=drenante, 2=non drenante)		2
	sistemi di mitigazione (1=presenti, 2=non presenti)		1
	resistenza al fuoco	REI	1
		(1=REI<120, 2 >=)	
		dispositivi x resistenza impianti	1
		(1=presenti, 2=non)	
	erogazione idrica	impianto idrico antincendio	2
		(1=presente, 2=non)	
		interdist. Idranti	0 m
	accesso mezzi di soccorso e contenimento	collegamenti fornici	VERO
		gallerie carrabili	VERO
		mezzi in loco	FALSO
		interdistanza accessi	1000 m
<i>caratteristiche che condizionano t_{premov.}:</i>			
	sistemi di sistemi di comunicazione	altoparlanti	FALSO
		trasmissioni radio	VERO
	segnaletica segnaletica interna	semafori	FALSO
		pannelli mex var.	VERO
		barriere	FALSO
	sistemi di sistemi di rilevazione-controllo		SI

Figura 45: Foglio di calcolo, riepilogo dei dati forniti nel questionario

3.2 Evoluzione del flusso del pericolo e salvabilità degli utenti: il modello proposto

Come definito ad inizio capitolo, fondamentale nella definizione delle conseguenze associate ad un evento critico sono le condizioni di esodo degli utenti.

Dopo aver definito le caratteristiche del tunnel, il passo successivo è la definizione di zone di cui definire il livello di pericolo: si parla appunto di zonizzazione del flusso del pericolo.

3.2.1 zonizzazione del flusso del pericolo

Sono previsti tre livelli di severità, in funzione del tipo di veicolo/i coinvolti nell'evento incidentale che porta all'incendio: come definito nel questionario precedentemente esposto sono considerate tre tipologie di veicoli, automobili, veicoli pesanti e veicoli trasportanti materiale pericoloso, con un peggioramento progressivo delle conseguenze associate all'evento passando dalla prima all'ultima.

Il modello di calcolo presentato individua, in base alla lunghezza del tunnel, da 1 a 4 zone a partire dall'evento iniziatore (di dimensioni diverse in base alla severità dell'evento); in funzione delle caratteristiche impiantistiche della galleria, a ciascuna zona sono associati diversi tempi di permanenza massima e diverse velocità di esodo, variabile nello spazio e nel tempo.

Il tempo di massima permanenza di ognuna delle zone individuate e le velocità ad esse associate sono definiti in base alle caratteristiche strutturali ed impiantistiche del tunnel individuate in figura 60.

Si procede nel seguito a descrivere in dettaglio la definizione dei 2 parametri.

3.2.1.1 Tempo di massima permanenza

Come accennato sopra, si prevede di suddividere la galleria in zone, di dimensioni variabili in base alle caratteristiche dell'incendio.

In figura 46 si può vedere la suddivisione prevista in caso di galleria unidirezionali; per gallerie bidirezionali si prevede la stessa suddivisione, simmetrica rispetto all'evento⁶².

⁶² Ad eccezione del particolare caso in cui si preveda un impianto di ventilazione longitudinale associato ad una galleria bidirezionale: in questo caso le dimensioni delle zone nelle 2 direzioni risulteranno diverse, prevedendo che nella zona sfavorita dalla ventilazione le condizioni di vivibilità peggiorino più rapidamente

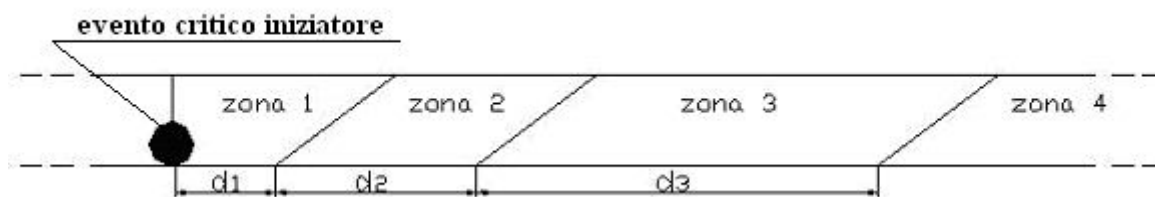


Figura 46: Modellazione del tunnel prevista dal modello: le dimensioni delle diverse zone sono variabili in funzione delle caratteristiche dell'evento e delle dotazioni impiantistiche presenti (caso di galleria unidirezionale)

Le dimensioni delle zone variano in funzione della severità dell'evento iniziatore che porta all'incendio, definita dai veicoli coinvolti: sono previste tre situazioni corrispondenti ai tre tipi di veicoli considerati.

I 3 possibili scenari sono:

- autovetture

$$d_1 = 50 \text{ m}$$

$$d_2 = 100 \text{ m}$$

$$d_3 = 180 \text{ m}$$

- veicoli pesanti

$$d_1 = 70 \text{ m}$$

$$d_2 = 130 \text{ m}$$

$$d_3 = 250 \text{ m}$$

- veicoli trasportanti merci pericolose

$$d_1 = 100 \text{ m}$$

$$d_2 = 200 \text{ m}$$

$$d_3 = 350 \text{ m}$$

Questa diversificazione nasce dalla supposizione che prevede che all'aumentare della severità dell'evento le condizioni di esodo peggiorino, quindi aumenti la permanenza in ogni zona⁶³.

la zona più lontana dall'evento (zona 4) sarà data dalla distanza tra la sopra definita zona 3 e l'imbocco della galleria. Se l'evento si verifica a ridosso di uno degli imbocchi, è prevista la possibilità che non siano presenti tutte e 4 le zone: in base alla distanza tra l'imbocco e l'evento iniziatore si definiscono le dimensioni delle zone presenti.

⁶³ Passando da incendio di autovettura a veicolo classificato ADR si ha un aumento dello spazio da percorrere in ogni zona; a ciascuna zona sono associate velocità di esodo decrescenti avvicinandosi all'evento: una maggior lunghezza della zona implica un tempo di esodo ad una velocità limitata per un periodo maggiore

Ad ogni zona sono associati dei tempi di permanenza massimi, definiti in base alle dotazioni impiantistiche della galleria: dotazioni migliori consentiranno un tempo di permanenza maggiore, legato in particolare alla più lenta diffusione nel tunnel di condizioni sfavorevoli all'autosalvataggio.

In base alle caratteristiche di impianti e apparati, si definisce un punteggio: il valore di tale punteggio verrà ad attribuire una classe a cui sono associati diversi valori del periodo di permanenza massima.

Sistema analizzato	stato	PUNTEGGIO	
1. sistema di ventilazione meccanizzata	longitudinale	1,5	
	semitrasversale	2	
	trasversale	3	
	assente	-8	
2. impianto di aspirazione fumi (solo per ventilazione non trasversale)	presente	1	
	assente	0	
3. sistema di drenaggio	presente	1	
	non presente	0	
dreno liquidi infiammabili	previsto	1	
	non previsto	0	
4. pavimentazione	drenante	-1	
	non drenante	0	
5. REI strutture	> 120	1	
	< 120	0	
6. REI impianti	> 120	1	
	< 120	0	
7. impianto idrico antincendio	presente	1	
	non presente	0	
	interdistanza idranti	< 100 m	0,5
		100 : 200 m	0,25
	> 250 m	0	
8. accesso mezzi di contenimento	bypass fornici	0,7	
	gallerie carrabili	1	
	stazione VVF in loco	1,5	

interdistanza accessi	< 500 m	0,5
	500 : 1000 m	0,25
	> 1000 m	0

Tabella 10: Assegnazione dei punteggi alle diverse dotazioni impiantistiche analizzate per la definizione del tempo di massima permanenza

La somma di tali punteggi definisce una delle 3 fasce previste:

punteggio totale	fascia definita
-8 : 4	fascia 3 (situazione peggiore)
4 : 7,5	fascia 2
7,5 : 10,5	fascia 1 (situazione migliore)

In figura è riportato un esempio del foglio di calcolo appena descritto.

DEFINISCO t _{max}						punteggio
			ventilazione meccanizzata	trasversale		3
			impianto di aspirazione fumi	presente		0
			drenaggi	si		1
			dreno infiammabili	no		0
			pavimentazione	non drenante		0
			resistenza al fuoco			
			strutture	REI<120		0
			dispositivi antincendio impianti	non presenti		0
			impianto idrico antincendio	presente		1
			interdistanza idranti	140	m	0,25
			accesso mezzi di contenimento	bypass		0,7
			interdistanza accessi	750	m	0,25

somma punteggio=	6,2
risulta fascia	1

Figura 47: Foglio di calcolo, tempo di massima permanenza nelle diverse zone del tunnel, definizione della fascia di appartenenza in base alle dotazioni impiantistiche previste

A ciascuna di queste fasce come detto corrisponde una diversa situazione in termini di tempo di permanenza: i valori variano in funzione anche del tipo di veicoli coinvolti nell'evento che porta all'incendio. Nelle tabelle sotto sono riportati i valori previsti.

1. MERCI PERICOLOSE												
	fascia 3				fascia 2				fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[min]	4	6	10	16	4,5	7	12	20	5	8	14	24
2. VEICOLI PESANTI												
	fascia 3				fascia 2				fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[min]	4,5	7	12	25	5	8	15	30	5,5	11	18	35
3. AUTOVETTURE												
	fascia 3				fascia 2				fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[min]	6	9	16	35	7	12	20	45	8	15	30	55

Figura 48: Foglio di calcolo, tempi di massima permanenza previsti nelle diverse zone al variare delle caratteristiche dell'evento incidentale iniziatore (tipo di veicoli coinvolti) e delle caratteristiche impiantistiche (la cui bontà è rappresentata nelle fasce 1,2,3)

Riepilogando il modello prevede di definire una fascia in base alle dotazioni impiantistiche presenti, e alla fascia definita corrisponderanno diversi valori di tempo di permanenza massimo nelle 4 zone, differenziati anche in base alle caratteristiche dell'evento iniziatore.

Come detto per le dimensioni spaziali delle fasce, anche in questo caso nella particolare situazione di galleria bidirezionale con impianto di ventilazione longitudinale alla direzione del tunnel sfavorita dalla ventilazione vengono attribuiti i valori corrispondenti alla fascia 3 (cioè la situazione peggiore).

3.2.1.2 Velocità di esodo

Il modello di elaborazione implementato prevede di definire a seconda della severità dell'evento e delle dotazioni impiantistiche della galleria dei valori di velocità di esodo associati agli utenti variabili nello spazio e nel tempo, coerentemente a quanto definito precedentemente⁶⁴.

Per cercare di rendere il più oggettivo possibile il problema, si prevede con il passare del tempo di esposizione il peggioramento delle condizioni di esodo, in particolare diminuzione della visibilità, aumento della temperatura e aumento della concentrazione di inquinanti, nelle diverse zone individuate, corrispondente ad una definita diminuzione di velocità degli utenti in fuga, legata all'aumento di dosi inabilitanti assorbite.

Anche in questo caso tale diminuzione di velocità varia anche in base alla gravità dell'evento iniziatore che porta all'esodo degli utenti all'interno del tunnel.

⁶⁴ Al paragrafo 2.4.6 si evidenzia quanto le condizioni di esodo siano legate all'ambiente in cui lo stesso si svolge

La definizione dei valori di velocità è data dalle caratteristiche di:

- impianti di illuminazione
- segnaletica di emergenza
- impianto di ventilazione

In base alla presenza/assenza e alle caratteristiche di questi viene definito un punteggio, che anche in questo caso definisce una fascia (da 3, situazione peggiore, a 1, migliore): concorre alla determinazione di tale fascia anche la situazione di visibilità definita dall'utente nel questionario.

I punteggi definiti sono:

Sistema analizzato	stato	PUNTEGGIO
1. illuminazione ordinaria	presente	1,5
	assente	0
di emergenze	presente	1,5
	assente	0
di sicurezza	presente	2
	assente	0
2. segnaletica di emergenza	presente	1,5
	assente	0
3. sistema di ventilazione meccanizzata	longitudinale	1,5
	semitrasversale	2
	trasversale	3
	assente	-7
2. impianto di aspirazione fumi (solo per ventilazione non trasversale)	presente	1
	assente	0
5. visibilità	ordinaria	0
	fumo denso	-1
	fumo molto denso	-2

Tabella 11: Assegnazione dei punteggi alle diverse dotazioni impiantistiche analizzate per la definizione della velocità di esodo degli utenti in fuga

Come si nota nel caso degli impianti di illuminazione, viene data un'importanza maggiore agli impianti strettamente legati alla condizione di esodo, che possono risultare particolarmente

importanti nella definizione della salvabilità di un utente in fuga.

La somma di tali punteggi definisce una delle 3 fasce, così suddivise:

punteggio totale	fascia definita
-9 : 3,5	fascia 3 (situazione peggiore)
3,5 : 6,5	fascia 2
6,5 : 9,5	fascia 1 (situazione migliore)

DEFINISCO Vesodo						punteggio
		illuminazione	ordinaria	si		1,5
			di emergenza	si		1,5
			di sicurezza	si		2
		segnaletica d'emergenza		si		1,5
		ventilazione		longitudinale		1,5
		impianto aspiraz. Fumi		si		1
		visibilità		standard		0

somma punteggio=
9
risulta fascia
1

Figura 49: Foglio di calcolo, velocità di esodo nelle diverse zone del tunnel, definizione della fascia di appartenenza in base alle dotazioni impiantistiche definite

Ad ogni fascia corrispondono i seguenti valori, riportati in m/s:

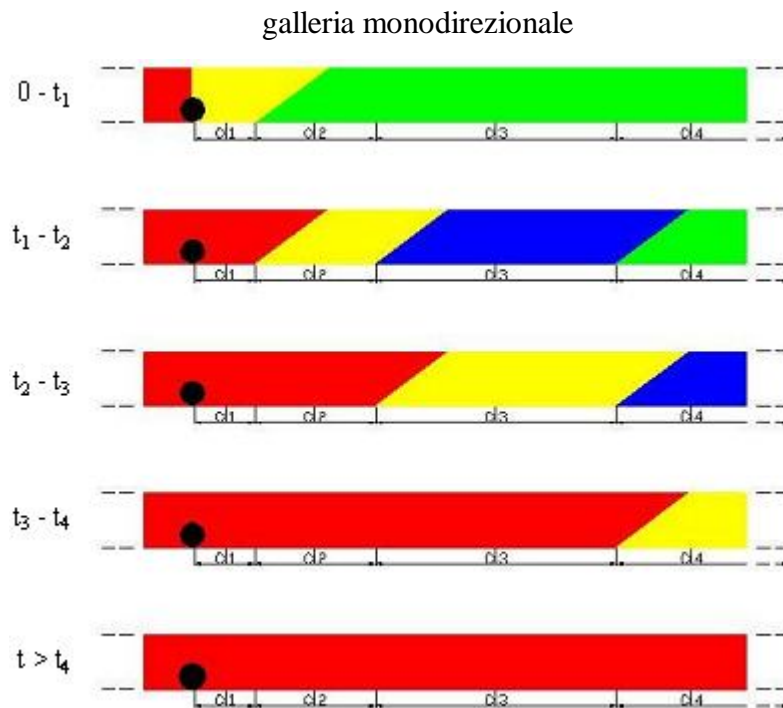
velocità di esodo [m/s] (a seconda dei valori sopra prevedo 3 diverse situazioni)												
1. MERCI PERICOLOSE												
intervallo	zona 1			zona 2			zona 3			zona 4		
caso	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0-t1	0,4	0,3	0,15	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t1-t2	0	0	0	0,4	0,3	0,15	0,6	0,5	0,35	1	1	1
t2-t3	0	0	0	0	0	0	0,4	0,3	0,15	0,6	0,5	0,35
t3-t4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,3	0,15
>t4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. VEICOLI PESANTI												
intervallo	zona 1			zona 2			zona 3			zona 4		
caso	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0-t1	0,6	0,5	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t1-t2	0	0	0	0,6	0,5	0,3	0,8	0,7	0,5	1	1	1
t2-t3	0	0	0	0	0	0	0,6	0,5	0,3	0,8	0,7	0,5
t3-t4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,5	0,3
>t4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. AUTOVETTURE												
intervallo	zona 1			zona 2			zona 3			zona 4		
caso	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0-t1	0,75	0,6	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t1-t2	0	0	0	0,75	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	1	1	1
t2-t3	0	0	0	0	0	0	0,75	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7
t3-t4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,6	0,5
>t4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 50: Valori di velocità considerati dal modello per le varie zone spaziali e fasce temporali, al variare del tipo di evento considerato (auto, veicoli pesanti, merci pericolose) e delle dotazioni impiantistiche indicate (fascia 1,2,3)

Gli intervalli temporali che definiscono le varie velocità, variano in funzione dei veicoli coinvolti nell'impatto, e corrispondono ai periodi di permanenza massima previsti⁶⁵.

In figura 51 si riporta una schematizzazione dei valori sopra riportati: in caso di galleria bidirezionale, la situazione nelle due direzioni sarà simmetrica rispetto all'evento⁶⁶.

Intervalli temporali:



⁶⁵ Vedi figura 48

⁶⁶ Ad eccezione del caso in cui si abbia in galleria bidirezionale un impianto di ventilazione longitudinale: in questa particolare situazione è previsto che nella direzione 'svantaggiata' dall'impianto di ventilazione si considerino i valori peggiori, in termini di velocità di esodo e tempo di permanenza nelle diverse zone

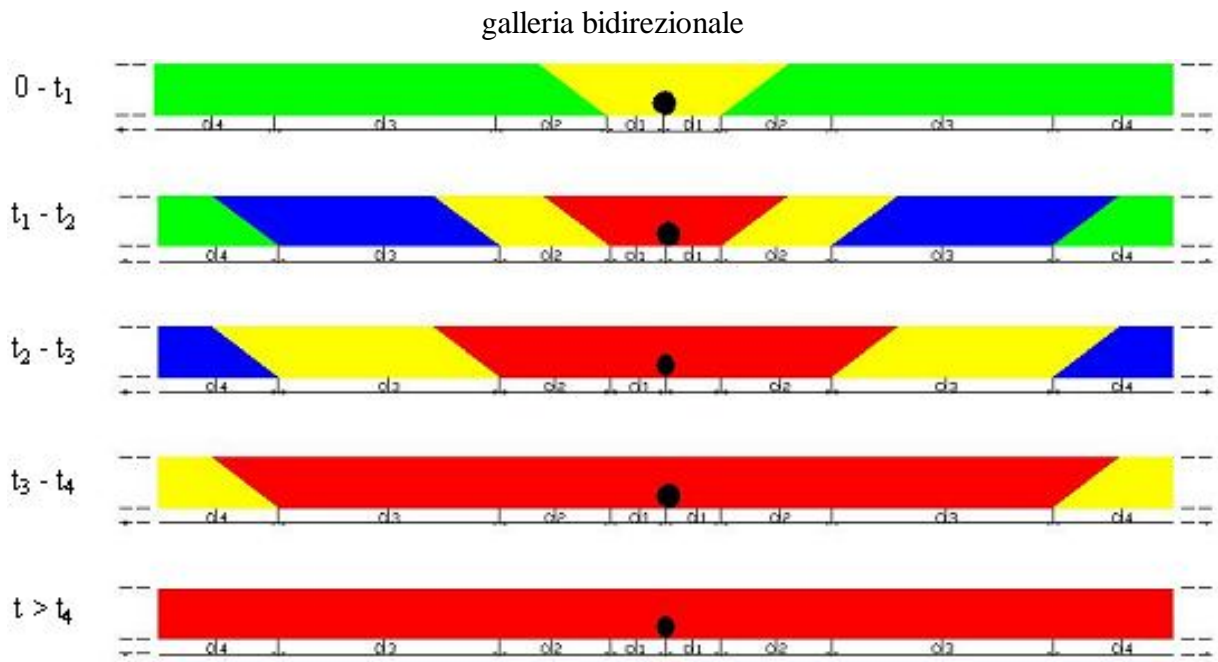


Figura 51: Suddivisione della galleria in zone per la definizione delle condizioni di esodo: zonizzazione del flusso del pericolo

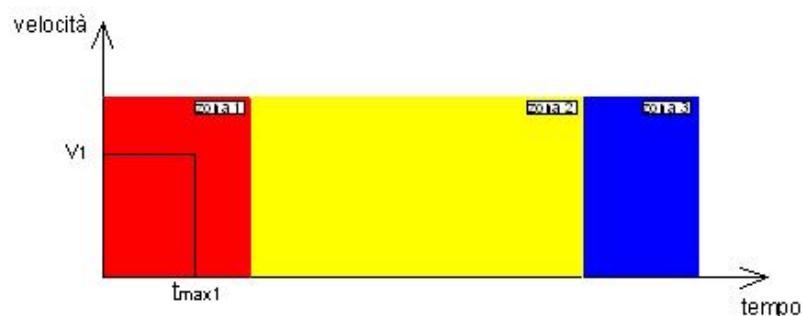
Il modello quindi prevede una diminuzione di velocità nel tempo, con valori diversi a seconda della zona in cui l'utente in esodo si trova. Nel passaggio da una zona all'altra, si prevede che la velocità di esodo non possa aumentare, ma si mantenga costante o al più diminuisca.

Quando un utente termina l'esodo in una zona (quindi risulta vivo al termine di tale zona), quindi, si avrà che il soggetto continuerà l'esodo nella zona successiva con la stessa velocità, che diminuirà poi con lo scattare del periodo temporale successivo

A titolo esemplificativo si mostra l'andamento della velocità di un utente in esodo con velocità v_1 nella zona 1, caratterizzata da un tempo di permanenza t_1 , che deve raggiungere la zona 3.

Si possono verificare quindi quattro diverse situazioni:

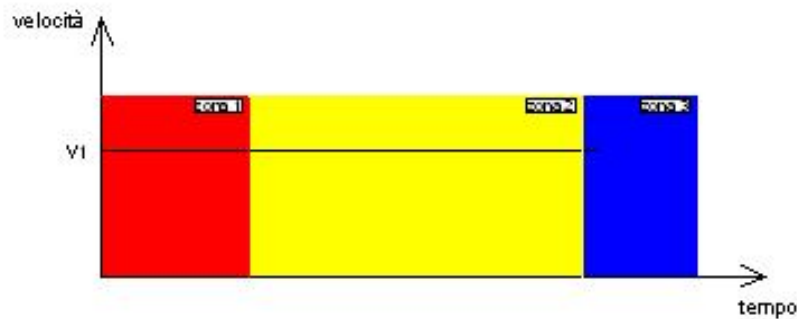
- a. l'utente in esodo non raggiunge la zona 2 in tempo utile



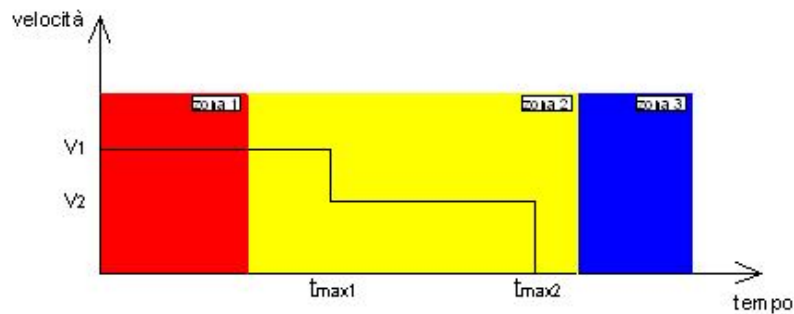
In questo caso il tempo di massima permanenza nella zona 1 non è sufficiente per permettere al soggetto di raggiungere la zona successiva: l'utente in fuga morirà all'interno della zona 1

- b. il soggetto riesce a raggiungere la zona 2 in tempo utile, cioè il periodo di esodo in zona 1 è inferiore al tempo di massima permanenza previsto per la stessa. In questo caso l'esodo continuerà verso la zona 3: è possibile che all'interno della zona 2 la velocità si mantenga costante oppure diminuisca (se durante l'esodo nella zona si ha il passaggio da un intervallo temporale ad un altro tra quelli definiti).

Caso 1:



Caso 2:



Caso 3:

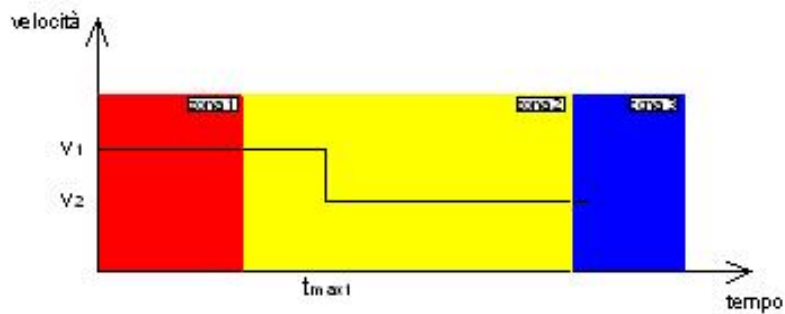


Figura 52a-b1-b2-b3: relazione tra velocità di esodo e tempo di massima permanenza prevista dal modello, rappresentazione schematica delle diverse situazioni verificabili

Durante l'esodo nella seconda zona, è possibile che l'utente riesca ad attraversarla a velocità costante (caso 1): questo accade se il tempo di esodo nella seconda zona risulta inferiore al periodo previsto per la variazione di velocità (intervalli temporali variabili a seconda del tipo di evento analizzato).

Può anche accadere che all'interno della zona 2 questo intervallo temporale sia superato: ciò determina una diminuzione di velocità (caso 2).

Infine, è possibile che l'utente trascorra troppo tempo all'interno della zona 2, superiore al periodo di permanenza massima previsto: in questo caso sarà decretato il decesso del soggetto (caso 3).

A questo punto, risultano definiti tutti gli elementi e i fattori che concorrono nella definizione della severità dell'incidente analizzato.

Per procedere in tale definizione è necessario stimare il numero di veicoli coinvolti nell'evento, cioè i veicoli che risultano presenti in galleria durante lo sviluppo dell'incendio: per fare ciò è necessaria la definizione di un modello di formazione code.

Successivamente si completa il modello di esodo con un modello di calcolo delle vittime, con cui si giunge al risultato cercato.

Completata la zonizzazione del flusso del pericolo all'interno della galleria durante l'evento analizzato, la fase successiva prevede quindi di definire, in funzione della modellazione fin qui eseguita, le conseguenze sugli utenti esposti.

3.2.2 Analisi delle conseguenze sugli utenti esposti all'evento

I risultati della modellazione del flusso del pericolo costituiscono i dati di ingresso per la simulazione del processo di esodo degli utenti dal tunnel [2]; le diverse zone del flusso del pericolo individuano le condizioni nelle quali si realizza il processo di esodo degli utenti dalla struttura. Le conseguenze sulla popolazione esposta sono determinate dalle caratteristiche dell'evento analizzato, e misurate in termini di dosi inabilitanti assorbite⁶⁷.

3.2.2.1 Modellazione degli scenari di esodo

Uno scenario di esodo è lo scenario utilizzato nella simulazione del processo di esodo degli utenti della struttura.

⁶⁷ Gli effetti dell'incendio sull'uomo, misurabili appunto in dosi inabilitanti assorbite (FED), sono trattati al paragrafo 2.4.5

I parametri che definiscono uno scenario di esodo sono raggruppabili in quattro categorie:

- geometria, in cui si include la caratterizzazione del layout e dell'accessibilità delle vie di fuga;
- demografia, che include i parametri caratterizzanti la composizione della popolazione esposta, le capacità motorie, i tempi di risposta, la velocità di esodo;
- ambiente, caratterizzante il flusso di pericolo nella struttura e gli effetti sulla salute della popolazione;
- procedura, in cui si includono i parametri caratterizzanti le procedure previste nella gestione dell'emergenza.

La modellazione di uno scenario di esodo richiede la formulazione e soluzione di:

- un modello di formazione code all'interno della galleria
- un modello di esodo degli utenti della struttura.

3.2.3 Definizione degli utenti esposti: modelli di formazione code

Scopo di un modello di formazione code all'interno di una galleria, è quello di determinare il numero di veicoli presenti nella struttura in un determinato istante, in particolare nei momenti successivi ad un evento incidentale; dall'elaborazione di questo valore è possibile determinare il numero di persone esposte all'evento.

Tali modelli, dovendo essere formulati in modo da includere elementi caratteristici del traffico presente nella struttura all'atto dell'evento, risultano di elevata complessità formale ed affetti da elevate incertezze aleatorie.

Un modello semplificato di formazione delle code in galleria può essere formulato riferendosi ai parametri correntemente utilizzati nella caratterizzazione della circolazione in galleria in termini di regimi di traffico; viene di seguito definito il modello proposto da ANAS all'interno delle "Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali".

3.2.3.1 Modello di formazione code proposto nelle Linee Guida ANAS

Si ipotizzano verificate le seguenti condizioni:

- rappresentazione euleriana del traffico
- flusso di traffico stazionario
- flusso di traffico omogeneo

Nel caso di carreggiate separate è ragionevole ritenere che solo i veicoli della carreggiata sulla quale avviene l'evento incidentale siano effettivamente bloccati in coda, mentre i veicoli della

carreggiata parallela possono proseguire nel loro percorso.

Al contrario nel caso di strade ad unica carreggiata e doppio senso di marcia entrambe le direzioni risultano verosimilmente bloccate dall'evento incidentale.

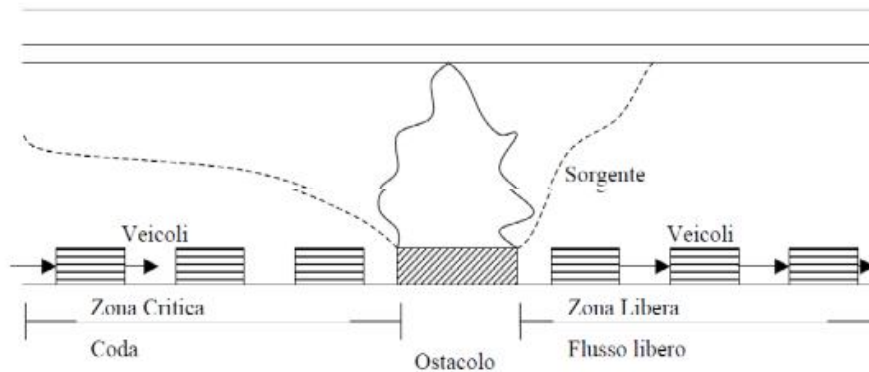


Figura 53: Schematizzazione del processo di formazione di una coda all'interno di una galleria in presenza di un evento incidentale (ANAS s.p.a., 2009)

Viene indicato come parametro caratterizzante il traffico l'interdistanza I tra i veicoli:

$$I = V/D$$

Da cui il numero dei veicoli presenti su una carreggiata

$$N = L/I = LD/V$$

Con L lunghezza della galleria, V velocità dei veicoli.

Le condizioni di flusso scorrevole sono caratterizzate come le condizioni per le quali sia verificata la relazione

$$I > I^*$$

Con I^* distanza di sicurezza tra i veicoli, grandezza dipendente da lunghezza media e velocità dei veicoli.

Le condizioni di flusso congestionato di conseguenza si avrebbero con

$$I < I^*$$

Ipotizzando il verificarsi di un incendio, si considerano le seguenti condizioni:

- traffico bloccato sopravvento al focolaio all'istante iniziale
- focolaio localizzato ad una distanza d dal portale d'accesso

Le condizioni introdotte determinano la formazione di un tappo; la velocità di risalita del tappo può essere definita come:

$$u = D / (1/I_0 - D/V)$$

Con I_0 interdistanza dei veicoli all'istante iniziale.

La velocità di risalita del tappo influenza la probabilità di una carambola tra i veicoli al

termine della coda.

Il tempo di risalita del tappo è definito come

$$\tau = d/u$$

Il valore numerico del tempo τ deve essere confrontato con il tempo necessario alla chiusura della galleria.

Si sottolinea il ridotto livello di rappresentazione ed accuratezza del modello descritto, identificato nelle sopra citate Linee Guida come “modello semplificato”.

La tesi qui proposta prevede la definizione di 2 alternativi modelli di formazione code: anche in questo caso la scelta del modello che viene utilizzato dipende dalle dotazioni impiantistiche del tunnel considerato, in particolare dalla presenza o assenza di un sistema di chiusura in caso di evento avverso.

3.2.3.2 Modello di formazione code proposto

Con il modello di formazione code viene definito il numero di veicoli presenti; successivamente in base allo spettro di traffico⁶⁸ e ai coefficienti di occupazione definiti (pari a 1,5 e 1 rispettivamente per veicoli leggeri e pesanti, 30 per autobus, con la possibilità per l'utente di modificare tali valori) si determina il numero di utenti potenzialmente esposti (presenti in galleria dopo l'incidente)⁶⁹.

Risulta ovviamente necessario procedere in maniera differente in caso di gallerie unidirezionali e bidirezionali: mentre in quest'ultimo caso si prevede che i veicoli che procedono in entrambi le direzioni restino coinvolti nell'evento, nel primo caso è lecito ipotizzare che i veicoli che precedono l'evento incidentale continuino nella loro marcia, e quindi restino incolonnati solo quelli presenti nella direzione opposta.

Il dato fondamentale per la definizione degli utenti presenti, è il traffico giornaliero medio (TGM): avendo a disposizione il numero medio di veicoli che percorrono il tratto di strada analizzato è possibile risalire al numero di mezzi mediamente presenti in qualsiasi arco

⁶⁸ Che definisce le percentuali dei vari veicoli presenti, e caratterizza il tratto di strada di cui il tunnel fa parte; generalmente viene fatta una suddivisione tra bicicli, veicoli leggeri, veicoli commerciali, veicoli pesanti

⁶⁹ Si sottolinea che nella trattazione esposta non si considera la presenza di alcuni tipi di veicoli: per rendere il modello presentato il più snello possibile si è scelto di analizzare la presenza di alcune tipologie caratteristiche. In particolare non è prevista la presenza di motocicli in quanto si ritiene molto improbabile che tali veicoli possano portare allo sviluppo di un incendio; anche se ciò dovesse avvenire il veicolo potrebbe essere considerato come leggero, con un approccio cautelativo in termini di sicurezza (al più si sovrastimerebbe l'evento)

temporale nella giornata.

In presenza di un evento incidentale, è ragionevole ritenere che in caso di carreggiate separate siano effettivamente bloccati in coda e quindi potenzialmente esposti solo i veicoli della carreggiata sulla quale si verifica l'evento.

In caso di strade ad unica carreggiata e due sensi di marcia verosimilmente risulteranno invece bloccate dall'evento incidentale entrambe le direzioni.

Per questo motivo, in caso di carreggiate separate, è opportuno attribuire il dato di TGM a ciascuna in modo indipendente; nel caso di disponibilità di dati sul traffico specifici nei due sensi di marcia tale operazione risulta semplice ed immediata, qualora invece si disponesse di un unico dato complessivo è opportuno procedere ad una divisione omogenea del TGM totale tra le due carreggiate.

In questo secondo caso, non avendo disposizione altri dati, si procede dividendo il traffico in modo omogeneo nelle due direzioni, ipotizzando che questo sia ripartito in maniera uguale nei due sensi di marcia nell'arco dell'intera giornata (ovviamente questa operazione comporta un'approssimazione, tanto più marcata quanto più il traffico risulterà intenso in una direzione rispetto all'altra).

Nel caso di strade ad unica carreggiata e doppio senso di marcia, risulta opportuno riferirsi ad un unico valore di traffico, eventualmente costituito dalla somma dei valori specifici relativi ai due sensi di marcia.

Essendo come detto il TGM un valore medio, se ne prevede una maggiorazione con un coefficiente opportunamente definito: questo coefficiente ha ovviamente uno scopo cautelativo, e risulta necessario per considerare orari in cui il traffico risulta più sostenuto; in caso di traffico scarso si avrà quindi un sovradimensionamento significativo del problema, comunque a favore di sicurezza.

Nel modello di calcolo definito si prevedono due differenti situazioni, corrispondenti a due diverse metodologie di analisi: il calcolo dei veicoli avviene in modo diverso in caso sia presente o assente un sistema che permetta la chiusura della galleria.

Valutazione della popolazione esposta in presenza di un sistema di allarme

In presenza di un opportuno sistema di allarme, previsto obbligatoriamente per tutte le gallerie dalle norme che attualmente ne disciplinano le caratteristiche, è possibile, in caso di necessità, interrompere il flusso di veicoli entranti in galleria, mediante un adeguato sistema di segnaletica: in genere sono previsti semafori, pannelli a messaggio variabile e/o barriere

all'ingresso.

In questo caso è possibile definire il numero di utenti esposti stimando i veicoli che entrano nella galleria nel tempo compreso tra l'istante di accadimento e il momento dell'interruzione dell'accesso: ovviamente è necessario diversificare la situazione in cui si ha un'unica carreggiata e due sensi di marcia e quella in cui invece si hanno due carreggiate separate. Nel primo caso saranno previsti dei sistemi di interruzione del traffico in corrispondenza dell'entrata di entrambi i fornici.

In funzione delle caratteristiche del tunnel e dei veicoli coinvolti nell'evento iniziatore dell'incendio è definito un tempo di chiusura: in questo intervallo di tempo si realizza l'accodamento di un numero di veicoli che dipende dal traffico, riconducibile al valore del TGM, e la cui composizione è funzione della composizione del traffico stesso.

A partire dal valore noto del traffico giornaliero medio, posso definire il numero di veicoli che attraversano una sezione stradale durante un'unità di tempo qualsiasi.

Il valore di TGM presuppone l'ipotesi che il traffico sia omogeneo durante l'intera giornata, essendo appunto un valore medio.

Nella seguente trattazione si è deciso di riferirsi alla condizione più sfavorevole, e quindi di ipotizzare che lo scenario incidentale si verifichi durante l'ora di punta; per fare ciò si moltiplica il valore del TGM per un coefficiente moltiplicativo F_p , che si stima possa variare tra 2 e 3: per la regione Lombardia ad esempio, studi statistici dimostrano che il 22% degli spostamenti giornalieri avvengono tra le 7 e le 9, in un'ora quindi transita l'11% del traffico giornaliero medio, corrispondente ad un coefficiente moltiplicativo pari a 2,6. questo valore è utilizzato come riferimento nel modello di calcolo descritto, con la possibilità prevista di modifica da parte dell'utente (semplicemente digitando un valore diverso all'interno del questionario, nell'apposita casella di inserimento dati).

Oltre a dati riguardanti il TGM è possibile trovare anche dati relativi allo spettro di traffico di riferimento (ad esempio ANAS mette a disposizione questi dati per tutte le tratte di sua competenza), quindi poter determinare a priori in base a dati storici (e quindi probabilistici) la percentuale di veicoli pesanti presenti sul totale, che ovviamente occuperanno uno spazio maggiore e saranno caratterizzati da coefficienti di occupazione diversi: si prevede di distinguere gli autobus da altri veicoli pesanti, in quanto caratterizzati da coefficienti di occupazione molto più rilevanti.

Prima di tutto viene definito il tempo di chiusura della galleria, tramite il quale sarà possibile definire il numero di veicoli entranti dall'inizio dell'ipotizzato incendio.

• *Tempo di chiusura della galleria*

Definita la presenza di un sistema di chiusura del tunnel, si definisce il tempo di chiusura ad esso associato.

Si parte da un valore di riferimento, che potrà subire variazioni in funzione delle dotazioni impiantistiche presenti.

A partire da esperienze condotte in scala reale disponibili in letteratura in tema di funzionalità dei sistemi di rilevazione di incendio (*Galleria Rosa, GF Politecnico di Torino*), nonché dalla possibilità di richiesta di soccorso da parte dell'utenza attraverso la rete cellulare, si stima che l'intervallo di tempo che intercorre tra l'evento incidentale e l'attivazione degli impianti semaforici d'accesso sia pari mediamente a 3 minuti.

Questo valore viene poi rielaborato in funzione della presenza/assenza e delle caratteristiche di alcune dotazioni ritenute particolarmente rilevanti, in particolare:

- sistema di rilevazione
- centro di controllo
- sistemi di comunicazione
- segnaletica esterna

In base all'integrazione dell'impianto di chiusura con quelli sopra riportati è prevista la definizione di un coefficiente moltiplicativo, che andrà a modificare il tempo di chiusura iniziale (3 minuti)⁷⁰.

– Sistema di rilevazione e controllo

Si analizza inizialmente la presenza di un sistema di rilevazione ed eventualmente di un centro di controllo:

- se è presente un sistema automatico di rilevazione fumi/incendi è previsto un coefficiente

moltiplicativo pari a 0,9⁷¹;

- se è prevista la presenza di un sistema di rilevazione (rilevatori fumi/incendi o sistema di video sorveglianza) associato ad un centro di controllo è previsto un

⁷⁰ Se in uno di questi gruppi di impianti sono associati più sistemi, si prevede di considerare solo un coefficiente moltiplicativo, corrispondente all'impianto più efficiente

⁷¹ Si ipotizza che un tale impianto sia in grado di individuare prontamente un eventuale evento incidentale ed attivare il sistema di chiusura del tunnel

coefficiente di moltiplicazione pari a 0,85⁷².

– Sistemi di comunicazione

Si considerano in questa fase solo 2 tipi di sistemi tra quelli previsti, ossia telefoni e pulsanti d'allarme, in quanto sono gli unici che permettono una comunicazione da utente in galleria a operatore⁷³.

I coefficienti moltiplicativi attribuiti a tali sistemi sono riportati in tabella 12.

– Segnaletica esterna

Elaborando i dati definiti dal questionario, si possono riscontrare diverse situazioni per quanto riguarda gli impianti di segnaletica esterna previsti: in base alla composizione di questi sono previsti una serie di coefficienti moltiplicativi riportati in tabella.

Sistema analizzato	Coefficiente moltiplicativo
Sistemi di rilevazione e controllo	
Sistemi di rilevazione	x0,9
Sistemi di rilevazione con centro di controllo	x0,85
Sistemi di comunicazione	
telefoni	x0,95
Pulsanti d'allarme	x0,98
Segnaletica esterna	
semafori all'ingresso	x0,85
barrire all'ingresso	x0,80
pannelli a messaggio variabile	x0,9
pannelli a messaggio variabile + semafori	x0,8
pannelli a messaggio variabile + barriere	x0,8

Tabella 12: Coefficienti moltiplicativi associati alle diverse dotazioni impiantistiche per la definizione del tempo di chiusura del tunnel

Si prevede ragionevolmente che la presenza di più impianti determini un aumento della funzionalità del sistema di segnaletica.

Ovviamente l'utilità di tali sistemi è legata alla tempestività di azionamento, determinata dagli

⁷² La presenza di un centro di controllo aumenta sensibilmente la potenzialità di un impianto di rilevazione

⁷³ Si ritiene che una segnalazione tempestiva da parte di un soggetto in galleria di una situazione di emergenza permetta una maggior rapidità di intervento

impianti sopra considerati.

A questo punto il tempo di chiusura del tunnel viene determinato semplicemente moltiplicando il valore iniziale di 3 minuti per i coefficienti individuati: in figura 68 è riportato il sottomodulo di calcolo appena descritto.

sistema di chiusura galleria		PREVISTO	
tempo di chiusura - valore iniziale =		3 minuti	
		180 secondi	
centro di controllo	SI		
sistemi di rilevazione	video-sorveglianza rilevatori fumo-incidente		
<i>se esistono sistemi di rilevazione fumo-incendi, t medio diminuisce (x0,9)</i>			
<i>se esistono sistemi di rilevazione e sono associati a un centro di controllo, t medio chiusura diminuisce(x0,85)</i>			
fattore moltiplicativo t chiusura:		0,85	
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t chiusura può diminuire</i>			
telefoni	x0,95		
			<i>se ho piu sistemi presenti contemporaneamente, considero solo quello associato al fattore moltiplicativo più basso</i>
pulsanti allarme	x0,98		
fattore moltiplicativo t chiusura:		0,95	
in base a sistema di chiusura previsto:			
semafori all'ingresso	x0,85		
barriere all'ingresso	x0,8		
pannelli mex variabili	x0,9		
pannelli mex variabili+semafori	x0,82		
pannelli mex variabili+barriere	x0,85		
fattore moltiplicativo t chiusura:		0,8	
tchiusura =		116,28 secondi	

Figura 54: Foglio di calcolo, definizione del tempo di chiusura del tunnel in funzione degli impianti presenti

Definito il tempo di allarme, dopo cui si interrompe il flusso veicolare all'esterno della galleria, pari a t_c (tempo di chiusura), avrò:

$$veic = TGM(veic/gg) * 1(gg)/86400(sec/gg) * t_c (sec) * Fp \quad (A)$$

Che rappresenta il numero di veicoli entranti in galleria nel periodo considerato.

Successivamente si verifica che questo numero di veicoli possa fisicamente entrare nella galleria. Avendo a disposizione la distanza tra sorgente dell'incendio e entrata della galleria, viene definito il numero massimo di veicoli che possono occupare questa area: il modello elaborato prevede di definire un veicolo di dimensioni medie e dei valori di interdistanza tra i mezzi: in base a questi valori posso facilmente definire il numero di veicoli necessari per saturare lo spazio disponibile.

Il veicolo medio è un veicolo le cui dimensioni sono date dalla media pesata tra i veicoli presenti: dai dati di input ho a disposizione la composizione del traffico (% di veicoli leggeri, autobus e veicoli pesanti generici); a seconda della distanza dall'evento incidentale sono definiti dei valori di interdistanza tra i veicoli. In base al traffico è quindi nota la lunghezza del veicolo medio, mentre in base alla posizione dell'evento incidentale sono noti i valori di distanziamento tra i veicoli: con questi dati, posso facilmente definire il numero di veicoli (di dimensioni medie rispetto a quelli realmente presenti) che portano ad una saturazione dello spazio compreso tra l'entrata del fornice e l'evento incidentale (numero massimo di veicoli che possono entrare nel tunnel).

Ovviamente il valore definito terrà conto anche del numero di corsie presenti.

Si avrà quindi:

$$\text{veic} = [d_e / (l_{\text{media}} + i_i)] * n_{\text{corsie}} \quad (\text{B})$$

dove come detto d_e è la distanza tra evento incidentale ed entrata fornice, l_{media} corrisponde alla lunghezza del veicolo medio, i_i è invece il valore di interdistanza a cui ci si riferisce, che varia in base alla posizione considerata e al tipo di evento analizzato e n_{corsie} è appunto il numero di corsie presenti.

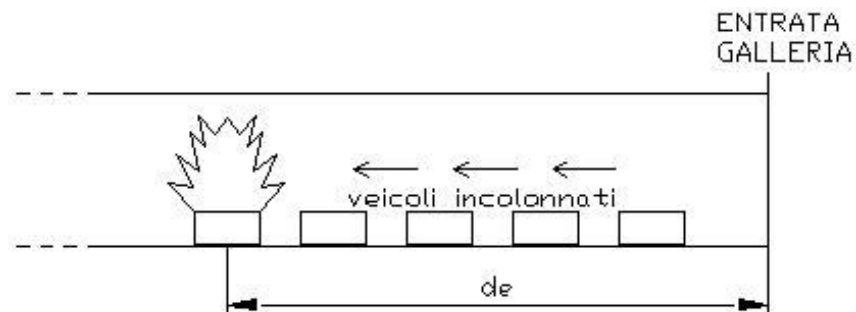


Figura 55: Definizione della distanza evento-entrata: esempio indicativo in caso di galleria monodirezionale

I valori di interdistanza sono definiti dall'utente in fase di compilazione del questionario, e possono assumere valori diversi nelle zone di suddivisione del tunnel previste; è lecito

ipotizzare che con il passare del tempo gli utenti si rendano conto sempre più rapidamente della situazione di emergenza, (anche grazie ai sistemi di comunicazione eventualmente presenti) e tendano a mantenere una distanza dal veicolo precedente maggiore: si può quindi ragionevolmente prevedere che con l'aumento della distanza dall'incendio aumenti anche l'interdistanza tra i veicoli incolonnati.

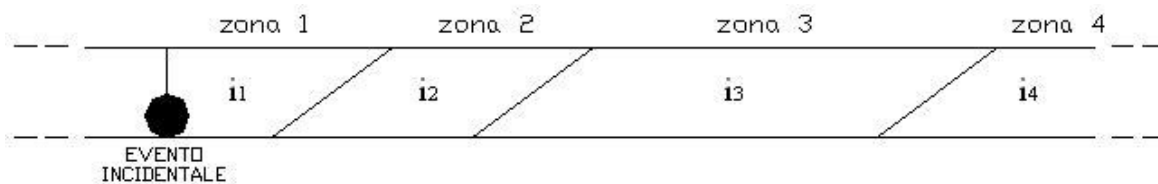


Figura 56: Rappresentazione schematica della suddivisione del tunnel prevista dal modello⁷⁴

A questo punto, risultano definiti due valori di veicoli potenzialmente esposti all'evento: il primo in funzione del traffico medio previsto e del tempo di chiusura definito, che rappresenta quindi il numero di veicoli potenzialmente entranti nel tunnel in questa frazione di tempo; il secondo rappresenta il numero massimo di veicoli che possono fisicamente occupare lo spazio tra l'entrata del tunnel e l'evento incendio⁷⁵.

Si considera nelle successive trattazioni il numero di veicoli più vincolante, cioè il valore minore tra i 2 definiti nelle formule (A) e (B): ovviamente se il tratto di galleria analizzato si riempie in un periodo inferiore al tempo di chiusura, il numero di veicoli presenti in questo istante sarà quello da considerare.

In caso di gallerie bidirezionali, bisognerà svolgere le operazioni descritte per entrambi gli accessi, in quanto risulteranno interessate dall'evento incidentale le due direzioni: si definiranno quindi due valori, indicanti i veicoli associati a ciascuna delle entrate dei due fornici.

Definito il numero di veicoli, in base alle informazioni riguardanti lo spettro di traffico è nota la frazione di veicoli leggeri presenti e quella di veicoli pesanti e autobus, a cui sono associati diversi coefficienti di occupazione.

⁷⁴ In ogni zona si identifica un valore di interdistanza, definito tramite la compilazione del questionario. L'esempio è rappresentativo di una galleria unidirezionale: in caso di galleria bidirezionale generalmente si avrà una disposizione simmetrica delle interdistanze (e di tutti gli altri valori definiti) rispetto all'evento

⁷⁵ Se l'incendio si sviluppa molto vicino all'entrata del tunnel, questo spazio sarà particolarmente limitato

In base a questi viene definito il valore di popolazione esposta; se la galleria trattata è bidirezionale il numero di persone potenzialmente esposte al pericolo sarà dato dalla somma dei due valori.

$$p[\text{pop}] = \text{veic}_1 * c_1 + \text{veic}_p * c_p + \text{veic}_b * c_b$$

Riferendosi a strade di tipo extraurbano i coefficienti di occupazione medi che si ritiene utilizzare sono:

$$c_1 = \text{coefficiente di occupazione veicoli leggeri} = 1,5$$

$$c_p = \text{coefficiente di occupazione veicoli pesanti} = 1$$

$$c_b = \text{coefficiente di occupazione autobus} = 30$$

Anche per questi valori, si prevede la possibilità di utilizzarne diversi: è sufficiente che l'utente, durante la fase di compilazione del questionario, digiti i valori a lui più congeniali nelle apposite caselle di inserimento indicate.

								(du=dist. Evento-uscita)	
veicoli entranti in galleria in tc:		in de	9	confronto con:	n. max veicoli in de		veic=	54 veic	
(con Fp= 2,60)		in du	9		n. max veicoli in du		veic=	54 veic	
-> veicoli presenti:		de	9 veicoli	di cui:	5,90 leggeri	2,57 pesanti	0,09 bus		
		du	9 veicoli	di cui:	5,90 leggeri	2,57 pesanti	0,09 bus		
		(solo x bidirezionale)							
POPOLAZIONE PRESENTE IN GALLERIA:								28 persone	
con coeff. Occupazione veicoli									
leggeri 1,50		autobus 30,00							
pesanti 1,00									

Figura 57: Modello di formazione code, definizione dei veicoli esposti in caso di presenza di un sistema di chiusura del tunnel (l'esempio riguarda un caso di galleria bidirezionale)

Se la galleria non prevede un sistema di chiusura, viene utilizzato un modello alternativo.

Valutazione della popolazione esposta in assenza di un sistema di allarme

In questo caso, non essendo presente un sistema in grado di fermare l'afflusso di veicoli in galleria dopo il verificarsi dell'evento incidentale, considero il numero massimo di veicoli possibile: si prevede che i veicoli in coda siano sufficienti per riempire tutto lo spazio a loro disposizione, o in alternativa che continuino ad entrare veicoli per tutto il tempo disponibile: il numero di utenti presenti sarà determinato dal più vincolante tra questi valori.

Viene quindi definito il numero di veicoli necessari a riempire lo spazio presente tra l'evento incidentale e le entrate dei 2 fornicci (in caso di galleria monodirezionale si considera solo la

distanza in cui si hanno veicoli in coda): analogamente al caso presentato al capitolo 2, risulterà:

$$\text{veic} = [d_e / (l_{\text{media}} + i_i)] * n_{\text{corsie}}^{76}$$

Visto che il modello impostato prevede, a seconda dei veicoli coinvolti nell'evento, dei tempi massimi di permanenza (dopo cui si ritiene la galleria non più idonea ad ospitare utenti vivi o comunque in grado di autosalvarsi), si verifica il numero di veicoli entranti in galleria in questi periodi, e si confrontano con il dato sopra determinato: anche in questo caso per i calcoli successivi si utilizzerà il valore più vincolante (se si verifica che nel periodo massimo previsto la galleria non si riempirà di veicoli, essendo il traffico limitato, la popolazione esposta verrà definita dal numero di veicoli entranti in questo periodo massimo).

Definito t_{max} (variabile in funzione delle caratteristiche impiantistiche e strutturali della galleria, con valori che raggiungono i 55 minuti in caso di evento incidentale coinvolgente solo autovetture e buone caratteristiche impiantistiche, e scendono fino a 16 minuti nel caso peggiore) si avrà:

$$\text{veic} = \text{TGM}(\text{veic/gg}) * 1(\text{gg})/1440(\text{min/gg}) * t_{\text{max}}(\text{min}) * F_p^{77}$$

Determinato il numero di veicoli si definisce il numero di utenti corrispondenti:

$$p[\text{pop}] = \text{veic}_l * c_l + \text{veic}_p * c_p + \text{veic}_b * c_b^{78}$$

Come nei casi precedenti se la galleria prevede la circolazione in entrambe le direzioni dovrà verificare il numero di veicoli presenti sia nel tratto precedente che in quello successivo all'evento incidentale.

⁷⁶ Come nel paragrafo precedente si ha d_e = distanza evento incidentale - entrata fornice,
 l_{media} = lunghezza veicolo medio, i_i = interdistanza (variabile nelle diverse zone),
 n_{corsie} = numero corsie

⁷⁷ F_p corrisponde al fattore dell'ora di punta, considerato pari a 2,6

⁷⁸ veic_i rappresentano le diverse percentuali di veicoli leggeri, pesanti e autobus, associati ai rispettivi coefficienti di occupazione c_i definiti nel paragrafo precedente

sistema di allarme NON PREVISTO:			
n max veicoli in de:	207 veic	di cui	159,2 leggeri 45,5 pesanti 2,1 bus
n max veicoli in du:	188 veic	di cui	144,6 leggeri 41,3 pesanti 1,9 bus
veicoli entranti in de in tmax:		138 veicoli	veicoli entranti in du in tmax:
di cui		106,36 leggeri 30,39 pesanti 1,38 bus	di cui
risulta tmax=		25,00	risulta tmax=
risulta tmax=		25,00	risulta tmax=
coeff. Occupazione:		leggeri 1,50 pesanti 1,00 bus 30,00	
VEICOLI PRESENTI IN de:		138 veicoli	di cui: 106,36 leggeri 30,39 pesanti 1,38 bus
VEICOLI PRESENTI IN du:		138 veicoli	106,36 leggeri 30,39 pesanti 1,38 bus
POPOLAZIONE PRESENTE IN GALLERIA(de+du):		463 persone	

Figura 58: Modello di formazione code, definizione dei veicoli esposti in caso di assenza di un sistema di chiusura del tunnel (si considera l'esempio di galleria bidirezionale)

Risulta quindi definito il numero di veicoli coinvolti nell'evento e quindi, in funzione dei dati disponibili sullo spettro di traffico e dei coefficienti di occupazione previsti per le diverse tipologie di veicoli, il numero di persone coinvolte.

Si passa ora alla parte finale della modellazione, in cui si analizzano le condizioni di esodo dei soggetti e se ne valuta la salvabilità.

3.2.4 Esodo utenti: determinazione delle vittime

I modelli di simulazione dell'esodo sono molto differenti l'uno dall'altro: nella scelta di un modello è necessario considerare le caratteristiche e le funzionalità per le quali esso è stato sviluppato.

Bisogna quindi valutare:

- la finalità, definibile come l'attitudine del modello a simulare lo scenario di interesse;
- il metodo di modellazione dell'azione dei presenti, individuando principalmente modelli comportamentali, modelli parzialmente comportamentali, modelli di movimento⁷⁹;
- la struttura matematica del modello, in maniera differente a seconda di come questo considera e divide lo spazio del dominio di interesse;

⁷⁹ I modelli di movimento muovono le persone da un punto ad un altro (dalla posizione iniziale all'uscita); i modelli comportamentali tengono conto anche del processo di decisione da parte degli utenti in fuga; i modelli parzialmente comportamentali calcolano in primo luogo il movimento delle persone, ma forniscono anche alcuni condizionamenti dovuti al comportamento

- la prospettiva del modello e la prospettiva delle persone, in base a come il modello vede gli occupanti e a come questi vedono il modello: si fa principalmente una distinzione tra modelli macroscopici e microscopici;
- il comportamento delle persone: mentre alcuni modelli simulano l'influenza del comportamento sull'esodo, altri prevedono di assegnare una distribuzione probabilistica ad elementi quali il tempo di pre-movimento o la velocità di esodo;
- il movimento delle persone, in base a come il movimento degli evacuanti è gestito;
- l'uso dei dati di incendio: esistono ad esempio modelli che ricavano questi dati da software dedicati alla sola dinamica dell'incendio;
- la capacità di visualizzazione, a seconda che sia o meno prevista la possibilità di visualizzare i risultati;
- gli studi sulla validazione, svolta rispetto ad altri modelli, rispetto a dati derivanti da esercitazioni o sperimentazioni o rispetto a dati di letteratura;
- i limiti di applicazione e le caratteristiche di impiego, a seconda della relativa disponibilità di dati sperimentali di studio propri del modello.

Si può facilmente intuire che le diverse metodologie adottate porteranno ad un livello di dettaglio diverso: è necessario quindi definire le caratteristiche del modello in modo da ottenere un buon compromesso tra la complessità dello stesso e i risultati ottenuti.

per poter valutare il processo di esodo delle persone in una galleria in presenza di incendio, si deve tener conto in particolare di:

- ambiente galleria in cui si svolge l'evacuazione, ed in particolare la sua geometria e la presenza dei vari sottosistemi di cui è dotata⁸⁰;
- i luoghi ritenuti sicuri e le possibili vie di fuga;
- la distribuzione degli individui all'interno della galleria;
- il comportamento degli individui in una situazione di panico;
- le sorgenti e i luoghi di pericolo, nonché la dinamica di propagazione del pericolo stesso.

Un modello semplificato per la definizione del processo di esodo degli utenti può essere formulato assumendo due parametri fondamentali:

- i tempi di abbandono dei veicoli da parte degli utenti
- la velocità di esodo degli utenti.

⁸⁰ Per l'analisi di tali sottosistemi si rimanda al paragrafo 3.1

Il processo di esodo risulterà dipendente dalle modalità di avanzamento degli utenti all'interno della galleria e dall'orientamento verso le uscite di sicurezza.

Preliminarmente alla formulazione del modello è necessario definire i fattori che controllano il movimento dei soggetti in fuga.

3.2.4.1 Principi di evacuazione

Il problema principale nella definizione del tempo di evacuazione è la disponibilità delle persone a lasciare i loro veicoli nel corso di un evento incidentale. Il tempo effettivo impiegato dagli occupanti di un veicolo per evacuare un certo spazio verso un luogo di sicurezza è molto complesso, e dato dalla somma del tempo di pre-movimento, necessario per prendere la decisione di abbandonare il veicolo, e tempo di movimento, trascorso in esodo verso l'uscita.

Tempo di pre-movimento

Il tempo di pre-movimento è dato dalla somma tra tempo di riconoscimento e tempo di risposta, ed è il tempo trascorso dopo un allarme o un segnale, prima che gli utenti comincino a muoversi verso un'uscita o un rifugio.

$$T_{pre} = T_{rec} + T_{res}$$

Questo periodo varia in base al luogo in cui gli utenti si trovano, alla vicinanza delle persone all'incidente, alla crescita dell'incendio ed alla percezione dell'evento di ogni singolo individuo fornita dall'ambiente e dai sistemi di allarme e gestione della galleria.

• Analisi del tempo di pre-movimento

Dipende principalmente dal tipo di sistema di allarme previsto e dalla natura degli occupanti. In particolare il tempo di riconoscimento è legato soprattutto a caratteristiche degli utenti (attenzione, capacità sensoriali, mobilità), segnaletica e identificazione del pericolo (distanza dall'incidente, densità di traffico, pendenza longitudinale e trasversale della strada); Il tempo di risposta dipende invece principalmente dal tipo di veicolo, dalla velocità di marcia e dal numero di passeggeri trasportati.

Il componente principale di questi due periodi è comunque il sistema di allarme: gli occupanti della galleria rispondono in genere più prontamente ad un sistema di allarme che fornisce loro informazioni relative all'incidente verificatosi.

Periodi indicativi possono essere assunti al variare dei sistemi di allarme presenti [24]:

- 1 nessun sistema di allarme
- 2 sistemi di allarme che utilizzano campane, sirene o apparecchiature simili
- 3 PA (public address system)
sistema vocale pre-registrato con il possibile utilizzo di display
- 4 PA + CCTV (closed circuit television)
informazioni “live” tramite sistema vocale

A seconda della gravità dello scenario considerato, è possibile definire indicativamente i seguenti valori:

Sistema di allarme	Tempo di premovimento		
	Miglior scenario possibile (sec)	Scenario intermedio (sec)	Peggior scenario (sec)
1	< 300	420	> 720
2	< 180	360	> 540
3	< 120	240	> 360
4	< 60	120	> 180

Tabella 13: Definizione del tempo di premovimento in base al sistema di allarme previsto (Panzavolta, 2009)

Altri valori sono definiti nelle Linee Guida ANAS, dove si indicano valori di abbandono dei veicoli pari a 300 secondi per veicoli leggeri e 90 secondi per veicoli pesanti: la variabilità dei valori reperibili in letteratura mostra quanto complesso sia il problema.

Nella presente trattazione, si è scelto di definire il tempo di premovimento in funzione delle dotazioni impiantistiche della galleria trattata, ponendo in particolare l’attenzione sugli impianti di comunicazione, di rilevamento e sulla segnaletica: si ipotizza che queste due caratteristiche se opportunamente definite e dimensionate permettano all’utente di abbandonare il veicolo in maniera rapida ed efficace.

Definizione del tempo di premovimento nel modello di elaborazione proposto

Anche in questo caso, si parte da un valore di riferimento che viene modificato in base alla presenza/assenza di determinati impianti.

Il tempo medio di premovimento è stimato in letteratura pari a 3 minuti (PIARC, Committee

on Road Tunnel): questo valore è preso a riferimento, e può essere modificato con dei coefficienti moltiplicativi opportunamente definiti.

Si analizza quindi la presenza di:

- Impianti di comunicazione

Permettano uno scambio di informazioni da operatore a utente in galleria; è valutata la presenza di altoparlanti e trasmissioni radio, a cui sono associati dei valori riduttivi dei 3 minuti presi a riferimento.

- Sistema di segnaletica interna:

Si valuta la presenza di elementi all'interno della galleria che possano indurre l'utente ad abbandonare prontamente il proprio veicolo in caso di emergenza, in particolare si considerano semafori, pannelli a messaggio variabile e barriere (la presenza contemporanea di più elementi ne aumenta la funzionalità); se questi elementi sono associati a degli impianti di rilevamento, se ne ipotizza una maggiore funzionalità.

Sistema analizzato	Coefficiente moltiplicativo
Impianti di comunicazione	
altoparlanti	x0,9
Trasmissioni radio	x0,85
entrambi	x0,82
Sistemi di segnaletica interna	
semafori	x0,85
pannelli a messaggio variabile	x0,9
barriere	x0,8
pannelli a messaggio variabile + semafori	x0,8
pannelli a messaggio variabile + barriere	x0,8
se associati ad un impianto di rilevamento	x0,9

Tabella 14: Coefficienti moltiplicativi associati alle diverse dotazioni impiantistiche per la definizione del tempo di premovimento degli utenti in fuga

Si sottolinea che ad ogni gruppo di impianti è associato un unico coefficiente moltiplicativo, corrispondente al valore minore (che porta la massima riduzione al periodo inizialmente considerato).

A questo punto il tempo di premovimento viene definito con una semplice moltiplicazione tra il valore iniziale e i 2 coefficienti definiti:

$$t_{premov} = 180[sec] * c_1 * c_2$$

Con c_1 e c_2 corrispondenti ai due coefficienti sopra definiti.

In figura 59 è riportato il sottomodello descritto.

tempo di pre-movimento			
	valore di riferimento		3 minuti 180 secondi
	sistemi di comunicazione presenti		
		altoparlanti	no
		trasmissioni radio	si
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t premovimento può diminuire</i>			
	coeff. moltiplicativo t:		
	altoparlanti	x 0,9	
	trasmissioni radio	x 0,85	
	entrambi	x 0,82	
	fattore moltiplicativo t premov.:		0,85
<i>se sono presenti pannelli a mex variabile-barriere-semafori sistemi di rilevamento in galleria, t premovimento può diminuire</i>			
	coeff. moltiplicativo t:		
	semafori	x 0,85	no
	pannelli a mex variabile	x 0,9	si
	barriere	x 0,8	no
	semafori+ pannelli a mex variabile	x 0,8	no
	barriere+ pannelli a mex variabile	x 0,8	no
	sist.rilevamento	x 0,9	si
	fattore moltiplicativo t premov.:		0,81
	tempo di pre-movimento		123,93 s

Figura 59: Foglio di calcolo, definizione del tempo di premovimento

Definito il periodo che precede l'esodo alla ricerca di informazioni utili, si passa alla determinazione del tempo di esodo, fondamentale per la definizione della salvabilità degli

utenti in fuga.

Tempo di movimento

Il tempo di movimento è il periodo che gli utenti della galleria trascorrono appunto in movimento diretti verso un'uscita o un luogo di sicurezza. Viene calcolato dividendo la distanza da percorrere, necessaria per raggiungere un luogo sicuro, per la velocità di spostamento degli utenti.

In caso di incendio i soggetti che stanno evacuando non utilizzeranno l'uscita di emergenza se le condizioni in prossimità di questa saranno considerate pericolose, generalmente a causa del calore o del fumo, pertanto è anche necessario tener conto della distanza in corrispondenza della quale il generico occupante percepisce il pericolo in prossimità di tale uscita per poi deviare il suo tragitto.

In genere in una situazione di emergenza la velocità di fuga in un ambiente libero da fumo varia tra 1 e 2 m/s [22]: in figura si riportano alcuni dati relativi a questo parametro al variare della presenza di fumo in un edificio.

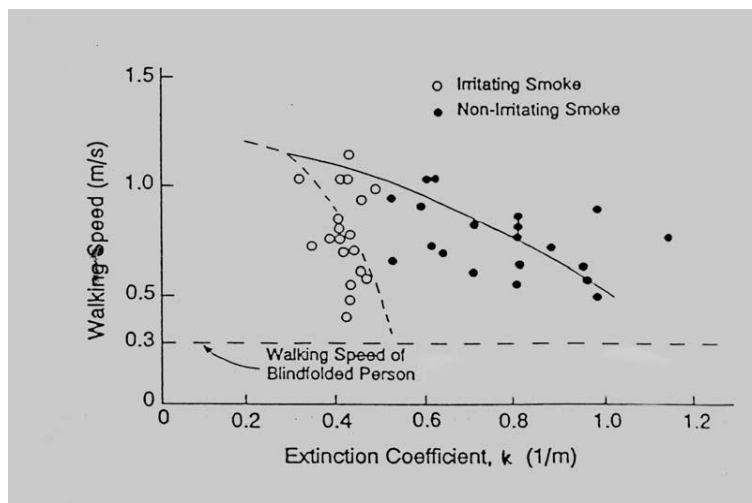


Grafico 15: Rappresentazione schematica della variazione della velocità di esodo al variare del fumo presente: si vede chiaramente che un aumento della quantità di fumo porta ad una rapida diminuzione della velocità (Mazziotti, 2002)

Per quanto riguarda invece le gallerie non esistono attualmente dati certi, ma si tende ad assumere valori della velocità di fuga dell'ordine di 1 m/s in buone condizioni [2]: questi valori saranno poi influenzati dall'illuminazione, che determina la visibilità all'interno dello spazio contenente fumo e dalla progettazione della segnaletica di sicurezza.

In letteratura sono riportati dei valori indicativi di velocità di esodo in funzione del variare delle condizioni presenti: si riportano i valori indicati dalle Linee Guida ANAS al variare

delle condizioni di visibilità.

condizioni di visibilità	velocità di allontanamento
Buona	1 m/s
ridotta	0,5 m/s
nulla	0,3 m/s

Tabella 15: Valori di velocità indicati in letteratura al variare della visibilità (ANAS s.p.a., 2009)

Il processo di esodo degli utenti verso le uscite di soccorso, in condizioni incidentali, viene realizzato da aggregati di individui caratterizzati da comportamenti fisici.

In base allo scenario che si verifica, i soggetti possono essere sottoposti ad un effetto o ad una combinazione di effetti: termici, tossici generati dalle esplosioni o dal fumo.

Utilizzando i parametri relativi all'evacuazione definiti, è possibile calcolare il tempo che gli utenti della galleria impiegheranno per passare da un segmento all'altro verso una locazione sicura. La dose totale ricevuta da ogni occupante di ciascun veicolo (radiazione termica, tossica, ecc.) in evacuazione nel tunnel sarà data dall'integrazione delle dosi ricevute in ogni segmento in relazione al tempo di esodo ad esso relativo.

La determinazione delle componenti del tempo di esodo, sia il tempo di premovimento che il tempo di movimento, è ovviamente legata alle dotazioni impiantistiche del tunnel, che andranno in particolare a ritardare o accelerare la diffusione di fumi, temperature e inquinanti nello spazio. Per poter tener conto dei vari sottosistemi di rilevazione, comunicazione, ventilazione ed illuminazione di cui una galleria può essere dotata, si possono definire parametri che ne descrivono l'influenza, quali ad esempio il tempo di allarme (ovvero il tempo trascorso dall'innesco dell'incendio, dopo il quale tutte le persone sono informate della necessità di evacuare la galleria), la percettibilità delle uscite (ovvero la capacità degli individui di conoscere la posizione delle vie di fuga) e la velocità di propagazione dei fumi.

A titolo esemplificativo, si mostrano i risultati di alcuni studi svolti con elaborati modelli di simulazione [29].

• *Analisi delle condizioni di esodo al variare delle condizioni al contorno*

Lo studio analizzato mostra l'influenza dei parametri sopra definiti sul potenziale numero di vittime associate all'evento incidentale, al variare della distanza dalla prima uscita laterale: sono considerati 4 diversi scenari, in cui l'uscita laterale più vicina è posizionata a 80 m, 160

m, 240 m e 320 m.

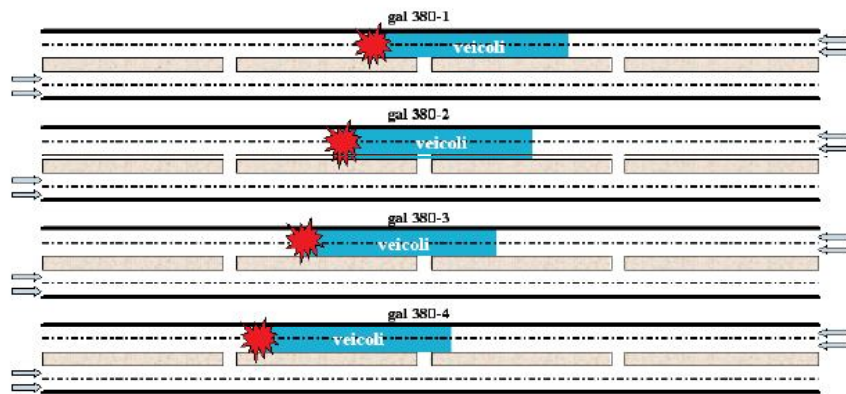


Figura 60: Rappresentazione schematica della coda determinata da un evento incidentale in galleria a doppio fornice

In tutte queste simulazioni è stato considerato il caso in cui, in assenza di ventilazione forzata, la propagazione dei fumi tossici per condizioni naturali avvenga in direzione delle auto incolonnate: le alte temperature e la tossicità dei fumi che raggiungono le persone rappresentano in questo caso una grave fonte di pericolo per la loro incolumità.

In queste condizioni viene fatto un confronto tra il numero di vittime al variare di tre parametri ritenuti fondamentali per la buona riuscita dell'esodo, analizzati nel seguito.

– Percettibilità delle uscite

Il primo parametro considerato è la percettibilità delle uscite, di cui si valuta l'influenza sul livello di danno; facendo variare tale parametro è possibile notare l'impatto che alcune misure adottabili (quali una buona segnaletica e una buona illuminazione) possono avere sul livello di sicurezza di una galleria.

L'unico parametro variato è la visibilità delle vie di fuga.

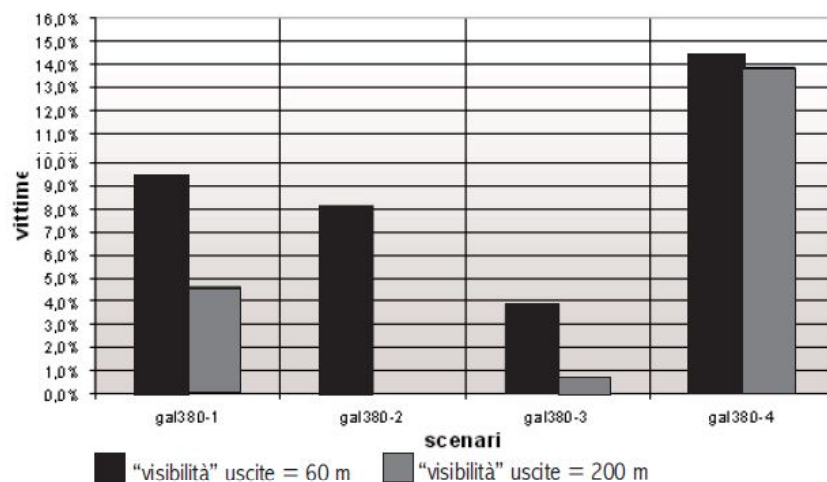


Grafico 16: Variabilità del numero di vittime in funzione della visibilità delle uscite, studio ANAS

Come si osserva, la conoscenza delle persone della posizione delle uscite può variare anche notevolmente l'esito dell'evacuazione: nel caso in cui le uscite risultino poco visibili, un gran numero di persone, non riuscendo ad individuare l'uscita più vicina, spinte dall'obbiettivo di allontanarsi dall'incendio tende ad andare in direzione dell'uscita più lontana, che porta ad una permanenza all'interno della galleria per un tempo maggiore (quindi ad un numero di vittime maggiore essendo questo tempo determinante per stabilire la sopravvivenza o mortalità di una persona).

– Tempo di allarme

Un altro parametro considerato è il tempo che trascorre tra l'innesco dell'incendio e un eventuale allarme che comunica alle persone presenti in galleria la necessità di una evacuazione.

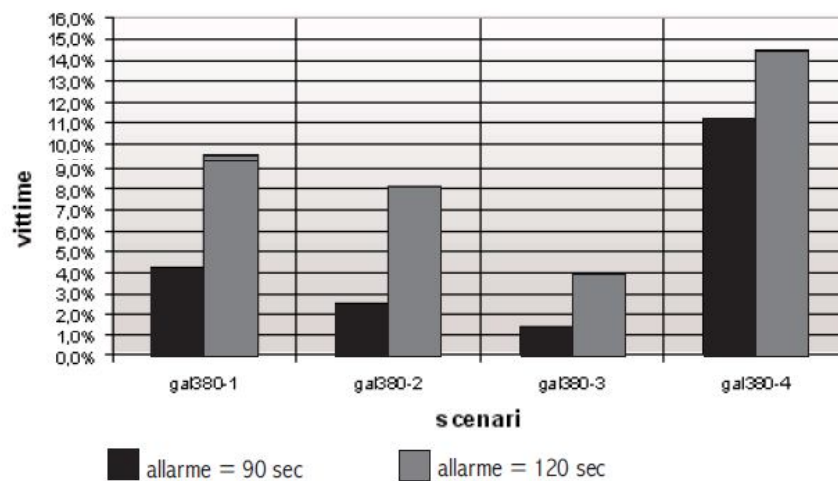


Grafico 17: Variabilità del numero di vittime al variare del tempo di allarme, studio ANAS

Come si può osservare, la riduzione dei tempi necessari per dare l'allarme di soli 30 secondi influenza in maniera significativa l'esito dell'evacuazione.

– Velocità di propagazione fumi

Un ultimo parametro valutato è la velocità di propagazione dei fumi tossici in direzione delle auto incolonnate: in una galleria priva di sistemi di ventilazione (analizzata in questo particolare esempio) tale parametro è legato principalmente a pendenza della galleria e condizioni atmosferiche agli imbocchi.

Nella seguente rappresentazione l'unico parametro che viene fatto variare è proprio la velocità di propagazione dei fumi.

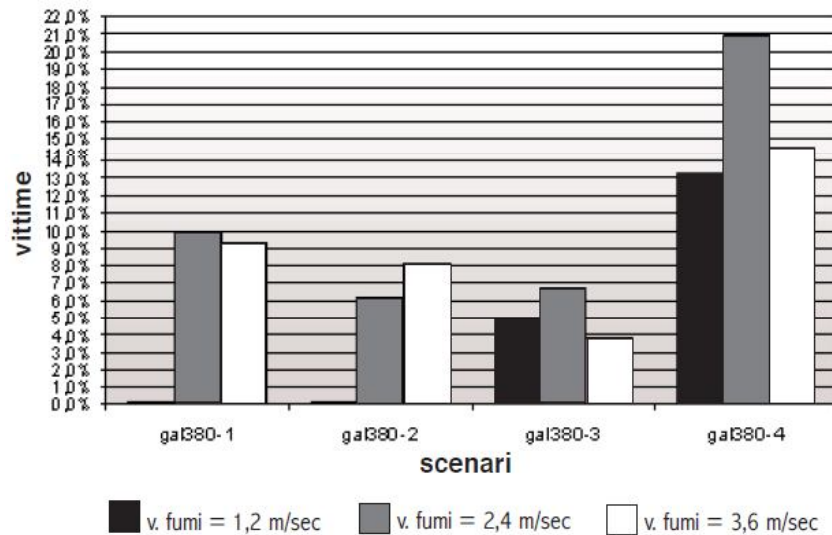


Grafico 18: Variabilità del numero di vittime al variare della velocità di propagazione dei fumi, studio ANAS

L'andamento parabolico del numero medio di vittime in funzione della velocità dei fumi può essere spiegato dal fatto che da un lato una maggior velocità permette ai fumi di propagarsi più rapidamente, dall'altro provoca una minor stratificazione dei fumi, e fa quindi diminuire gli effetti negativi di questi.

Poiché gli effetti del fumo su ogni individuo dipendono sia dal tempo di esposizione che dal grado di stratificazione, la situazione peggiore in termini di vittime si avrà quando la velocità del fumo risulterà abbastanza alta da permettere una rapida propagazione, ma non sufficientemente alta da ridurre considerevolmente la stratificazione.

A partire da queste considerazioni, il modello di esodo proposto definisce il numero di vittime in base, oltre che alla severità dell'evento, alle dotazioni impiantistiche di cui risulta fornita la galleria, che andranno a definire appunto le condizioni in cui l'esodo potrà svolgersi, tra cui la percettibilità delle uscite (legata principalmente a visibilità, illuminazione e segnaletica), il tempo di allarme definito nei precedenti paragrafi e la quantità di fumi presenti (influenzata anch'essa dagli impianti a disposizione, in particolare l'impianto di ventilazione), oltre ad altri parametri definiti nel seguito.

3.2.5 Stima del numero di vittime: il modello di esodo

Riepilogando brevemente quanto precedentemente esposto, il modello di elaborazione presentato individua, in base alla lunghezza del tunnel, da 1 a 4 zone a partire dall'evento iniziatore (di dimensioni diverse in base alla severità dell'evento); in funzione delle caratteristiche impiantistiche della galleria, a ciascuna zona sono associati diversi tempi di permanenza massima e diverse velocità di esodo, variabile nello spazio e nel tempo.

Inoltre sono definite le dimensioni delle diverse zone in cui è suddiviso il tunnel, il tempo massimo di permanenza nelle diverse zone, la velocità di esodo associata ad ognuna nei diversi intervalli temporali, il tempo di premovimento degli utenti e l'eventuale tempo di chiusura della galleria.

Dai dati inizialmente richiesti nel questionario si hanno a disposizione la posizione dell'evento, il numero di corsie, e lo spettro di traffico caratterizzante il tratto stradale considerato, nonché la posizione della via di fuga più vicina all'evento incidentale e l'interdistanza tra di esse.

Tramite il modello di formazione code, a seconda della situazione prevista (in particolare a seconda che sia presente o meno un sistema di chiusura del tunnel in seguito ad un evento) sono a disposizione il numero di veicoli e di utenti presenti nella galleria, e quindi potenzialmente esposti. Con questi dati si imposta il calcolo delle potenziali vittime associate all'incendio derivante dall'evento incidentale.

Si parte dall'ipotesi che gli utenti tendano ad allontanarsi dalla sorgente dell'incendio (a meno che l'uscita più vicina non sia nelle immediate vicinanze, in questo caso si prevede la possibilità di avvicinarsi all'evento per raggiungerla) per portarsi all'uscita di sicurezza più vicina⁸¹: come previsto dalla normativa, “[...]le uscite di sicurezza devono consentire agli utenti di abbandonare a piedi la galleria e raggiungere un luogo sicuro in caso di incidente o incendio. Queste uscite devono costituire anche una via di accesso alla galleria, a piedi, per i servizi di pronto intervento” (DLgs 264/2006, All. 2,2.3).

Partendo da tale assunzione si prevede che una volta raggiunta l'uscita di sicurezza l'utente possa ritenersi salvo⁸².

⁸¹ Questo nella realtà non sempre risulta vero: è possibile che le condizioni all'interno della galleria non permettano di individuare un'uscita e portino l'utente ad allontanarsene

⁸² Questa affermazione non sempre risulta esatta; nella maggior parte dei casi, le uscite di sicurezza non portano direttamente all'esterno della struttura: sarebbe necessario valutare le caratteristiche delle vie di fuga oltre le uscite per appurare la salvabilità degli utenti

Un'altra ipotesi fondamentale del modello prevede che in ogni caso l'evento non porti direttamente alla morte di uno o più individui: questo risulta vero in molti casi, ad esempio in seguito ad alcuni incidenti di mezzi pesanti che portano a sversamento di liquidi infiammabili, ma in molti altri non risulta verificato, soprattutto in caso di schianti e/o esplosioni.

Per caratterizzare l'evento in termini di numero di vittime, si parte dal numero di veicoli presenti in galleria e dai dati relativi allo spettro di traffico.

Per ognuno dei veicoli considerati (autovetture, veicoli pesanti generici, bus) vengono definiti dei valori di lunghezza rappresentativi; i valori pre-impostati, modificabili dall'utente nella fase di compilazione del questionario, sono definiti in base alle dimensioni medie dei veicoli circolanti e corrispondono a:

lunghezza autovettura = 5 m

lunghezza generico veicolo pesante = 12 m

lunghezza autobus = 12 m

In precedenza, tramite il modello di formazione code, è stato definito il numero di veicoli presenti, ripartito in base allo spettro di traffico tra auto, veicoli pesanti e bus. Partendo da questi dati si definisce un veicolo rappresentativo che verrà utilizzato per i calcoli successivi, con lunghezza pari alla media pesata tra quelle relative ai diversi veicoli:

$$l_{\text{media}} = l_l * n_l + l_p * n_p + l_b * n_b$$

Dove l è la lunghezza e n il numero di veicoli presenti in galleria; i pedici l, p, b si riferiscono rispettivamente a veicoli leggeri, veicoli pesanti generici e autobus.

Sono poi definiti dei valori di interdistanza tra i veicoli: anche in questo caso i valori sono pre-impostati ma possono essere variati dall'utente durante la compilazione del questionario; si ipotizza che il valore definito sia lo stesso per tutti i tipi di veicoli presenti, leggeri e pesanti.

A questo punto, avendo definito una distribuzione uniforme del traffico all'interno delle diverse zone, e la presenza di un unico tipo di veicolo rappresentativo con dimensioni medie pesate tra quelli realmente presenti, si associa ad ogni veicolo un certo numero di utenti: il numero di persone presenti in galleria è noto da precedenti calcoli, funzione dei veicoli realmente presenti e dei diversi coefficienti di occupazione ad essi associati; questi vengono equamente ripartiti tra i veicoli (semplicemente dividendo il numero di persone presenti per il numero di mezzi).

Questi passaggi sono introdotti in quanto non risulta possibile, vista la variabilità delle situazioni prevedibili, posizionare con precisione i diversi mezzi in coda nel tunnel: è questo il motivo per cui vengono definite una dimensione media del veicolo e un coefficiente di occupazione medio.

Il passo successivo è determinare la salvabilità dei diversi utenti: per fare ciò si valuta la distanza che ognuno, associato ad un veicolo in una definita posizione, dovrà percorrere per raggiungere la via di fuga più vicina, e in base alla velocità di esodo ad esso associata si determina il tempo necessario per compiere questo tragitto. Questo periodo temporale sarà poi confrontato con il periodo massimo di permanenza nella zona in cui l'utente si trova per decretarne l'eventuale morte.

Viene prima di tutto definita la distanza di ogni veicolo dalla via di fuga più vicina: nota la posizione del primo veicolo incolonnato (corrispondente alla posizione dell'evento iniziatore), la posizione della via di fuga più prossima a questo e il di stanziamento con le successive, la lunghezza del veicolo medio e l'interdistanza tra i veicoli è possibile definire per ogni veicolo presente la distanza dall'uscita di emergenza più vicina, corrispondente al tragitto che gli utenti associati a questo veicolo dovranno percorrere.

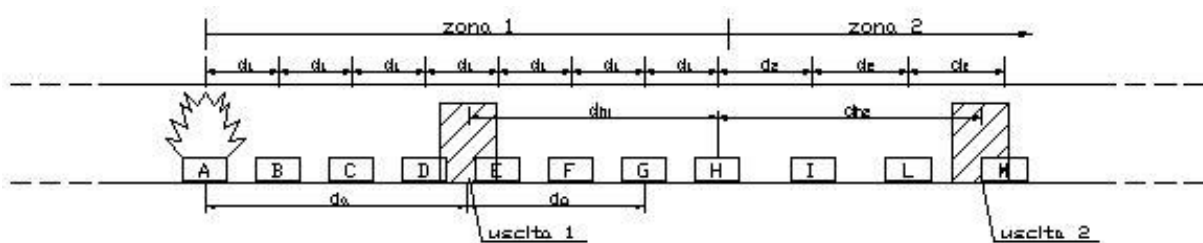


Figura 61: Schematizzazione della distanza di ogni veicolo incolonnato dalla più vicina via di fuga⁸³

⁸³ Nell'esempio in figura, d_A è la distanza tra l'evento (e quindi il primo veicolo) e la più prossima via di fuga, dato di input (richiesta nel questionario); definita la lunghezza del veicolo di riferimento e l'interdistanza, la cui somma nella zona 1 è indicata con d_1 (e che aumenterà nelle altre zone avendo un'interdistanza tra i veicoli crescente), è nota anche la distanza tra il veicolo B e la via di fuga (corrispondente in questo caso alla differenza tra d_A e d_1).

Per tutti gli altri veicoli la distanza dall'uscita si determina allo stesso modo, per differenza.

Una volta superata la prima uscita (cioè per tutti i mezzi dopo il veicolo E nell'esempio) bisogna valutare quale delle 2 vie di fuga tra cui si trova il veicolo risulta più vicina; la distanza d_H sarà ad esempio definita dal minore tra i valori d_{H1} e d_{H2} , dove:

- d_{H1} è dato dalla sommatoria tra la distanza del veicolo H dall'evento incidentale e d_A (che risulterà una differenza essendo in questo caso d_A un valore negativo),

- d_{H2} è dato dalla differenza tra la distanza della seconda uscita dall'evento (nota essendo note la distanza della prima e l'interdistanza tra le 2) e la distanza del veicolo H dallo stesso.

Il calcolo si ripeterà per tutti i veicoli presenti.

Nello studio proposto si prevede che i soggetti in fuga si portino sempre all'uscita più vicina verso l'esterno del tunnel (allontanandosi cioè dall'evento incidentale), ad eccezione che vi sia un'uscita ravvicinata nella direzione opposta: si prevede una distanza limite di 20 m (che può essere variata dall'utente semplicemente inserendo un nuovo valore nella pagina di calcolo).

Si prevede anche una distanza minima evento-uscita di sicurezza: se quest'ultima risulta posizionata ad una distanza dall'evento inferiore a 10 m⁸⁴ nessun utente cercherà di raggiungerla avvicinandosi all'evento: si ipotizza quindi che gli utenti tendano ad allontanarsi dall'evento, giudicando questa uscita troppo pericolosa (o non vedendola nemmeno a causa dei fumi prodotti)⁸⁵.

Definito il numero di soggetti associati ad ogni veicolo, questi vengono posizionati in corrispondenza del baricentro del veicolo stesso (la cui lunghezza come detto sarà data dalla media pesata tra i veicoli presenti nel tunnel); se la galleria ha più di una corsia per senso di marcia, si prevede semplicemente di moltiplicare il numero previsto di utenti per ciascuna vettura per il numero di corsie presenti.

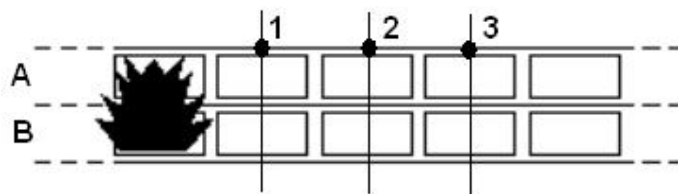


Figura 62: Modellazione dello strumento di calcolo in caso di galleria a doppia corsia per senso di marcia⁸⁶

Si trascura quindi la distanza trasversale tra i veicoli, e si ipotizza di posizionare tutti gli utenti nelle vetture incolonnate nella corsia più vicina alle uscite di sicurezza presenti.

A questo punto per ogni utente conosciamo la distanza dalla via di fuga più prossima, e a seconda della zona in cui si trova risulta definita anche la velocità di esodo (variabile anche nel tempo): con questi valori calcoliamo facilmente il tempo necessario all'utente per raggiungere l'uscita.

⁸⁴ Anche questo valore è modificabile dall'utente

⁸⁵ Riassumendo un utente in fuga avrà 2 possibilità: se è presente un'uscita a meno di 20 m di distanza dal veicolo a cui associato nella direzione dell'evento iniziatore cercherà di raggiungerla, ad eccezione che questa sia a meno di 10 m di distanza dall'evento; in caso contrario si allontanerà sempre dall'evento, cercando di raggiungere una via di fuga in tempo utile

⁸⁶ Nell'esempio si ipotizza di posizionare gli utenti delle vetture presenti nelle 2 corsie nei punti individuati dai numeri 1, 2, 3: si tratta il problema come se ci fosse un'unica corsia (ipotizzando che le 2 autovetture delle corsie A e B siano su un'unica corsia, fisicamente impossibile)

Ad ogni zona è attribuito un tempo di permanenza massimo: se l'utente si trova in questa zona oltre questo periodo, non si considera più in grado di autosalvarsi e il modello di calcolo ne decreta la morte.

I primi secondi dall'evento sono dati dal tempo di premovimento, necessario agli utenti per rendersi conto della situazione e decidere di abbandonare il veicolo: il tempo di movimento a disposizione dell'utente per allontanarsi dal veicolo sarà quindi dato dal tempo di permanenza massimo della zona e il tempo di premovimento stesso.

Ora si presentano 2 diverse possibilità:

- 1 la via di fuga utile si trova nella stessa zona dell'utente considerato: in questo caso se l'utente la raggiunge in tempo si ritiene salvo, al contrario se ne decreta la morte.
- 2 la via di fuga utile si trova in un'altra zona: in questo caso se l'utente riesce a raggiungere la fine della sua zona in tempo, continuerà il tragitto nella successiva, con possibili variazioni di velocità e diversi tempi di permanenza massimi: come nel caso precedente si valuta se è in grado di raggiungere la via di fuga nel tempo a sua disposizione.

In questo modo si raggiunge il risultato finale del modello, si definisce cioè il numero di deceduti e sopravvissuti⁸⁷.

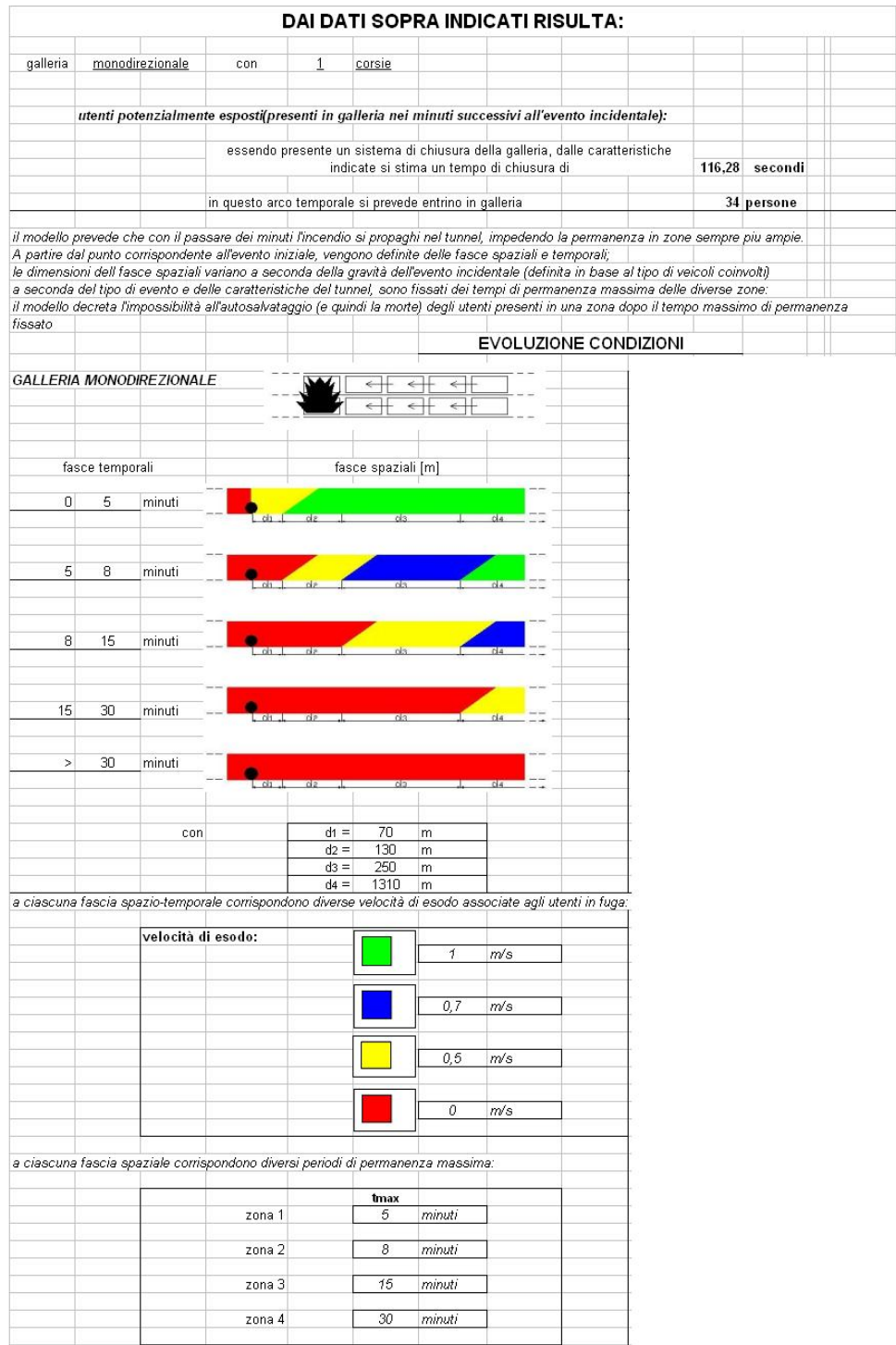
3.2.6 Report dei risultati

L'ultima fase dopo l'elaborazione dei dati è la comunicazione all'utente dei risultati; a tale scopo è prevista una pagina di riepilogo dove viene definita la situazione e vengono espressi i risultati: anche in questo caso si è cercato di essere il più schematici possibile, per dare all'utente un'informazione chiara e di rapida intuizione.

Sono previste 2 differenti schemi per gallerie unidirezionali e bidirezionali.

⁸⁷ In 'ALLEGATO 1' sono analizzati tutti i passaggi previsti nel modello di calcolo per raggiungere il risultato

Gallerie unidirezionali



dall'elaborazione dei dati forniti riguardanti le caratteristiche della galleria e dell'evento incidentale analizzato, si prevede un numero di vittime pari a **4**

Figura 63: Esempio di rappresentazione dei risultati ottenuti dal modello in caso di galleria unidirezionale

Galleria bidirezionale

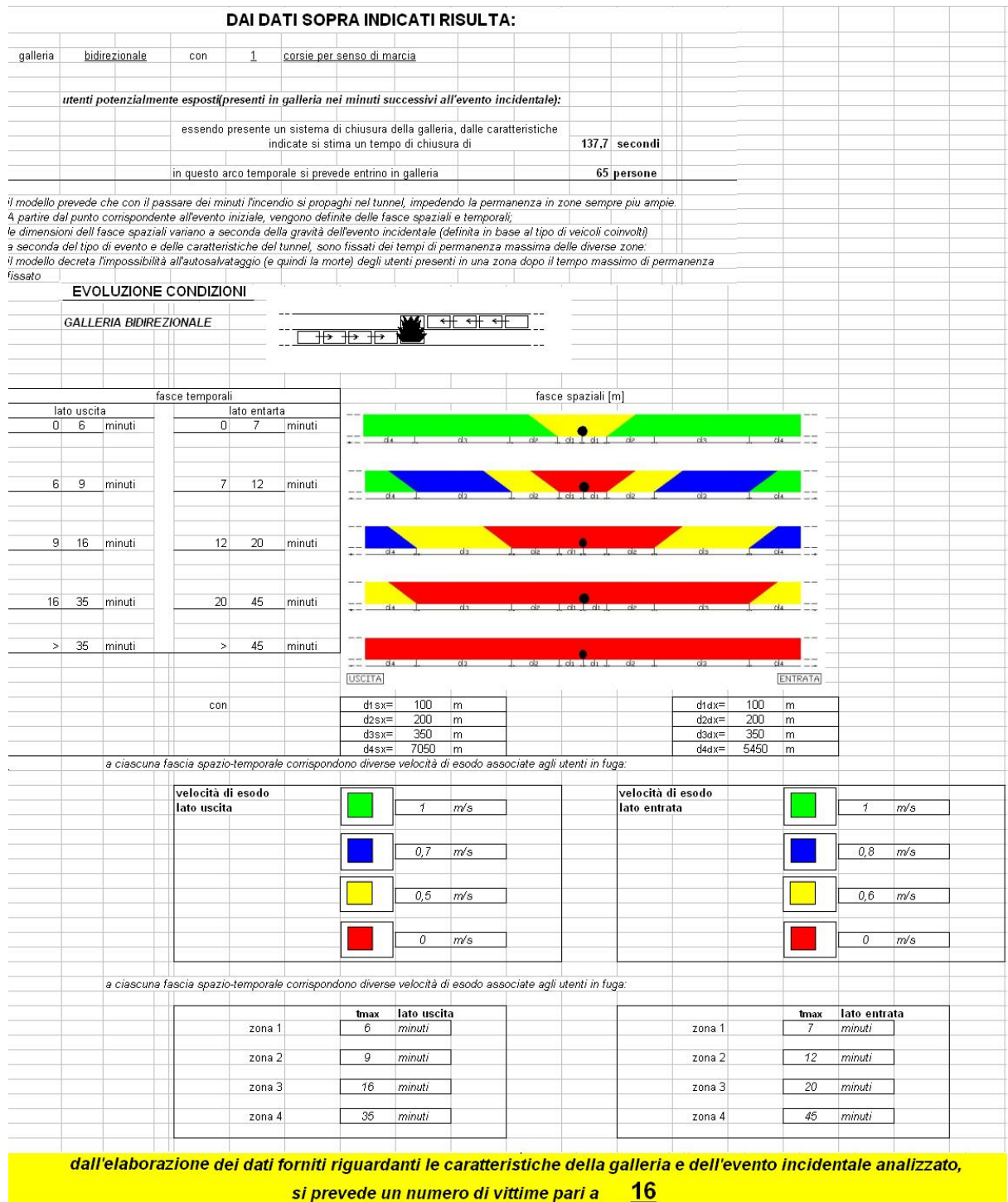


Figura 64: Esempio di rappresentazione dei risultati ottenuti dal modello in caso di galleria bidirezionale; nell'esempio è riportato il particolare caso in cui la galleria è munita di impianto di ventilazione longitudinale: solo in questo caso i valori di velocità e tempo di massima permanenza si differenziano nelle 2 direzioni

In entrambi i casi, in modo chiaro ed intuitivo vengono descritte tutte le caratteristiche definite dal modello, che portano all'elaborazione del risultato.

Si definisce prima di tutto il tipo di galleria e il numero di corsie; successivamente viene data indicazione del numero di vetture risultanti coinvolte nell'evento, a seconda che sia presente un sistema di allarme⁸⁸ o meno.

Nella stessa pagina, si riporta la schematizzazione prevista della galleria, con la suddivisione in zone, di cui si definiscono la lunghezza e le caratteristiche di esodo⁸⁹.

3.3 Potenzialità dello strumento di calcolo

Per definire il numero di vittime, il modello di calcolo studiato definisce prima di tutto la distanza di ogni veicolo (a cui sono associati un certo numero di soggetti) dall'evento incidentale e dalla più vicina uscita di sicurezza, quest'ultima corrispondente alla distanza che gli utenti associati al veicolo dovranno percorrere per salvarsi. Dal questionario iniziale sono disponibile tra gli altri dati la posizione dell'evento iniziatore e le posizioni di tutte le uscite presenti nel tunnel, e da questi si ricavano i dati necessari.

Ad ogni veicolo viene associata l'uscita di sicurezza più "sicura": si ipotizza che gli utenti tendano ad allontanarsi dall'evento, quindi si prevede che si porteranno all'uscita più vicina tra quelle presenti verso l'uscita del tunnel; se però vi è un uscita molto ravvicinata alla posizione iniziale dell'utente (nel modello si ipotizza una distanza di 20 m, che può essere modificata) allora si prevede la possibilità di avvicinarsi all'evento durante l'esodo (fino ad una distanza di 10 m dall'incendio, oltre la quale non si prevede di avvicinarsi).

Una volta definita tale distanza, in base alla distanza dall'incendio viene verificata la zona iniziale in cui si trova l'utente, quindi la velocità iniziale di esodo, e la zona in cui si trova l'uscita da raggiungere, stimando così il numero di zone da attraversare per salvarsi.

Risulta inoltre definita una lunghezza media dei veicoli, data dalla media pesata delle lunghezze dei veicoli presenti (bus, leggeri e pesanti, in base allo spettro di traffico) e sono a disposizione i valori di interdistanza nelle 4 zone.

A questo punto avendo definito i periodi di massima permanenza di ogni zona e la velocità di

⁸⁸ In questo caso si riporta anche il tempo di chiusura previsto

⁸⁹ In particolare la velocità di esodo e gli intervalli di tempo che ne definiscono la variabilità, nonché il tempo di permanenza massimo previsto per le diverse zone

esodo all'interno delle diverse porzioni di galleria al variare del tempo, nonché il periodo di premovimento è definito il tempo di esodo di ogni soggetto all'interno di ognuna delle porzioni in cui il tunnel è suddiviso, cioè il tempo necessario per raggiungere la fine della zona stessa: ogni volta che l'utente raggiungerà questo punto verranno confrontati il tempo di esodo trascorso nella zona e il periodo di permanenza massimo (funzione anche del tempo trascorso nell'attraversare le zone precedenti) e si decreterà l'eventuale morte del soggetto.

Se si valuta che il tempo di esodo sia inferiore al tempo massimo definito, l'utente continuerà il suo avvicinamento alla via di fuga: questo confronto verrà ripetuto fino all'arrivo per tutti i soggetti presenti; si avrà così il numero totale di vittime causato dall'incendio, corrispondente al numero di utenti non in grado di uscire dal tunnel in tempo utile.

4. Applicazione dello strumento di calcolo a tre casi di studio

Nel presente capitolo si procede all'applicazione del modello ad alcuni casi reali: sono state selezionate 3 particolari gallerie, di cui sono note le caratteristiche strutturali ed impiantistiche.

Il primo caso trattato riguarda il traforo di confine del Monte Bianco, importante via di collegamento tra Italia e Francia. Questo tunnel risulta particolarmente significativo in quanto, in seguito al tragico evento incidentale avvenuto nel 2009, ha subito una riqualificazione che lo ha portato ad essere uno standard qualitativo di eccellenza in materia di sicurezza.

Gli altri 2 casi trattati sono gallerie italiane, la galleria Morgex Nord e la galleria Colle Capretto.

Si sottolinea che, al contrario del Traforo del Monte Bianco, le ultime due gallerie sono sottoposti alla giurisdizione del DLgs 264/2006, essendo ubicate interamente su suolo italiano⁹⁰.

⁹⁰ Il Traforo del Monte Bianco non è direttamente regolamentato dal DLgs 264/2006, ma da norme di carattere internazionale, universalmente riconosciute: seppur il metodo proposto si concentra su gallerie nazionali, si ribadisce l'idea per cui la sicurezza sia da ritenere un valore convenzionalmente ed universalmente definibile

4.1 Traforo del Monte Bianco

Il traforo del monte bianco è ritenuto oggi uno dei tunnel più sicuri esistenti, dopo gli interventi di ammodernamento eseguiti dopo il 1999.

Il traforo viene inaugurato nel 1965, e rappresenta un'importante via di comunicazione e scambio per persone e merci tra Italia e Francia, al di qua e al di là della barriera alpina, con un traffico annuale che si avvicina ai 2 milioni di veicoli⁹¹.



Figura 65: Collocazione geografica del Traforo del Monte Bianco rispetto ai principali centri urbani italiani e francesi

Per la costruzione e conseguente gestione dell'infrastruttura, vengono create nel 1957 due società: in Italia la “Società Italiana per Azioni per il Traforo del Monte Bianco”, in sigla SITMB, in Francia la “Société du Tunnel du Mont Blanc”, STMB.

⁹¹ Nel 2013 attraverso il Traforo del Monte Bianco sono transitati 1783964 veicoli, con una media giornaliera di 4888 veicoli (dati GEIE-TMB)

Nel 1999, in seguito al tragico incidente del 24 marzo, il traforo fu chiuso al traffico: nei tre anni seguenti furono eseguiti importanti lavori di ripristino ed ammodernamento del tunnel.

Nel 2002 il tunnel fu riaperto al traffico: tutte le attività relative alla gestione e manutenzione del traforo vennero affidate ad un organismo binazionale, il GEIE-TMB, che le esercita unitariamente per conto delle due società nazionali, l'italiana SITMB e la francese STMB (il termine della concessione è stabilito al 2050)

Il GEIE-TMB riunisce 181 dipendenti⁹², a cui si aggiungono i 70 agenti adibiti all'intervento immediato antincendio, affidato ad una impresa esterna.

Come definito nella “Carta dei servizi del Traforo del Monte Bianco, *la sicurezza del personale e degli utenti è l'obbiettivo verso il quale tendono tutte le attività di gestione unitaria del traforo.*

A tale scopo il GEIE-TMB è costantemente impegnato nel miglioramento dei livelli di sicurezza, attraverso iniziative volte a ridurre da un lato la probabilità di incidente, dall'altro le conseguenze di un eventuale incidente su veicoli e persone⁹³.

4.1.1 Regolamento di circolazione

Lo strumento principale adottato per garantire la sicurezza degli utenti all'interno del tunnel, è rappresentato dal regolamento di circolazione, che definisce le regole di circolazione in galleria.

Le principali regole fissate sono:

- divieto di accesso nel traforo per alcune categorie di veicoli: veicoli classificati come Euro 0, Euro 2, e veicoli che trasportano materie pericolose⁹⁴ autorizzazione di accesso preventiva per alcune categorie di veicoli (specialmente veicoli eccezionali)
- regole di circolazione che devono essere rispettate dagli utenti: sono previsti limiti di velocità minimo e massimo, corrispondenti a 50 km/h e 70 km/h; si prevede che gli

⁹² Suddivisi tra dipartimento amministrativo e finanziario, servizi funzionali e direzione, dipartimento tecnico ed informatico, dipartimento sicurezza e traffico, dipartimento clientela e pedaggio

⁹³ Protezione e prevenzione, interventi volti alla riduzione del rischio

⁹⁴ Ai sensi del paragrafo 1.9.5.2 dell'ADR il Traforo del Monte Bianco è classificato come galleria di categoria “E”, che prevede restrizione all'accesso per tutti i tipi di merci pericolose tranne rifiuti ospedaliere e scorie radioattive [1]

utenti si mantengano in ascolto permanente della radio FM durante il transito; sono poi previsti dei limiti di interdistanza, pari a 150 m tra i veicoli, 300 m tra autobus e veicolo e 1200 m tra 2 autobus⁹⁵

- comportamenti da adottare in caso di evento: si prevede una distanza minima di 100 m tra i veicoli, e di utilizzare se possibile le piazzole di sosta (poste ad intervalli regolari di 600 m); in caso di anomala emissione di fumo del proprio veicolo, si prevede la fermata in corrispondenza della piazzola di sosta, con motore spento e luci di emergenza attivate.



Figura 66: Regole di circolazione previste dalla “Carta dei Servizi del Traforo del Monte Bianco”

4.1.2 Caratteristiche strutturali e impiantistiche

Le caratteristiche strutturali del traforo sono così schematizzabili:

lunghezza	11,6 km
larghezza della carreggiata	7 m
numero di luoghi sicuri di soccorso	37 luoghi sicuri collegati a galleria di soccorso
altezza s.l.m. agli ingressi	1274 m (Francia), 1381 m (Italia)
altezza massima s.l.m.	1395,5 m (a metà galleria)
spessore roccia sulla verticale	Superiore a 2 km su più della metà del tunnel
durata della traversata	12 minuti a 60 km/h

Tabella 16: Scheda tecnica del Traforo del Monte Bianco (GEIE-TMB)

Per quanto riguarda le dotazioni impiantistiche e di sicurezza, come già detto il Traforo del Monte Bianco rappresenta uno dei sistemi galleria più sicuri: dispone di una Gestione Tecnica Centralizzata (GTC), un sistema informatico che controlla e sorveglia permanentemente la

⁹⁵ All'interno del tunnel sono presenti delle segnalazioni luminose blu, poste ad una distanza regolare di 150 m, che aiutano il conducente a mantenere la distanza prescritta; il flusso di traffico è regolato mediante la gestione informatica della partenza di ciascun veicolo

galleria in tutta la sua lunghezza ed elabora i dati provenienti da oltre 35000 punti di controllo. Esso è in grado di rilevare qualunque anomalia e di proporre all'operatore lo scenario che gli consenta di utilizzare la segnaletica adeguata, regolare la ventilazione, informare gli utenti (radio FM, pannelli a messaggio variabile), dare l'allarme alle squadre di soccorso e comunicare con l'esterno.

Nel seguito si definiscono brevemente le principali tecnologie adottate nel traforo:

- gestione tecnica centralizzata (GTC): si tratta di un sistema di supporto alle decisioni che fornisce informazioni circa il numero di veicoli in transito e circa i parametri di funzionamento degli impianti, rileva eventuali anomalie e propone all'operatore lo scenario che gli consenta di intervenire al meglio; offre quindi assistenza agli operatori per agire sui comandi degli impianti della galleria
- postazioni di controllo e di comando (PCC): sono presenti 2 PCC, una svolge attività di controllo della circolazione nel tunnel, l'altra si occupa delle condizioni di circolazione sugli itinerari di accesso
- aree di regolazione del traffico pesante: per poter accedere al traforo, i veicoli pesanti devono accreditarsi presso le aree di regolazione e controllo, dove si verifica la loro conformità alle condizioni di transito nel traforo; il controllo sulle merci trasportate spetta alla polizia stradale o al servizio di dogana
- illuminazione, rivestimenti delle pareti, alimentazione: l'impianto di illuminazione prevede lampade disposte ogni 5 m; le pareti laterali, rivestite con pannelli di colore chiaro, aumentano la luminosità. L'alimentazione del tunnel è garantita da 2 linee elettriche da 20 kV
- impianti per il controllo della corrente d'aria: in caso di allarme antincendio, è prevista l'attivazione di un dispositivo longitudinale per la stabilizzazione della corrente d'aria, che permette di controllarne la velocità e favorire l'estrazione dei fumi, garantita da 116 bocche con apertura telecomandata⁹⁶
- impianti per la segnalazione ed il controllo del flusso dei veicoli: sono previsti sistemi di segnalazione che informino i clienti in tempo reale sulle condizioni di circolazione ed i comportamenti da tenere: pannelli a messaggio variabile, semafori, rete di diffusione delle frequenze radio FM, oltre a 2 barriere agli ingressi e 36 semibarriere

⁹⁶ Si prevede l'estrazione di fumi per sezioni di 600 m: la capacità di estrazione dei fumi nel traforo è pari a 156m³/sec su ognuna di queste sezioni

all'interno della galleria⁹⁷.



Figura 67: Pannelli a messaggio variabile reperibili all'ingresso e all'interno del traforo

- impianti per il controllo di velocità e interdistanza: sono disposti nel tunnel dei radar che, in caso di superamento del limite di velocità di 70 km/h, forniscono in tempo reale informazioni al Servizio di Polizia; sulle pareti della galleria sono presenti, a intervalli regolari di 150 m, delle coppie di luci blu, per aiutare i conducenti a rispettare l'interdistanza
- portale termografico: il transito dei veicoli pesanti sotto questo portale, consente al personale del traforo di rilevare eventuali surriscaldamenti anomali, e di procedere alle conseguenti verifiche
- impianti per la sicurezza del cliente in caso di incendio: sono presenti 116 nicchie di sicurezza, disposte ogni 100 m e dotate di estintori e di un apparecchio di chiamata SOS; ogni 300 m è previsto un sistema di porte taglia fuoco, che garantiscono l'accesso ai 37 luoghi sicuri⁹⁸
- impianti di rilevazione automatica di evento e di videosorveglianza: il tunnel è dotato di telecamere poste ogni 100 m che trasmettono in tempo reale immagini alla GTC, permettendo di rilevare prontamente eventuali anomalie
- impianti di rilevazione antincendio: un cavo termometrico copre tutta la lunghezza del tunnel, e segnala in tempo reale al PCC eventuali aumenti di temperatura
- impianti antincendio: sono previste 80 nicchie antincendio, dotate di una bocchetta

⁹⁷ Il GEIE-TMB informa i clienti durante il viaggio via radio FM e mediante i pannelli a messaggio variabile, su cui si riportano informazioni relative a incidenti, cantieri, code, meteo o, in caso di traffico regolare, consigli di guida e informazioni di sicurezza

⁹⁸ Questi ambienti sono termicamente isolati, alimentati con aria fresca, dotati di una riserva d'acqua e collegati al PCC; sono poi collegati alla galleria d'emergenza

antincendio

- impianti per l'evacuazione delle persone: in caso di evento che richieda l'evacuazione delle persone, i canali di adduzione dell'aria fresca permettono alle squadre di soccorso di raggiungerle; all'interno di questi canali possono circolare veicoli elettrici per il trasporto di persone
- postazioni di intervento immediato: sono presenti 3 postazioni di intervento immediato, presidiate da personale qualificato per l'intervento antincendio e con dotazioni opportune.

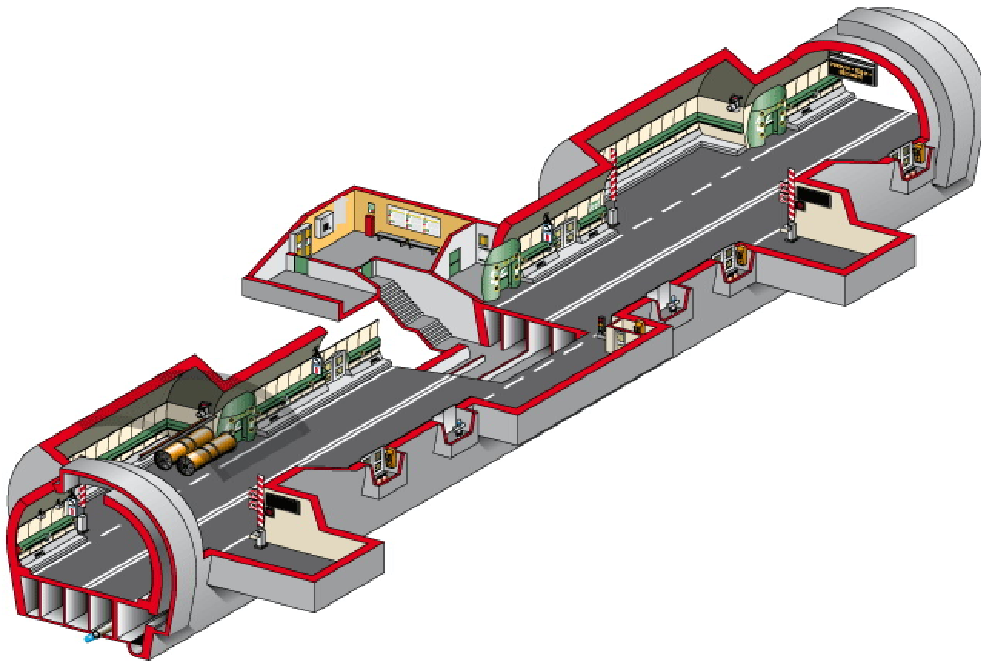


Figura 68: Rappresentazione schematica del Traforo del Monte Bianco con rappresentazione delle dotazioni impiantistiche descritte

4.1.3 Implementazione del foglio di calcolo

Definite le caratteristiche strutturali ed impiantistiche del tunnel, la compilazione del questionario alla base del modello di calcolo risulta come segue:

QUESTIONARIO GALLERIA

INFORMAZIONI GENERICHE

<p>nome <input style="width: 100%;" type="text" value="TRAFORO DEL MONTE BIANCO"/></p> <p>località <input style="width: 100%;" type="text" value="COURMAYEUR - CHAMONIX"/></p> <p>gestore <input style="width: 100%;" type="text" value="GEIE-TMB"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center; font-size: small;">coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:</th> </tr> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center; font-size: x-small;">coefficienti di occupazione veicoli:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">leggeri</td> <td style="width: 20px;"></td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">1,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">pesanti</td> <td></td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">autobus</td> <td></td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">30</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">coefficiente ora di punta</td> <td></td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">2,6</td> </tr> </tbody> </table>	coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:			coefficienti di occupazione veicoli:			leggeri		1,5	pesanti		1	autobus		30	coefficiente ora di punta		2,6	<p><i>caratteristiche tecniche generali</i></p> <p>la galleria è <input type="radio"/> monodirezionale <input checked="" type="radio"/> bidirezionale</p> <p>numero corsie per senso di marcia <input style="width: 40px;" type="text" value="1"/></p> <p>lunghezza galleria <input style="width: 40px;" type="text" value="11600"/> m</p> <p>traffico giornaliero medio (TGM) <input style="width: 40px;" type="text" value="2444"/> veicoli/giorno/direzione</p> <p>velocità (v media o vmax se nn disponibile) veicoli leggeri <input style="width: 40px;" type="text" value="70"/> km/h pesanti-autobus <input style="width: 40px;" type="text" value="70"/> Km/h</p> <p>spettro di traffico % veicoli pesanti <input style="width: 40px;" type="text" value="30"/> % % autobus <input style="width: 40px;" type="text" value="1"/> %</p> <p>trasporto ADR <input type="radio"/> consentito <input checked="" type="radio"/> non consentito</p>
coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:																			
coefficienti di occupazione veicoli:																			
leggeri		1,5																	
pesanti		1																	
autobus		30																	
coefficiente ora di punta		2,6																	

DEFINIZIONE CARATTERISTICHE GALLERIA

<p>USCITE DI SICUREZZA</p> <p>numero uscite di sicurezza <input style="width: 40px;" type="text" value="37"/></p> <p>interdistanza <input checked="" type="radio"/> regolare <input type="radio"/> non regolare</p> <p>inserire valore interdistanza tra uscite <input style="width: 40px;" type="text" value="305"/> m</p>	<p>SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANIZZATA</p> <p>sistema di ventilazione presente <input type="radio"/> longitudinale <input type="radio"/> semitrasversale <input checked="" type="radio"/> trasversale <input type="radio"/> non presente</p> <p>impianto di aspirazione fumi <input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente</p> <p style="text-align: center;">-</p>																														
<p>SEGNALETICA</p> <p><u>esterna:</u> sistema di chiusura galleria: <input checked="" type="radio"/> previsto <input type="radio"/> non previsto</p> <p><u>interna:</u></p>	<p>selezionare i dispositivi presenti</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td style="width: 15px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>semafori</td> <td style="width: 20px;"></td> <td style="width: 20px;"></td> <td style="width: 20px;"></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>pannelli a messaggio variabile</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>barriere all'imbocco</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>segnaletica di emergenza <input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente</p> <p>selezionare i dispositivi presenti</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td style="width: 15px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>semafori</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>pannelli a messaggio variabile</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>barriere</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	<input checked="" type="checkbox"/>	semafori				<input checked="" type="checkbox"/>	pannelli a messaggio variabile				<input checked="" type="checkbox"/>	barriere all'imbocco				<input checked="" type="checkbox"/>	semafori				<input checked="" type="checkbox"/>	pannelli a messaggio variabile				<input checked="" type="checkbox"/>	barriere			
<input checked="" type="checkbox"/>	semafori																														
<input checked="" type="checkbox"/>	pannelli a messaggio variabile																														
<input checked="" type="checkbox"/>	barriere all'imbocco																														
<input checked="" type="checkbox"/>	semafori																														
<input checked="" type="checkbox"/>	pannelli a messaggio variabile																														
<input checked="" type="checkbox"/>	barriere																														
<p>ILLUMINAZIONE</p> <p>illuminazione ordinaria <input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente</p> <p>illuminazione di emergenza <input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente</p> <p>illuminazione di sicurezza <input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente</p>	<p>RILEVAZIONE E CONTROLLO</p> <p>selezionare i dispositivi presenti</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td style="width: 15px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>sistema di video-sorveglianza</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>rilevatori di fumi / incidenti</td> </tr> </table> <p>centro di controllo 24h <input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente</p>	<input checked="" type="checkbox"/>	sistema di video-sorveglianza	<input checked="" type="checkbox"/>	rilevatori di fumi / incidenti																										
<input checked="" type="checkbox"/>	sistema di video-sorveglianza																														
<input checked="" type="checkbox"/>	rilevatori di fumi / incidenti																														

STAZIONI DI COMUNICAZIONE EMERGENZA		<input checked="" type="checkbox"/> telefoni per le emergenze <input checked="" type="checkbox"/> trasmissioni radio <input type="checkbox"/> altoparlanti <input checked="" type="checkbox"/> pulsanti d'allarme
EROGAZIONE IDRICA	impianto idrico antincendio inserire valori interdistanza idranti (se presenti) (se non regolare inserir valore maggiore)	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente <input type="text" value="143"/> m
SISTEMI DI MITIGAZIONE	sistemi di contenimento e spegnimento	<input checked="" type="radio"/> presenti <input type="radio"/> non presenti
RESISTENZA AL FUOCO	REI strutture	<input checked="" type="radio"/> minore di REI 120 <input type="radio"/> maggiore di REI 120
	REI impianti	<input checked="" type="radio"/> minore di REI 120 <input type="radio"/> maggiore di REI 120
PAVIMENTAZIONI	selezionare il tipo di pavimentazione	<input checked="" type="radio"/> drenante <input type="radio"/> non drenante
DRENAGGI	sistema di drenaggio della piattaforma stradale	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
	se previsto:	<input checked="" type="checkbox"/> è previsto dreno liquidi infiammabili
ACCESSO MEZZI DI CONTENIMENTO		<input type="checkbox"/> collegamenti tra fornici (solo per monodirezionali) <input type="checkbox"/> gallerie carrabili <input checked="" type="checkbox"/> stazioni in loco
	selezionare accessi presenti (collegamento fornici solo per monodirezionale) inserire valore interdistanza accessi(se presenti) (se interdistanza non regolare inserire valore maggiore)	<input type="text" value="2900"/> m

Figura 69: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, questionario

In funzione di queste caratteristiche, il modello attribuisce al tunnel un punteggio molto elevato per la definizione della velocità di esodo degli utenti, corrispondente alla situazione migliore.

DEFINISCO Vesodo						punteggio
	illuminazione	ordinaria	si			1,5
		di emergenza	si			1,5
		di sicurezza	si			2
	segnaletica d'emergenza		si			1,5
	ventilazione		trasversale			3
	impianto aspiraz. Fumi		si			0
	visibilità		standard			0

somma punteggio=
9,5

risulta fascia 1

In seguito a cui i valori di velocità di esodo vengono definiti come segue:

1. MERCI PERICOLOSE

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-4,5 min	0,4	1	1	1
4,5-7 min	0	0,4	0,6	1
7-12 min	0	0	0,4	0,6
12-20 min	0	0	0	0,4
>20 min	0	0	0	0

2. VEICOLI PESANTI

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-5 min	0,6	1	1	1
5-8 min	0	0,6	0,8	1
8-15 min	0	0	0,6	0,8
15-30 min	0	0	0	0,6
>30 min	0	0	0	0

3. AUTOVETTURE

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-7 min	0,75	1	1	1
7-12 min	0	0,75	0,9	1
12-20 min	0	0	0,75	0,9
20-45 min	0	0	0	0,75
>45 min	0	0	0	0

Figura 70 a-b: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, velocità di esodo

Il sottomodello per la definizione del tempo di permanenza massima nelle varie zone, definisce per il traforo un punteggio che lo colloca in fascia 2 su 3 a disposizione; il non raggiungimento della fascia di punteggio migliore è dovuto principalmente alla resistenza al fuoco di strutture ed impianti: come già detto sopra, non avendo a disposizione dati certi si è scelto di classificare queste 2 caratteristiche come non soddisfacenti⁹⁹.

⁹⁹ Si sottolinea che se si verificasse che strutture ed impianti abbiano caratteristiche ignifughe pari almeno a REI 120, il punteggio attribuito alla galleria la collocherebbe nella fascia migliore

t_{max}									
									punteggio
		ventilazione meccanizzata			trasversale				3
		impianto di aspirazione fumi			presente				0
		drenaggi			si				1
			dreno incombustibili		si				1
		pavimentazione			drenante				-1
		resistenza al fuoco							
			strutture		REI<120				0
			dispositivi antincendio impianti		non presenti				0
		impianto idrico antincendio			presente				1
			interdistanza idranti		143	m			0,25
		accesso mezzi di contenimento			in loco				1,5
			interdistanza accessi		2900	m			0

somma punteggio=
6,75

risulta fascia 2

I periodi associati a tale fascia risultano:

1. MERCI PERICOLOSE

valori considerati-fascia	<u>2</u>			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[<u>min</u>]	4,5	7	12	20

2. VEICOLI PESANTI

valori considerati-fascia	<u>2</u>			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[<u>min</u>]	5	8	15	30

3. AUTOVETTURE

valori considerati-fascia	<u>2</u>			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[<u>min</u>]	7	12	20	45

Figura 71 a-b: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, tempo di massima permanenza

I diversi sottomodelli definiscono poi:

– tempo di chiusura della galleria pari a 116 secondi

sistema di chiusura galleria	PREVISTO				
	tempo di chiusura - valore iniziale =			3 minuti 180 secondi	
centro di controllo	SI				
sistemi di rilevazione	video-sorveglianza rilevatori fumo-incidente				
<i>se esistono sistemi di rilevazione fumo-incendi, t medio diminuisce (X0,9)</i>					
<i>se esistono sistemi di rilevazione e sono associati a un centro di controllo, t medio chiusura diminuisce(x0,85)</i>					
	fattore moltiplicativo t chiusura:			0,85	
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t chiusura può diminuire</i>					
	telefoni	x0,95			
	pulsanti allarme	x0,98			
<i>se ho piu sistemi presenti contemporaneamente, considero solo quello associato al fattore moltiplicativo più basso</i>					
	fattore moltiplicativo t chiusura:			0,95	
in base a sistema di chiusura previsto:					
	semafori all'ingresso	x0,85			
	barriere all'ingresso	x0,8			
	pannelli mex variabili	x0,9			
	pannelli mex variabili+semafori	x0,82			
	pannelli mex variabili+barriere	x0,85			
	fattore moltiplicativo t chiusura:			0,8	
tchiusura = 116,28 secondi					

Figura 72: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, tempo di chiusura della galleria

– tempo di premovimento pari a 110 secondi

valore di riferimento	3 minuti 180 secondi	
sistemi di comunicazione presenti	altoparlanti	no
	trasmissioni radio	si
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t premovimento può diminuire</i>		
coeff. moltiplicativo t:		
altoparlanti	x 0,9	
trasmissioni radio	x 0,85	
entrambi	x0,82	
fattore moltiplicativo t premov.:	0,85	
<i>se sono presenti pannelli a mex variabile-barriere-semafori sistemi di rilevamento in galleria, t premovimento può diminuire</i>		
coeff. moltiplicativo t:		
semafori	x0,85	no
pannelli a mex variabile	x0,9	si
barriere	x0,8	no
semafori+ pannelli a mex variabile	x0,8	no
barriere+ pannelli a mex variabile	x0,8	no
sist.rilevamento	x0,9	si
fattore moltiplicativo t premov.:	0,72	
tempo di pre-movimento	110,16 s	

Figura 73: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, tempo di premovimento

Dal modello di formazione code, risultano coinvolti in questa situazione 18 veicoli: in base ai dati di traffico a disposizione quindi si prevede che nel tempo di chiusura previsto entri nella galleria un numero di veicoli pari a 18 (essendo il valore medio ne entreranno 9 per direzione). A questo numero di veicoli corrispondono 28 utenti, essendo definito, in base allo spettro di traffico previsto, un coefficiente di occupazione medio per ogni veicolo pari a 1,64.

veicoli entranti in galleria in te: (con $F_p = 2,60$)	in de	9	confronto con:	n. max veicoli in de	(du=dist. Evento-uscita) veic=	54 veic
	in du	9		n. max veicoli in du	veic=	54 veic
--> veicoli presenti:	de	9 veicoli	di cui:	5,90 leggeri	2,57 pesanti	0,09 bus
(solo x bidirezionale)	du	9 veicoli	di cui:	5,90 leggeri	2,57 pesanti	0,09 bus
POPOLAZIONE PRESENTE IN GALLERIA:	28 persone					
con coeff. Occupazione veicoli						
leggeri	1,50	autobus	30,00			
pesanti	1,00					

Figura 74: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report modello di formazione code

Definite le caratteristiche generiche e le dotazioni impiantistiche del traforo, il numero di decessi associati ad un evento incidentale valutato dal modello sarà variabile in funzione delle caratteristiche del traffico e dell'evento incidentale stesso.

Le conseguenze associate ad un evento saranno variabili a seconda della sua posizione all'interno del tunnel, in particolare in relazione alla posizione delle entrate della galleria e delle vie di fuga; il tempo di esodo varia in base alla distanza dell'utente dall'uscita di sicurezza, definito dalla posizione del veicolo (e quindi dell'evento iniziatore) e dall'interdistanza tra i veicoli incolonnati (oltre ovviamente al tipo di evento analizzato).

Di seguito si analizzano una serie di esempi, in cui si variano le caratteristiche dell'evento incidentale (quindi il tipo di veicoli coinvolti) e l'interdistanza tra i veicoli incolonnati.

Si precisa che come ipotesi del modello, la presenza di un impianto ne implica il funzionamento.

4.1.4 Ipotesi di simulazione

Si analizza un evento incidentale all'interno del traforo verificatosi in corrispondenza di un'uscita di sicurezza: in base alle caratteristiche del modello, questa situazione, puramente indicativa, risulta particolarmente significativa, in quanto si ha la distanza massima possibile tra l'evento e la più vicina via di fuga.

posizione incendio	distanza da entrata galleria	5800 m
	<i>(se galleria bidirezionale indicare distanza minore)</i>	
	distanza da uscita galleria (= lunghezza - dist. entrata)	5800 m
	distanza uscite di emergenza più vicine a monte e a valle dell'evento*	305 m
	<i>(in caso di galleria monodirezionale considerare solo le uscite posizionate nella direzione dei veicoli in coda)</i>	305 m

Figura 75: Caso di studio del traforo Del Monte Bianco: rappresentazione schematica della situazione analizzata e indicazione della posizione all'interno del questionario

Come prima situazione si prevede che l'interdistanza tra i veicoli incolonnati sia costante e pari a **100 m**, valore previsto dal regolamento di circolazione del tunnel: si ipotizza quindi che tutti gli utenti si attengano al regolamento e relative disposizioni¹⁰⁰.

Vengono proposti i risultati derivanti dai 3 diversi casi di potenza dell'incendio previsti dal modello: si riporta quindi il caso in cui l'incendio scaturisca da un'autovettura, da un veicolo

¹⁰⁰ Questa situazione si può ritenere alquanto inverosimile in quanto difficilmente, soprattutto in caso di pericolo e conseguente agitazione degli utenti coinvolti, la distanza tra i veicoli tenderà a diminuire

pesante o da un veicolo trasportante merce classificata come pericolosa.

– Autovettura:

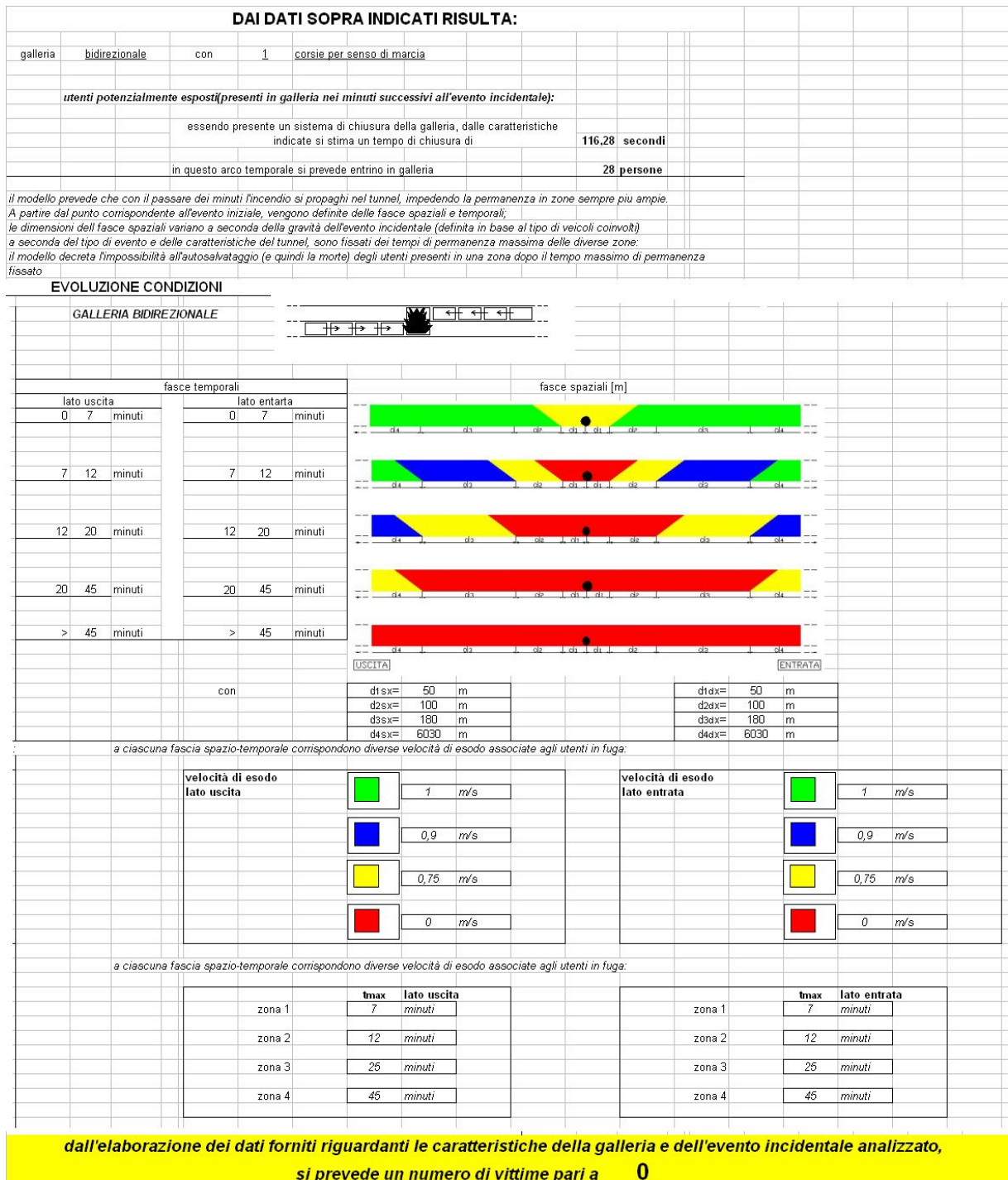


Figura 76: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report risultati del caso di studio analizzato in caso di incendio di autovettura

Come visibile nell'immagine, il modello in caso di incendio dell'autovettura, nella particolare situazione analizzata (cioè in base alla posizione dell'evento iniziatore e ai valori di interdistanza tra i veicoli previsti) prevede un numero di vittime pari a **0**.

– Veicolo pesante:

con il coinvolgimento nell'evento incidentale che porta all'incendio di veicoli pesanti, il modello prevede un peggioramento delle condizioni di esodo a causa della maggior potenza di incendio previsto: in questo caso viene definito un numero di decessi pari a 2 utenti.

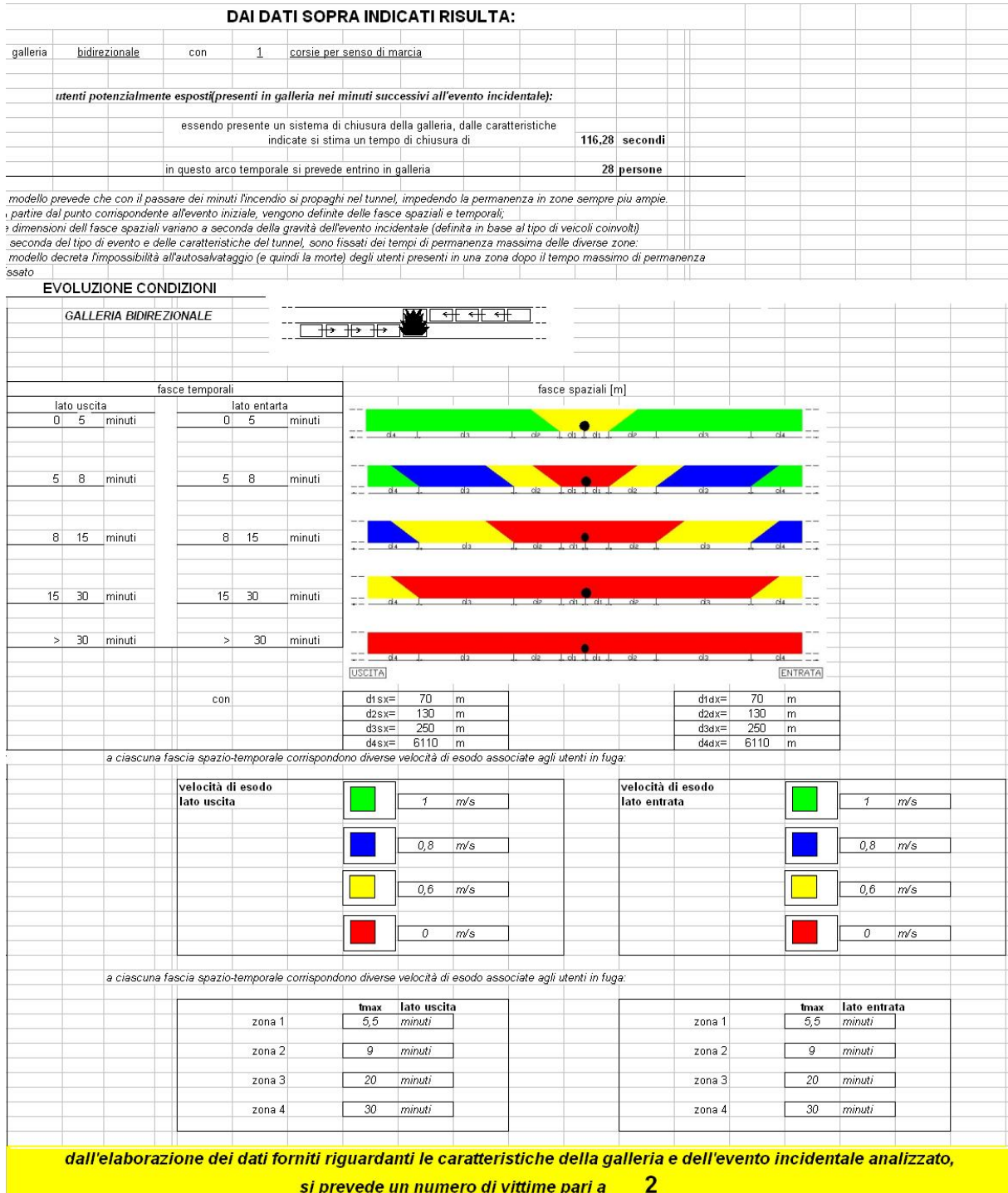


Figura 77: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report risultati del caso di studio analizzato in caso di incendio di veicolo pesante

– Veicolo classificato in ADR:

con il coinvolgimento di materie pericolose, ed il conseguente aumento di potenza dell'incendio scaturente, il modello definisce un numero di vittime pari a 5.

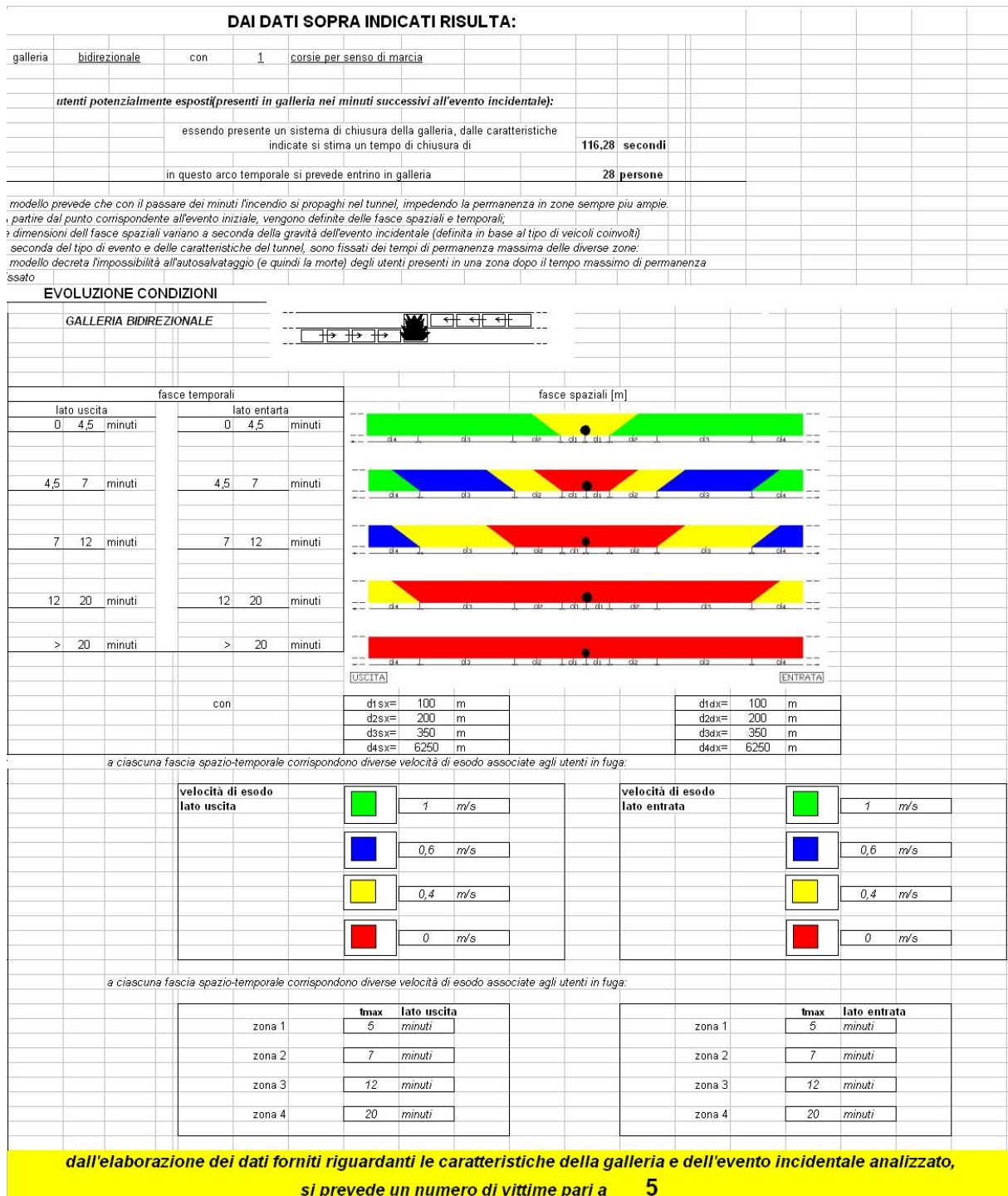


Figura 78: Caso di studio Traforo del Monte Bianco, report risultati del caso di studio analizzato in caso di incendio di veicolo trasportante merci pericolose

La stessa situazione viene analizzata variando il valore di interdistanza tra i veicoli: variando la posizione di questi all'interno del tunnel, varieranno le distanze che gli utenti dovranno percorrere per raggiungere le uscite di sicurezza, e quindi i tempi di esodo (che determinano la salvabilità).

Si prevede in questo caso un di stanziamento tra i veicoli incolonnati variabile nelle zone in cui è suddiviso il tunnel, ipotizzando che con il passare dei secondi gli utenti entranti in galleria si rendano conto sempre più rapidamente della situazione (grazie alle informazioni comunicate in particolare dalla sala di controllo attraverso semafori e pannelli a messaggio variabile).

Si ipotizzano dei valori di interdistanza pari a:

0,5 m (zona 1)

1 m (zona 2)

2 m (zona 3)

5 m (zona 4)

questi valori, particolarmente ridotti (soprattutto a ridosso dell'evento, cioè per i veicoli effettivamente coinvolti nello stesso) sono stati scelti per verificare i risultati in 2 casi quasi estremi, cioè con interdistanze molto elevate (100 m, caso analizzato precedentemente) e particolarmente ridotte.

Anche qui si propongono i risultati per le 3 categorie di veicoli coinvolti nell'evento iniziatore previste.

– Autovettura

Anche in questo caso, grazie alle ottime dotazioni di sicurezza del traforo, per la limitata potenza di incendio associata a questo tipo di veicoli il modello prevede un numero di vittime pari a **0**.

– Veicolo pesante

In caso di veicoli pesanti in fiamme nel tunnel, con il di stanziamento dei veicoli incolonnati previsto il modello valuta un numero di vittime pari a **16**, circa la metà degli utenti coinvolti.

- Veicolo classificato in ADR

Essendo il caso peggiore previsto, si ha un sensibile aumento del numero di vittime, che viene valutato pari a **28**: nessuno degli utenti presenti in galleria riesce a raggiungere un'uscita di sicurezza in tempo utile.

4.1.5 Analisi risultati

Come già sottolineato, il Traforo del Monte Bianco rappresenta una delle gallerie più sicure esistenti, in relazione in particolare agli impianti ed alle tecnologie di cui è dotato.

Alcune criticità di sicurezza sono comunque individuabili: in particolare il traforo, a causa anche della sua configurazione morfologica, non prevede l'esistenza di gallerie trasversali, utilizzabili per la fuga degli utenti. Essendo un traforo di valico, non è inoltre prevista una viabilità alternativa di emergenza su cui convogliare eventualmente il traffico, se non percorsi alternativi molto distanti dal tunnel.

Per quanto riguarda invece le caratteristiche analizzate dal modello, si evidenziano principalmente 2 criticità: la prima è individuata dalla pavimentazione, di tipo drenante; la seconda è data dalla resistenza al fuoco delle strutture e degli impianti: non essendo possibile verificare tale parametro per tutte le componenti del sistema, si è scelto a favore di sicurezza di attribuirvi un valore inferiore a REI 120¹⁰¹.

Questo caso di studio inoltre evidenzia come il modello proposto non sia in grado di rappresentare tutti i sistemi di galleria possibili¹⁰²: il particolare il modello non prevede la presenza di un presidio di soccorso in loco all'interno del tunnel.

Tutti i restanti parametri definiti sono assimilabili all'ottimo; si sottolinea che la presenza di altre dotazioni impiantistiche oltre a quelle definite nel questionario non è considerata: non si prevede di premiare la presenza di dispositivi supplementari o la particolare efficienza di quelli analizzati.

Analizzando i risultati forniti dal modello in termini di numero di vittime, cioè utenti che non sono in grado di raggiungere in tempo utile la via di fuga, si evince che rispettando le

¹⁰¹ Per approfondimenti sull'argomento si rimanda al paragrafo 3.1

¹⁰² Come detto nei capitoli precedenti, il modello proposto ha lo scopo di essere il più semplice ed intuitivo possibile: a tale fine è risultato necessario selezionare un numero limitato di parametri per la definizione del tunnel

disposizioni previste dal regolamento di circolazione (cioè mantenendo una distanza tra i veicoli fermi incolonnati pari a 100 m) le conseguenze sono relativamente ridotte.

Le ottime dotazioni di sicurezza previste nel traforo permettono di avere un numero di vittime limitato, comunque crescente all'aumentare della gravità dell'evento. Si può dire che tutti gli utenti riescono a mettersi in salvo in tempo utile, ad eccezione di quelli più prossimi all'incendio, e quindi direttamente coinvolti nell'evento.

Con il diminuire del distanziamento tra i veicoli incolonnati, si ha un aumento del numero di mortalità: questo dipende ovviamente dalla maggior vicinanza dei veicoli all'evento, e quindi delle peggiori condizioni di esodo derivanti.

Con i valori di interdistanza previsti nel secondo caso (0,5 m, 1 m, 2 m, 5 m) si verifica ancora che in caso di autovetture in fiamme tutti gli utenti siano in grado di salvarsi.

Passando a veicoli pesanti e trasportanti merci pericolose, si ha un sensibile aumento del numero di vittime: nel caso peggiore il modello decreta il decesso di tutti gli utenti coinvolti nell'evento.

Si sottolinea che questo secondo caso è puramente indicativo, in quanto prevede che i veicoli incolonnati siano praticamente attaccati tra di loro; essendo presenti 9 veicoli per direzione risulta che quasi tutti si posizionino in zona 1, e quindi con un distanziamento pari a 0,5 m: è presumibile pensare che con il passare dei secondi dall'evento incidentale e con l'entrata in azione dei dispositivi di sicurezza, i veicoli in arrivo siano in grado di rendersi conto dell'evento e di fermarsi prontamente nel tunnel (grazie in particolare alle indicazioni di semafori e pannelli a messaggio variabile, nonché alla presenza di barriere all'interno del traforo che impongono la fermata dei veicoli).

Anche in caso di inserimento di dati poco rappresentativi e addirittura illogici, il modello fornisce dei risultati comunque accettabili.

4.2 Galleria Morgex Nord

La galleria Morgex Nord è situata in Val D'Aosta, nei pressi di Morgex lungo l'autostrada A5; la gestione del tunnel è affidata a RAV s.p.a., ente gestore della tratta autostradale in cui la galleria è situata: le sue caratteristiche rispondono ai principi generali stabiliti dalla stessa società, che ha come obiettivi principali la 'qualità' e la 'sicurezza'.

Il sistema galleria Morgex Nord è di tipo unidirezionale, che quindi contribuisce a validare il modello per questa tipologia di strutture.



Figura 79: Imbocco della galleria Morgex Nord e rappresentazione schematica di parte del tunnel

4.2.1 Caratteristiche strutturali ed impiantistiche

In tabella è riportata la scheda tecnica del tunnel, in cui sono individuabili le principali caratteristiche strutturali.

lunghezza	2290 m
pendenza media	3,2%
quota media	979 m s.l.m.
sezione libera	65 m ²
carreggiata	8,5 m
Corsie	2x3,75 m
TGM 2012	1530 veic/giorno/corsia
veicoli pesanti	23%
by-pass	2 carrabili
Ventilatori	9, potenza 30 kW, portata 28 m ³ /s

Tabella 17: Scheda tecnica galleria Morgex Nord

Per quanto riguarda le dotazioni impiantistiche, la carta dei servizi RAV pone particolare attenzione all'informazione, giudicata fondamentale per garantire la sicurezza: la galleria è

dotata di pannelli a messaggio variabile¹⁰³ e di una sala radio, in cui gli operatori rilevano le informazioni attraverso le 240 telecamere disposte su tutta la tratta di competenza RAV¹⁰⁴.

Particolare attenzione è posta sulle pavimentazioni, di cui viene periodicamente verificata l'usura: obiettivo è *“mantenere la pavimentazione ad un buon livello di efficienza, per garantire un'adeguata aderenza al veicolo e ridurre l'insorgere di situazioni di rischio”*[27].

Sono presenti 2 uscite di sicurezza: si sottolinea la mancanza di regolarità tra questi elementi, che compromette l'efficacia delle stesse.

Nonostante il tratto autostradale in cui è collocata il tunnel sia caratterizzata da sistemi idrici specifici¹⁰⁵, la galleria Morgex Nord non presenta né bocchette di attacco per VVF né fonti di approvvigionamento alternative.

Per quanto riguarda la resistenza al fuoco di strutture ed impianti, anche in questo caso, non avendo a disposizione dati certi, si è scelto di adottare un approccio cautelativo, ponendo tale caratteristica inferiore al valore limite di riferimento previsto (REI 120).

Altre caratteristiche impiantistiche sono definite nel paragrafo seguente tramite il 'questionario'.

4.2.2 Implementazione del foglio di calcolo

QUESTIONARIO GALLERIA

INFORMAZIONI GENERICHE

nome	MORGEX NORD	caratteristiche tecniche generali																			
località	MORGEX	la galleria è	<input checked="" type="radio"/> monodirezionale <input type="radio"/> bidirezionale																		
tratto stradale di appartenenza	autostrada A5	numero corsie	2																		
gestore	RAV s.p.a.	lunghezza galleria	2290 m																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:</th> </tr> <tr> <th colspan="3">coefficienti di occupazione veicoli:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>leggeri</td> <td></td> <td>1,5</td> </tr> <tr> <td>pesanti</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>autobus</td> <td></td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>coefficiente ora di punta</td> <td></td> <td>2,6</td> </tr> </tbody> </table>		coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:			coefficienti di occupazione veicoli:			leggeri		1,5	pesanti		1	autobus		30	coefficiente ora di punta		2,6	traffico giornaliero medio (TGM)	3060 veicoli/giorno
coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:																					
coefficienti di occupazione veicoli:																					
leggeri		1,5																			
pesanti		1																			
autobus		30																			
coefficiente ora di punta		2,6																			
		velocità (v media o vmax se nn disponibile)																			
		veicoli leggeri	100 km/h																		
		pesanti-autobus	100 km/h																		
		spettro di traffico																			
		% veicoli pesanti	22 %																		
		% autobus	1 %																		
		trasporto ADR	<input checked="" type="radio"/> consentito <input type="radio"/> non consentito																		

¹⁰³ Che contengono informazioni di natura tecnica come incidenti, cantieri, code e rallentamenti, tempi di percorrenza ed eventi meteo o, in condizioni di traffico regolare, consigli di guida e informazioni di sicurezza

¹⁰⁴ Che copre un tratto di 32,4 km, da Aosta al Traforo del Monte Bianco

¹⁰⁵ Sfruttamento delle abbondanti venute d'acqua intercettate durante lo scavo del tratto stradale

DEFINIZIONE CARATTERISTICHE GALLERIA

USCITE DI SICUREZZA		numero uscite di sicurezza	<input type="text" value="2"/>
		interdistanza	<input type="radio"/> regolare <input checked="" type="radio"/> non regolare
		inserire valore interdistanza massima tra 2 uscite	<input type="text" value="902"/> m
SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANIZZATA		sistema di ventilazione presente	<input checked="" type="radio"/> longitudinale <input type="radio"/> semitrasversale <input type="radio"/> trasversale <input type="radio"/> non presente
		impianto di aspirazione fumi	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
		-	<input type="text"/>
SEGNALETICA		esterna: sistema di chiusura galleria:	selezionare i dispositivi presenti
		<input checked="" type="radio"/> previsto <input type="radio"/> non previsto	<input checked="" type="checkbox"/> semafori <input type="checkbox"/> pannelli a messaggio variabile <input checked="" type="checkbox"/> barriere all'imbocco
		interna:	segnaletica di emergenza
			<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
			selezionare i dispositivi presenti
			<input type="checkbox"/> semafori <input checked="" type="checkbox"/> pannelli a messaggio variabile <input type="checkbox"/> barriere
ILLUMINAZIONE		illuminazione ordinaria	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
		illuminazione di emergenza	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
		illuminazione di sicurezza	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
RILEVAZIONE E CONTROLLO		selezionare i dispositivi presenti	<input checked="" type="checkbox"/> sistema di video-sorveglianza <input checked="" type="checkbox"/> rilevatori di fumi / incidenti
		centro di controllo 24h	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
STAZIONI DI COMUNICAZIONE EMERGENZA		selezionare i sistemi di comunicazione di emergenza previsti	<input checked="" type="checkbox"/> telefoni per le emergenze <input checked="" type="checkbox"/> trasmissioni radio <input type="checkbox"/> altoparlanti <input checked="" type="checkbox"/> pulsanti d'allarme
EROGAZIONE IDRICA		impianto idrico antincendio	<input type="radio"/> presente <input checked="" type="radio"/> non presente
		inserire valori interdistanza idranti (se presenti) (se non regolare inserir valore maggiore)	<input type="text"/> m
SISTEMI DI MITIGAZIONE		sistemi di contenimento e spegnimento	<input type="radio"/> presenti <input checked="" type="radio"/> non presenti
RESISTENZA AL FUOCO		REI strutture	<input checked="" type="radio"/> minore di REI 120 <input type="radio"/> maggiore di REI 120
		REI impianti	<input checked="" type="radio"/> minore di REI 120 <input type="radio"/> maggiore di REI 120

PAVIMENTAZIONI	selezionare il tipo di pavimentazione	<input type="radio"/> drenante <input checked="" type="radio"/> non drenante
DRENAGGI	sistema di drenaggio della piattaforma stradale	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
	se previsto:	<input type="checkbox"/> è previsto dreno liquidi infiammabili
ACCESSO MEZZI DI CONTENIMENTO	selezionare accessi presenti (collegamento fornici solo per monodirezionale)	<input checked="" type="checkbox"/> collegamenti tra fornici (solo per monodirezionali) <input type="checkbox"/> gallerie carrabili <input type="checkbox"/> stazioni in loco
	inserire valore interdistanza accessi (se presenti) (se interdistanza non regolare inserire valore maggiore)	763 m

Figura 80: Questionario, caso della galleria Morgex Nord

Le caratteristiche così definite, permettono al modello di definire:

- velocità di esodo

in base alle dotazioni impiantistiche presenti, la galleria si colloca in questo caso in fascia 1, associata ai valori di velocità di fuga più elevati.

DEFINISCO Vesodo						<u>punteggio</u>
	illuminazione	ordinaria	si			1,5
		di emergenza	si			1,5
		di sicurezza	si			2
	segnaletica d'emergenza		si			1,5
	ventilazione		longitudinale			1,5
	impianto aspiraz. Fumi		si			1
	visibilità		standard			0

somma punteggio=	9
risulta fascia	1

A questo punteggio corrispondono i seguenti valori di velocità:

1. MERCI PERICOLOSE

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-4,5 min	0,4	1	1	1
4,5-7 min	0	0,4	0,6	1
7-12 min	0	0	0,4	0,6
12-20 min	0	0	0	0,4
>20 min	0	0	0	0

2. VEICOLI PESANTI

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-5 min	0,6	1	1	1
5-8 min	0	0,6	0,8	1
8-15 min	0	0	0,6	0,8
15-30 min	0	0	0	0,6
>30 min	0	0	0	0

3. AUTOVETTURE

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-7 min	0,75	1	1	1
7-12 min	0	0,75	0,9	1
12-20 min	0	0	0,75	0,9
20-45 min	0	0	0	0,75
>45 min	0	0	0	0

Figura 81 a-b: Caso di studio Galleria Morgex Nord, velocità di esodo

Per quanto riguarda invece il tempo di massima permanenza nelle diverse zone, il modello attribuisce alla galleria un punteggio pari a 2 per le dotazioni impiantistiche di cui è dotata: i periodi associativi nelle diverse situazioni sono riportati in figura 82.

- tempo di chiusura della galleria corrispondente a 116 secondi

il periodo corrisponde a quello definito nel precedente esempio del Traforo del Monte Bianco, in quanto in entrambi i tunnel sono presenti tutti gli impianti che vanno a definire questo periodo.

sistema di chiusura galleria		PREVISTO	
tempo di chiusura - valore iniziale =			3 minuti 180 secondi
centro di controllo		SI	
sistemi di rilevazione		video-sorveglianza rilevatori fumo-incidente	
<i>se esistono sistemi di rilevazione fumo-incendi, t medio diminuisce (x0,9)</i>			
<i>se esistono sistemi di rilevazione e sono associati a un centro di controllo, t medio chiusura diminuisce(x0,85)</i>			
fattore moltiplicativo t chiusura:			0,85
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t chiusura può diminuire</i>			
telefoni	x0,95		<i>se ho più sistemi presenti contemporaneamente, considero solo quello associato al fattore moltiplicativo più basso</i>
pulsanti allarme	x0,98		
fattore moltiplicativo t chiusura:			0,95
in base a sistema di chiusura previsto:			
semafori all'ingresso	x0,85		
barriere all'ingresso	x0,8		
pannelli mex variabili	x0,9		
pannelli mex variabili+semafori	x0,82		
pannelli mex variabili+barriere	x0,85		
fattore moltiplicativo t chiusura:			0,8
tchiusura =		116,28 secondi	

Figura 83: Caso di studio Galleria Morgex Nord, tempo di chiusura della galleria

– tempo di premovimento pari a 124 secondi

tempo di pre-movimento			
valore di riferimento	3 minuti 180 secondi		
sistemi di comunicazione presenti	altoparlanti	no	
	trasmissioni radio	si	
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t premovimento può diminuire</i>			
coeff. moltiplicativo t:			
altoparlanti	x 0,9		
trasmissioni radio	x 0,85		
entrambi	x 0,82		
fattore moltiplicativo t premov.:		0,85	
<i>se sono presenti pannelli a mex variabile-barriere-semafori sistemi di rilevamento in galleria, t premovimento può diminuire</i>			
coeff. moltiplicativo t:			
semafori	x 0,85	no	
pannelli a mex variabile	x 0,9	si	
barriere	x 0,8	no	
semafori+ pannelli a mex variabile	x 0,8	no	
barriere+ pannelli a mex variabile	x 0,8	no	
sist. rilevamento	x 0,9	si	
fattore moltiplicativo t premov.:		0,81	
tempo di pre-movimento		123,93 s	

Figura 84: Caso di studio Galleria Morgex Nord, tempo di premovimento

Questo periodo risulta invece maggiore di quello definito nel caso del TMB.

Il numero di veicoli entranti nel tunnel nel periodo di chiusura sopra citato, è definito pari a 11: a questi corrispondono un numero di utenti coinvolti nell'evento pari a 18, essendo il coefficiente di occupazione medio dei veicoli definito pari a 1,68 (in base allo spettro di traffico del tunnel).

veicoli entranti in galleria in tc:		in de	11	confronto con:	n. max veicoli in de	veic=	155 veic
(con Fp= 2,60)		in du	11		n. max veicoli in du	veic=	239 veic
--> veicoli presenti		de	11 veicoli	di cui:	8,24 leggeri	2,36 pesanti	0,11 bus
(solo x bidirezionale)		du	0 veicoli	di cui:	0,00 leggeri	0,00 pesanti	0,00 bus
POPOLAZIONE PRESENTE IN GALLERIA:		18 persone					
con coeff. Occupazione veicoli							
leggeri 1,50		autobus 30,00					
pesanti 1,00							

Figura 85: Caso di studio Galleria Morgex Nord, report modello di formazione code

Come nell'esempio precedente, i possibili risultati variano in funzione della posizione dell'evento incidentale e delle caratteristiche dell'incendio¹⁰⁶.

Si analizzano nel seguito alcune situazioni.

4.2.3 Ipotesi di simulazione

Si analizza la particolare situazione in cui l'incendio si sviluppi in corrispondenza dell'uscita del tunnel, impedendo ai veicoli incolonnati di abbandonare la galleria: questa può essere considerata la situazione peggiore che si possa verificare; essendo le 2 uscite ubicate rispettivamente a 902 m e 1602 m, si è scelto di posizionare l'incendio in corrispondenza della prima uscita (posizionata a 902 m dalla via di fuga più vicina, distanza maggiore presente).

posizione incendio		
distanza da entrata galleria <i>(se galleria bidirezionale indicare distanza minore)</i>	<input type="text" value="902"/>	m
distanza da uscita galleria (= lunghezza - dist. entrata)	<input type="text" value="1388"/>	m
distanza uscite di emergenza più vicine a monte e a valle dell'evento* <i>(in caso di galleria monodirezionale considerare solo le uscite posizionate nella direzione dei veicoli in coda)</i>	<input type="text" value="902"/>	m

Figura 86: Caso di studio Galleria Morgex Nord: posizionamento dell'evento analizzato

Si definiscono 2 diverse situazioni, in cui si ipotizzano dei valori di interdistanza tra i veicoli differenti.

Nel primo caso si imposta un valore di distanziamento dei veicoli incolonnati fisso, pari a **25 m**. In questa situazione, il modello definisce un numero di decessi derivanti dall'incendio pari a:

- autovetture: **3** decessi
- veicoli pesanti: **8** decessi
- veicoli trasportanti merci pericolose: **15** decessi

¹⁰⁶ In particolare la potenza, definita in funzione del tipo di veicolo in fiamme, e la quantità di fumi sviluppata, associata principalmente alle merci trasportate dal veicolo

Portando il distanziamento tra i veicoli a **5 m**, si ottengono dei valori sensibilmente maggiori, pari a:

- autovetture: **8** decessi
- veicoli pesanti: **12** decessi
- veicoli trasportanti merci pericolose: **18** decessi

4.2.4 Analisi risultati

Analizzando le caratteristiche impiantistiche e strutturali del tunnel, si evidenziano alcune criticità.

In particolare il ridotto numero di uscite di sicurezza, che rende l'interdistanza tra questi elementi superiore a quella prevista come massima dalla normativa vigente¹⁰⁷; inoltre tale interdistanza non è regolare: dall'imbocco nord si incontrano le due uscite rispettivamente a 902 m e 1602 m.

Un'altra carenza è rilevabile nella segnaletica, in quanto non sono presenti né barriere né semafori all'interno della galleria.

Analizzando i risultati del modello in termini di numero di vittime nell'esempio proposto, si evince in particolare che in entrambe le situazioni in caso di evento coinvolgente merci pericolose la salvabilità degli utenti è molto limitata: questo evidenzia delle lacune nella sicurezza del tunnel, legate soprattutto alla presenza di due sole vie di fuga.

Si sottolinea anche che la posizione scelta per l'ubicazione dell'incendio risulta la peggiore prevedibile: variando la posizione dell'evento il numero di vittime associato diminuirà sensibilmente.

¹⁰⁷ Il Dlgs 264/2006 indica come valore massimo 500 m, mentre nella galleria Morgex Nord l'interdistanza media risulta di 750 m

4.3 Galleria Colle Capretto

La galleria Colle Capretto è ubicata nei pressi di San Gemini (TR), sulla strada E45 Perugia-Terni.

Si tratta di un tunnel unidirezionale entrato in funzione nel 1974, ed attualmente gestito da ANAS.

Nel 2010 la galleria è stata oggetto di un intervento di ammodernamento che ha portato sensibili miglioramenti in termini di sicurezza, andando ad inserire o integrare i sistemi previsti dalla normativa vigente.

La galleria è stata anche oggetto nel 2012 di un progetto europeo, EuroTAP, avente la finalità di definire una valutazione del tunnel in termini di sicurezza: tale progetto ha riguardato 10 gallerie europee (di cui 3 italiane), individuandone le principali dotazioni impiantistiche e strutturali in termini di sicurezza e definendo una valutazione per ognuna di esse.

Nella galleria in esame, i risultati hanno definito un indice di sicurezza 'buono', rispetto ad una valutazione 'scarso' ottenuta nel 2007: questo mostra la bontà degli interventi di miglioramento eseguiti nel 2010 e precedentemente citati.

4.3.1 Caratteristiche strutturali ed impiantistiche

Si riportano in tabella le principali caratteristiche tecniche del tunnel.

lunghezza	1180 m
altitudine dell'ingresso	319 / 338 m s.l.m.
numero canne	2, traffico unidirezionale
limite di velocità	90 km/h
Volume giornaliero di traffico	7500 veicoli
Percentuale di traffico pesante	30%

Tabella 18: Scheda tecnica galleria Colle Capretto

La galleria è costituita da due canne con collegamenti trasversali, con corsie sufficientemente ampie e buona illuminazione, anche di emergenza [13]. Il tunnel è inoltre monitorato giorno e notte da un centro di controllo tramite un sistema di video-sorveglianza della galleria,

presidiato da personale qualificato.

Tra le altre dotazioni impiantistiche, si evidenzia la presenza di un sistema automatico di allarme antincendio, un sistema di rilevamento automatico di interruzione del traffico, telefoni di emergenza ed estintori, posti in apposite zone di emergenza; vi sono inoltre semafori e pannelli a messaggio variabile davanti agli ingressi, nonché un segnale radio lungo tutto il tunnel con cui l'operatore può trasmettere messaggi in qualsiasi momento.

Per quanto riguarda l'impianto idrico antincendio, il dossier EuroTAP 2012 afferma che "l'efficacia estinzione dell'incendio è supportata dall'approvvigionamento idrico antincendio", evidenziandone la presenza.

Si deduce poi la presenza di un impianto di ventilazione meccanizzato di tipo longitudinale, mentre dai dati disponibili anche in questo caso non si può dedurre nulla per ciò che riguarda la resistenza al fuoco degli impianti: si è scelto di definire un indice REI inferiore a 120, rispettando il principio che laddove vi è incertezza, si sceglie un approccio cautelativo.

4.3.2 Implementazione del foglio di calcolo

Nel seguito viene illustrato il questionario alla base del modello di calcolo; si evidenzia che, essendo la galleria costituita da 2 fornici, il modello viene applicato su una singola canna.

QUESTIONARIO GALLERIA

INFORMAZIONI GENERICHE

nome	COLLE CAPRETTO	<i>caratteristiche tecniche generali</i>	
località	SAN GEMINI (TR)	la galleria è	<input checked="" type="radio"/> monodirezionale <input type="radio"/> bidirezionale
tratto stradale di appartenenza	autostrada E45	numero corsie	2
gestore	ANAS	lunghezza galleria	1180 m
<i>coefficienti utilizzati per definire gli utenti presenti:</i>		traffico giornaliero medio (TGM)	3250 veicoli/giorno
coefficienti di occupazione veicoli:		velocità (<i>v media o vmax se nn disponibile</i>)	
leggeri	1,5	veicoli leggeri	90 km/h
pesanti	1	pesanti-autobus	90 Km/h
autobus	30	spettro di traffico	
coefficiente ora di punta	2,6	% veicoli pesanti	29 %
		% autobus	1 %
		trasporto ADR	<input checked="" type="radio"/> consentito <input type="radio"/> non consentito

DEFINIZIONE CARATTERISTICHE GALLERIA

USCITE DI SICUREZZA

numero uscite di sicurezza	<input type="text" value="1"/>
interdistanza	<input checked="" type="radio"/> regolare <input type="text"/> <input type="radio"/> non regolare <input type="text"/>
inserire valore interdistanza tra uscite	<input type="text" value="590"/> m

SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANIZZATA

sistema di ventilazione presente	<input checked="" type="radio"/> longitudinale <input type="text"/> <input type="radio"/> semitrasversale <input type="text"/> <input type="radio"/> trasversale <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>
impianto di aspirazione fumi	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>
-	<input type="text"/>

SEGNALETICA

<u>esterna:</u> sistema di chiusura galleria:	selezionare i dispositivi presenti	<input checked="" type="checkbox"/> semafori <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> pannelli a messaggio variabile <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> barriere all'imbocco <input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> previsto <input type="text"/> <input type="radio"/> non previsto <input type="text"/>		
<u>interna:</u>	segnaletica di emergenza	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>
	selezionare i dispositivi presenti	<input checked="" type="checkbox"/> semafori <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> pannelli a messaggio variabile <input type="text"/> <input type="checkbox"/> barriere <input type="text"/>

ILLUMINAZIONE

illuminazione ordinaria	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>
illuminazione di emergenza	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>
illuminazione di sicurezza	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>

RILEVAZIONE E CONTROLLO

selezionare i dispositivi presenti	<input checked="" type="checkbox"/> sistema di video-sorveglianza <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> rilevatori di fumi / incidenti <input type="text"/>
centro di controllo 24h	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>

STAZIONI DI COMUNICAZIONE EMERGENZA

selezionare i sistemi di comunicazione di emergenze previsti	<input checked="" type="checkbox"/> telefoni per le emergenze <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> trasmissioni radio <input type="text"/> <input type="checkbox"/> altoparlanti <input type="text"/> <input checked="" type="checkbox"/> pulsanti d'allarme <input type="text"/>
--------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

EROGAZIONE IDRICA

impianto idrico antincendio	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="text"/> <input type="radio"/> non presente <input type="text"/>
inserire valori interdistanza idranti (se presenti) (se non regolare inserirer valore maggiore)	<input type="text"/> m

SISTEMI DI MITIGAZIONE

sistemi di contenimento e spegnimento	<input checked="" type="radio"/> presenti <input type="text"/> <input type="radio"/> non presenti <input type="text"/>
---------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

RESISTENZA AL FUOCO	REI strutture	<input checked="" type="radio"/> minore di REI 120 <input type="radio"/> maggiore di REI 120
	REI impianti	<input type="radio"/> minore di REI 120 <input checked="" type="radio"/> maggiore di REI 120
PAVIMENTAZIONI	selezionare il tipo di pavimentazione	<input type="radio"/> drenante <input checked="" type="radio"/> non drenante
DRENAGGI	sistema di drenaggio della piattaforma stradale	<input checked="" type="radio"/> presente <input type="radio"/> non presente
	se previsto:	<input type="checkbox"/> è previsto dreno liquidi infiammabili
ACCESSO MEZZI DI CONTENIMENTO	selezionare accessi presenti (collegamento fornici solo per monodirezionale)	<input type="checkbox"/> collegamenti tra fornici (solo per monodirezionali) <input type="checkbox"/> gallerie carrabili <input type="checkbox"/> stazioni in loco
	inserire valore interdistanza accessi(se presenti) (se interdistanza non regolare inserire valore maggiore)	<input type="text"/> m

Figura 87: Caso di studio Galleria Colle Capretto, questionario

Dall'analisi delle caratteristiche strutturali ed impiantistiche così definite, il modello definiscono:

- valori di velocità di esodo corrispondenti ad un punteggio rientrante in fascia 1 delle 3 possibili (in condizioni di fumo particolarmente denso, tale punteggio collocherebbe il tunnel in fascia 2)

DEFINISCO Vesodo						<u>punteggio</u>
		illuminazione	ordinaria	si		1,5
			di emergenza	si		1,5
			di sicurezza	si		2
		segnaletica d'emergenza		si		1,5
		ventilazione		longitudinale		1,5
		impianto aspiraz. Fumi		si		1
		visibilità		standard		0

somma punteggio=	
9	
risulta fascia	1

1. MERCI PERICOLOSE

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-4,5 min	0,4	1	1	1
4,5-7 min	0	0,4	0,6	1
7-12 min	0	0	0,4	0,6
12-20 min	0	0	0	0,4
>20 min	0	0	0	0

2. VEICOLI PESANTI

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-5 min	0,6	1	1	1
5-8 min	0	0,6	0,8	1
8-15 min	0	0	0,6	0,8
15-30 min	0	0	0	0,6
>30 min	0	0	0	0

3. AUTOVETTURE

	valori considerati-fascia 1			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
0-7 min	0,75	1	1	1
7-12 min	0	0,75	0,9	1
12-20 min	0	0	0,75	0,9
20-45 min	0	0	0	0,75
>45 min	0	0	0	0

Figura 88 a-b: Caso di studio Galleria Colle Capretto, velocità di esodo

- valori dei periodi massimi di permanenze previsti per le varie zone corrispondenti ad una fascia di punteggio 2 sulle 3 previste

t_{max}									
									punteggio
		ventilazione meccanizzata		longitudinale					1,5
		impianto di aspirazione fumi		presente					1
		drenaggi		si					1
			dreno infiammabili	no					0
		pavimentazione		non drenante					0
		resistenza al fuoco							
			strutture	REI<120					0
			dispositivi antincendio impianti	non presenti					0
		impianto idrico antincendio		presente					1
			interdistanza idranti	0	m				0
		accesso mezzi di contenimento		non presente					0
			interdistanza accessi	0	m				0

somma punteggio=	
4,5	
risulta fascia	2

1. MERCI PERICOLOSE

valori considerati-fascia	<u>2</u>			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[<u>min</u>]	4,5	7	12	20

2. VEICOLI PESANTI

valori considerati-fascia	<u>2</u>			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[<u>min</u>]	5	8	15	30

3. AUTOVETTURE

valori considerati-fascia	<u>2</u>			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
t[<u>min</u>]	7	12	20	45

Figura 89 a-b: Caso di studio Galleria Colle Capretto, tempo di massima permanenza

– un valore del periodo di chiusura della galleria pari a 116 secondi

sistema di chiusura galleria	PREVISTO			
	tempo di chiusura - valore iniziale =		3 minuti	
			180 secondi	
centro di controllo	SI			
sistemi di rilevazione	video-sorveglianza rilevatori fumo-incidente			
<i>se esistono sistemi di rilevazione fumo-incendi, t medio diminuisce (X0,9)</i>				
<i>se esistono sistemi di rilevazione e sono associati a un centro di controllo, t medio chiusura diminuisce(x0,85)</i>				
	fattore moltiplicativo t chiusura:		0,85	
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t chiusura può diminuire</i>				
	telefoni	x0,95		
	pulsanti allarme	x0,98		
<i>se ho piu sistemi presenti contemporaneamente, considero solo quello associato al fattore moltiplicativo più basso</i>				
	fattore moltiplicativo t chiusura:		0,95	
in base a sistema di chiusura previsto:				
	semafori all'ingresso	x0,85		
	barriere all'ingresso	x0,8		
	pannelli mex variabili	x0,9		
	pannelli mex variabili+semafori	x0,82		
	pannelli mex variabili+barriere	x0,85		
	fattore moltiplicativo t chiusura:		0,8	
tchiusura = 116,28 secondi				

Figura 90: Caso di studio Galleria Colle Capretto, tempo di chiusura della galleria

– un tempo di premovimento pari a 110 secondi

valore di riferimento	3 minuti 180 secondi	
sistemi di comunicazione presenti	altoparlanti	no
	trasmissioni radio	si
<i>in base ai sistemi di comunicaz. presenti, t premovimento può diminuire</i>		
coeff. moltiplicativo t:		
altoparlanti	x 0,9	
trasmissioni radio	x 0,85	
entrambi	x0,82	
fattore moltiplicativo t premov.:		0,85
<i>se sono presenti pannelli a mex variabile-barriere-semafori sistemi di rilevamento in galleria, t premovimento può diminuire</i>		
coeff. moltiplicativo t:		
semafori	x0,85	no
pannelli a mex variabile	x0,9	si
barriere	x0,8	no
semafori+ pannelli a mex variabile	x0,8	no
barriere+ pannelli a mex variabile	x0,8	no
sist.rilevamento	x0,9	si
fattore moltiplicativo t premov.:		0,72
tempo di pre-movimento		110,16 s

Figura 91: Caso di studio Galleria Colle Capretto, tempo di premovimento

In base ai dati di traffico a disposizione, il modello prevede coinvolti nell'evento un numero di veicoli pari a 11, che, in base ai coefficienti di occupazione previsti e allo spettro di traffico del tunnel, corrispondono a 19 persone.

veicoli entranti in galleria in tc: (con $F_p = 2,60$)		in de in du	11 11	confronto con:	n. max veicoli in de n. max veicoli in du	(de=dist. Evento-entrata) (du=dist. Evento-uscita)	70 veic 68 veic
-> veicoli presenti		de du	11 veicoli 0 veicoli	di cui: di cui:	7,96 leggeri 0,00 leggeri	3,30 pesanti 0,00 pesanti	0,11 bus 0,00 bus
POPOLAZIONE PRESENTE IN GALLERIA:		19 persone					
con coeff. Occupazione veicoli							
leggeri 1,50		autobus 30,00					
pesanti 1,00							

Figura 92: Caso di studio Galleria Colle Capretto, report modello di formazione code

Anche in questo caso, vengono proposti alcuni casi rappresentativi di cui si definisce la severità tramite il modello di calcolo proposto, variando caratteristiche e posizione dell'evento incendio.

4.3.3 Ipotesi di simulazione

Il caso analizzato prevede di posizionare l'evento incidentale che porta all'incendio esattamente al termine del tunnel, prevedendo che blocchi tutti i veicoli provenienti dalla parte opposta della galleria impedendovi il passaggio.

posizione incendio		
distanza da entrata galleria <i>(se galleria bidirezionale indicare distanza minore)</i>	<input type="text" value="1180"/>	m
distanza da uscita galleria (= lunghezza - dist. entrata)	<input type="text" value="0"/>	m
distanza uscite di emergenza più vicine a monte e a valle dell'evento* <i>(in caso di galleria monodirezionale considerare solo le uscite posizionate nella direzione dei veicoli in coda)</i>	<input type="text" value="590"/>	m

Figura 93: Caso di studio della Galleria Colle Capretto, posizionamento dell'evento analizzato

In tale situazione, si scelgono dei valori rappresentativi di interdistanza tra i veicoli, e si definisce il numero di vittime derivante.

- interdistanza = 25 m
numero di vittime al variare dei veicoli in fiamme:
autovetture: **3** decessi
veicoli pesanti: **6** decessi
veicoli trasportanti merce pericolosa: **13** decessi
- interdistanza = 2 m
autovetture: **8** decessi
veicoli pesanti: **13** decessi
veicoli trasportanti merce pericolosa: **19** decessi

4.3.4 Analisi risultati

Per quanto riguarda le caratteristiche del tunnel, il progetto di valutazione EuroTAP in particolare ha individuato delle eccellenze nelle categorie “illuminazione e fornitura corrente”, “ventilazione” e “gestione emergenze”; un giudizio buono è stato dato alla categoria “comunicazioni”, mentre giudizi più bassi (accettabile) sono stati assegnati a “gestione e controllo del traffico”, “vie di salvataggio e di fuga”, “protezione antincendio”.

Criticità sono invece state individuate principalmente nell'assenza di corsie di emergenza e piazzole di sosta e di impianti per la diffusione di messaggi sonori ai portali, nelle uscite di emergenza, nei rifugi e in galleria.

In caso di incendio, ci sono buoni presupposti per un auto-soccorso efficace. Il sistema di ventilazione aspira il fumo in direzione del traffico e fuori dalla canna interessata dall'incendio: nella zona retrostante l'area interessata dall'evento, i veicoli possono abbandonare senza difficoltà il tunnel; i soggetti a valle dal fuoco vengono invece a trovarsi in una zona libera da fumo, potendo raggiungere senza particolari problemi le uscite di sicurezza chiaramente segnalate (si evidenzia che l'efficienza ed efficacia del sistema di ventilazione sono legate anche all'entità dell'incendio e dei fumi sviluppati).

Nonostante la breve lunghezza e un basso volume di traffico giornaliero, il progetto EuroTAP evidenzia per questo tunnel un livello di rischio 'medio', dato dall'elevata percentuale di traffico pesante, circa il 30%.

Analizzando i risultati ottenuti nel caso preso ad esempio, si nota un elevato numero di decessi, soprattutto per valori di interdistanza tra i veicoli incolonnati limitati: nel caso di collisione coinvolgente merci pericolose si ha la morte di quasi tutti i soggetti coinvolti.

La gravità delle conseguenze è dovuta principalmente alla presenza di un'unica via di fuga all'interno del tunnel: posizionando come nell'esempio l'incendio alla fine del tunnel, si ha che la distanza tra l'evento e l'uscita risulta massima.

5. Conclusioni e possibili sviluppi

Il lavoro di tesi svolto ha portato all'elaborazione di uno strumento di previsione, che permette di definire tramite un metodo speditivo le conseguenze associate ad un particolare evento avverso sviluppatosi all'interno di un tunnel stradale.

Analizzando le norme vigenti in materia, l'evento critico su cui si pone maggiore attenzione risulta l'incendio, in quanto oltre ad essere il più frequente è anche particolarmente grave in termini di magnitudo, poiché uno scenario di questo tipo può degenerare velocemente verso condizioni totalmente insostenibili dell'ambiente, mettendo a serio rischio la sopravvivenza delle persone coinvolte.

Attraverso l'analisi di tutte le teorie che stanno alla base delle problematiche connesse all'incendio in galleria, si è cercato di riproporre organicamente, analizzando un vasto numero di fonti, l'aspetto critico di ogni questione, al fine di coglierne l'essenza e riportare ogni discorso al contesto trattato; da queste analisi è emersa tra l'altro una mancanza di unicità in letteratura in materia di sicurezza all'interno di gallerie stradali: tra le Linee Guida ANAS, prese a riferimento in questa tesi, e la Direttiva Europea 54/2004/CE per esempio sono presenti valori differenti tra le distanze minime previste per alcune dotazioni impiantistiche.

Per lo sviluppo del metodo proposto si è cercato principalmente di stabilire concretamente quali fossero e come debbano essere definiti i dati di input di un modello virtuale di incendio in galleria e di un sottomodello di simulazione dell'esodo, al fine di ottenere dei risultati attendibili.

In modo del tutto sensato e ragionevole si è scelto di legare l'evoluzione dell'evento a caratteristiche strutturali ed impiantistiche della galleria, nonché alla natura dell'incendio; per tener conto delle numerose variabili in gioco, si è reso necessario aggregare in una serie di indicatori le informazioni a disposizione, le cui particolarità sono state utilizzate per definire,

tramite appositi sottomodelli, un valore quantitativo dei parametri che caratterizzano l'esodo degli utenti.

Analizzando le diverse fonti a disposizione sull'argomento, si è definito che con il passare del tempo in un soggetto esposto all'incendio si registra un peggioramento delle condizioni di salvabilità, in particolare una diminuzione di visibilità e di velocità di fuga; dai dati a disposizione sia dalla letteratura teorica che riguardo esercitazioni reali compiute si sono definiti dei valori rappresentativi dei diversi parametri, e se ne è modellata l'evoluzione nel tempo.

Il metodo utilizzato per la definizione del modello di calcolo si basa su una serie di ipotesi ed assunzioni semplificative, rese necessarie per garantire la spedività dello strumento: si è scelto di selezionare un numero di dati significativi limitato, tutti di natura prevalentemente quantitativa, cercando comunque di rappresentare il maggior numero di scenari possibili.

Per garantire l'oggettività del metodo si è deciso di considerare delle caratteristiche medie di traffico e di comportamento dei soggetti coinvolti; si è inoltre reso necessario impostare la potenza dell'incendio come valore di input, senza considerare la cinetica di reazione chimica legata alla combustione, e legare essenzialmente l'evoluzione del campo termico alla coordinata longitudinale della galleria.

Definito tale strumento di calcolo, si è poi proceduto alla validazione dello stesso, applicando il metodo proposto a tre gallerie esistenti ed in esercizio: il Traforo del Monte Bianco, la Galleria Morgex nord e la Galleria Colle Capretto.

Il primo esempio è particolarmente rappresentativo in quanto costituisce un riferimento a livello internazionale in materia di sicurezza in galleria; gli altri due casi sono stati utili per validare il modello nel caso di gallerie unidirezionali: per tutti gli esempi analizzati si sottolinea la difficoltà nel reperimento di informazioni riguardanti le caratteristiche di resistenza al fuoco. In tutti e tre i casi si sono ottenuti dei risultati giudicati di buon senso, che hanno messo in luce la bontà dello strumento.

Si evidenzia che per la sua fondamentale caratteristica di semplicità di utilizzo lo strumento di elaborazione proposto risulta innovativo rispetto a quanto presente in letteratura.

La metodologia presentata può essere maggiormente implementata ed approfondita attraverso eventuali sviluppi futuri.

Essendo che lo strumento si configura come supporto all'analisi del rischio, un possibile sviluppo è certamente identificabile nell'utilizzo del metodo proposto come base per la definizione proprio dell'indicatore rischio.

Associando ai risultati ottenuti anche uno studio sull'analisi della probabilità di accadimento degli eventi, sarebbe possibile definire in maniera quantitativa il rischio, le cui componenti fondamentali risultano proprio probabilità di accadimento e magnitudo.

La validazione dello strumento su altri casi di studio reali sarebbe sicuramente utile per attestarne la bontà e mettere in luce eventuali imprecisioni o approssimazioni troppo condizionanti del metodo.

Infine, un'ulteriore sviluppo potrebbe prevedere di integrare la trattazione con scenari che considerino anche gallerie con lunghezza inferiore a 500 m, dotate di standard di sicurezza molto meno vincolanti: la normativa a cui ci si riferisce in questa tesi tratta esclusivamente gallerie appartenenti alla rete TEN-T, tutte appunto più lunghe di 500 m.

Bibliografia

- [1] Accordo Europeo relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose su strada - *ADR* (2011)
- [2] ANAS S.p.A. (Ottobre 2009). *Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali secondo la normativa vigente*
- [3] Bettelini M. (2003). *La sicurezza in galleria: riduzione attiva del rischio*. Gallerie e Grandi Opere sotterranee n.69, aprile 2003
- [4] Borchiellini Colella Verda (2007). *L'applicazione dei modelli numerici per lo studio delle logiche di ventilazione in galleria in caso di incendio*. Giornata nazionale UIT dell'ingegneria antincendio – Politecnico di Torino
- [5] Cafaro E. (2011). *La Modellazione Matematica e la Simulazione degli Eventi d'Incendio come strumento di Quantificazione del Rischio*. Gruppo di Ricerca sulla Fiamma, Dipartimento di Energetica Politecnico di Torino
- [6] Casatta S. (2012). *Un indice di sicurezza per le gallerie stradali: metodo per la valutazione delle prestazioni strutturali e impiantistiche*. Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Infrastrutture di Trasporto – Politecnico di Milano
- [7] Cavaliere A. *Applicazione delle Direttive ATEX*, incontro tecnico per VV. F.
- [8] Cianciolo D.D. (2012). *Sicurezza nelle Gallerie Stradali: Simulazione ed analisi CFD delle misure di sicurezza antincendio*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture viarie XXIV Ciclo – Università degli Studi di Catania
- [9] Cianciolo D.D. , Leonardi S. (2010). *Simulazioni di incendio in tunnel stradali*. Le Strade, 11-2010
- [10] De Felice A. (2007). *Fuori dal tunnel. Test di Sicurezza Tunnel*

- [11] Di Paolo M. , Ponziani F.A. , Pustorino S. *Simulazione di incendi reali*. Centro Studi ed Esperienze del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. Structura Engineering, Livorno
- [12] Dlgs 264/2006, *Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie rete stradale transeuropea*
- [13] EuroTAP (2012). *Risultati dei test 2012*. ACI
- [14] Ferro V. (2008). *La ventilazione meccanica connessa alla sicurezza delle gallerie autostradali*
- [15] Frassoldati A. Derudi M. *Modelli CFD per simulazione di incendio in galleria*. Politecnico di Milano, Dip. Di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G. Natta”
- [16] Fresta G. (2008). *Sicurezza nelle gallerie ferroviarie: modellazione numerica del tunnel per la valutazione del rischio d'incendio*. Tesi di Laurea in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti – Università degli studi di Catania
- [17] GEIE-TMB. *Carta dei servizi del Traforo del Monte Bianco*
- [18] Kim M.E. (2006). *A study on pulsation in Runehamar Tunnel Fire Tests with forced longitudinal ventilation*. Degree of Master of Science in Fire Protection Engineering – Worcester Polytechnic Institute
- [19] Leonardi S. , Spinelli M.S. (2009). *Sicurezza dei tunnel ferroviari*. Strade e Autostrade, 5-2009
- [20] Maja R. (2011-2012). *Modalità stradale, Trasporto di merci pericolose, Regolamento ADR*.
Corso di Laurea Trasporti Marittimi e Intermodali – Politecnico di Milano
- [21] Maja R. (2011-2012). *Modalità stradale, Trasporto di merci pericolose, Sicurezza nelle gallerie*. Corso di Laurea Trasporti Marittimi e Intermodali – Politecnico di Milano

- [22] Mazziotti L. (2002). *Gli incendi in galleria: un problema anche per le squadre di soccorso*. Vigili del fuoco: soccorrere in sicurezza. Roma
- [23] Mirafiori Consulenze (2000). *Problematiche termiche relative all'impiego di rivestimenti in acciaio inox all'interno di gallerie stradali*. Università degli studi di Genova
- [24] Panzavolta D. (2009). *L'analisi di rischio nella progettazione delle gallerie stradali*. Tesi di Laurea in Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aeroporti – Università di Bologna
- [25] Perchiazzi M. *Prevenzione e protezione incendi: informazioni utili*. Servizi Prevenzione e Protezione INFN Bari
- [26] PIARC (2011). *Manuale delle Gallerie Stradali*
- [27] RAV, Raccordo Autostradale Valle D'Aosta. *Carta dei servizi*
- [28] Rotini G.B. (2012). *Analisi dell'impatto di incendi in ambienti confinati, prestazioni dei filtri a prova di fumo in un tunnel di linea metropolitana*. Tesi di Laurea in Ingegneria Energetica – Politecnico di Milano
- [29] “Sapienza” Università di Roma – Facoltà di Ingegneria, Autostrade per l'Italia S.p.A. (2007). *Corso di laboratorio progettazione e gestione della sicurezza delle gallerie autostradali*
- [30] “Sapienza” Università di Roma – Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente (2009). *Genesis del pericolo in galleria: Pericolosità e Probabilità degli eventi iniziatori e valutazione del danno atteso*
- [31] Sironi F. (2012). *La valutazione del rischio nel trasporto di merci pericolose: il caso delle gallerie lecchesi*. Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Infrastrutture di Trasporto – Politecnico di Milano
- [32] Spagnolo N. , Farinelli A. , Nardi D. , Guarascio M. *Simulazione ad agenti per analisi di scenari incidentali*. *Quaderno di scienza e tecnica*, Istituto Superiore Antincendi

[33] Ventura A. , Caiazza P. (2011). *Analisi del rischio e modelli di esodo da gallerie ferroviarie*. ITALFERR, Gruppo Ferrovie dello Stato

siti web consultati

PIARC

<http://tunnels.piarc.org>

ingegneria antincendio AssoIASA

<http://ingegneria.antincendio.it>

C.M.A. Sistemi Antincendio

<http://www.cma-sistemiantincendio.it>

Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

<http://www.vigilidelfuoco.it>

ingegneria antincendio AssoIASA

<http://ingegneria.antincendio.it>

NFPA – National Fire Protection Association

<http://www.nfpa.org>

raccordo autostradale Valle D'Aosta

www.ravspa.it

Tunnel Monte Bianco

<http://www.tunnelmb.net>

Allegato I

Maschere di calcolo per la definizione del numero di vittime

Come analizzato in capitolo 3, sono previsti dei sottomodelli per il calcolo di:

- tempo di chiusura galleria
- tempo di premovimento
- velocità di esodo
- tempo di permanenza massima nelle diverse zone
- numero di veicoli coinvolti (modello di formazione code).

I dati definiti da questi sottomodelli vengono poi elaborati per la definizione del risultato finale.

Di seguito sono riportate le varie maschere di calcolo, con una breve spiegazione.

VEICOLI COMPRESI TRA ENTRATA GALLERIA E EVENTO

veicolo	dist.da evento [m]	zona veicolo	zona uscita più vicina	distanza da uscita più vicina [m]	velocità zona auto / intervallo 1	veicoli-uscita nella stessa zona	uscita in 1 zona da veicolo	uscita a 2 zone da veicolo	uscita a 3 zone da veicolo
1	0	1	3	350	0,6	0	0	1	0
2	11,61	1	3	338,39	0,6	0	0	1	0
3	23,22	1	3	326,78	0,6	0	0	1	0
4	34,83	1	3	315,17	0,6	0	0	1	0
5	46,44	1	3	303,56	0,6	0	0	1	0
6	58,05	1	3	291,95	0,6	0	0	1	0
7	69,66	1	3	280,34	0,6	0	0	1	0
8	81,27	2	3	268,73	1	0	1	0	0
9	92,88	2	3	257,12	1	0	1	0	0
10	104,49	2	3	245,51	1	0	1	0	0
11	116,1	2	3	233,9	1	0	1	0	0
12	127,71	2	3	222,29	1	0	1	0	0
13	139,32	2	3	210,68	1	0	1	0	0
14	150,93	2	3	199,07	1	0	1	0	0
15	162,54	2	3	187,46	1	0	1	0	0
16	174,15	2	3	175,85	1	0	1	0	0
17	185,76	2	3	164,24	1	0	1	0	0
18	197,37	2	3	152,63	1	0	0	0	0
19	208,98	3	3	141,02	1	0	0	0	0
20	220,59	3	3	129,41	1	0	0	0	0
21	232,2	3	3	117,8	1	0	0	0	0
22	243,81	3	3	106,19	1	0	0	0	0
23	255,42	3	3	94,58	1	0	0	0	0
24	267,03	3	3	82,97	1	0	0	0	0
25	278,64	3	3	71,36	1	0	0	0	0
26	290,25	3	3	59,75	1	0	0	0	0
27	301,86	3	3	48,14	1	0	0	0	0
28	313,47	3	3	36,53	1	0	0	0	0
29	325,08	3	3	24,92	1	0	0	0	0
30	336,69	3	3	13,31	1	0	0	0	0
31	348,3	3	3	1,7	1	0	0	0	0
32	359,91	3	4	290,09	1	0	0	0	0

Nella prima fase di elaborazione lo strumento prevede di collocare all'interno della galleria ogni veicolo presente, e definire in base alla posizione il numero di zone che dovranno

attraversare gli utenti ad esso associati per raggiungere l'uscita di emergenza.

Per arrivare a definire l'uscita più vicina, viene fatto un confronto tra la posizione del veicolo e quella dell'uscita rispetto all'evento: viene sempre scelta l'uscita più vicina al veicolo allontanandosi dall'evento, ad eccezione del caso in cui ve ne sia una a breve distanza nella direzione opposta (è definita una distanza massima di 20 m).

veicolo	distanza da evento [m]	dist. uscita più vicina DA EVENTO [m]	dist. uscita più vicina ALLONTANANDOSI AVVICINANDOSI AD DA EVENTO [m]	limite distanza uscita più vicina	limite distanza uscita più vicina	per tornare indietro = dist. uscita più vicina DA CONSIDERARE	per tornare indietro = dist. uscita più vicina DA CONSIDERARE	m	m	EVENTO - ENTRATA							
										veicolo	interdistanza veicolo	1	2	3	4	5	6
1	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	1,00	0,50	100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00
2	4,01	95,99	0,00	0,00	95,99	95,99	95,99	100,00	100,00	2,00	0,50	95,99	195,99	295,99	395,99	495,99	595,99
3	8,02	91,98	0,00	0,00	91,98	91,98	91,98	100,00	100,00	3,00	0,50	91,98	191,98	291,98	391,98	491,98	591,98
4	12,03	87,97	0,00	0,00	87,97	87,97	87,97	100,00	100,00	4,00	0,50	87,97	187,97	287,97	387,97	487,97	587,97
5	16,04	83,96	0,00	0,00	83,96	83,96	83,96	100,00	100,00	5,00	0,50	83,96	183,96	283,96	383,96	483,96	583,96
6	20,05	79,95	0,00	0,00	79,95	79,95	79,95	100,00	100,00	6,00	0,50	79,95	179,95	279,95	379,95	479,95	579,95
7	24,06	75,94	0,00	0,00	75,94	75,94	75,94	100,00	100,00	7,00	0,50	75,94	175,94	275,94	375,94	475,94	575,94
8	28,07	71,93	0,00	0,00	71,93	71,93	71,93	100,00	100,00	8,00	0,50	71,93	171,93	271,93	371,93	471,93	571,93
9	32,08	67,92	0,00	0,00	67,92	67,92	67,92	100,00	100,00	9,00	0,50	67,92	167,92	267,92	367,92	467,92	567,92
10	36,09	63,91	0,00	0,00	63,91	63,91	63,91	100,00	100,00	10,00	0,50	63,91	163,91	263,91	363,91	463,91	563,91
11	40,10	59,90	0,00	0,00	59,90	59,90	59,90	100,00	100,00	11,00	0,50	59,90	159,90	259,90	359,90	459,90	559,90
12	44,11	55,89	0,00	0,00	55,89	55,89	55,89	100,00	100,00	12,00	0,50	55,89	155,89	255,89	355,89	455,89	555,89
13	48,12	51,88	0,00	0,00	51,88	51,88	51,88	100,00	100,00	13,00	0,50	51,88	151,88	251,88	351,88	451,88	551,88
14	52,63	47,37	0,00	0,00	47,37	47,37	47,37	100,00	100,00	14,00	1,00	47,37	147,37	247,37	347,37	447,37	547,37
15	57,14	42,86	0,00	0,00	42,86	42,86	42,86	100,00	100,00	15,00	1,00	42,86	142,86	242,86	342,86	442,86	542,86
16	61,65	38,35	0,00	0,00	38,35	38,35	38,35	100,00	100,00	16,00	1,00	38,35	138,35	238,35	338,35	438,35	538,35
17	66,16	33,84	0,00	0,00	33,84	33,84	33,84	100,00	100,00	17,00	1,00	33,84	133,84	233,84	333,84	433,84	533,84
18	70,67	29,33	0,00	0,00	29,33	29,33	29,33	100,00	100,00	18,00	1,00	29,33	129,33	229,33	329,33	429,33	529,33
19	75,18	24,82	0,00	0,00	24,82	24,82	24,82	100,00	100,00	19,00	1,00	24,82	124,82	224,82	324,82	424,82	524,82
20	79,69	20,31	0,00	0,00	20,31	20,31	20,31	100,00	100,00	20,00	1,00	20,31	120,31	220,31	320,31	420,31	520,31
21	84,20	15,80	0,00	0,00	15,80	15,80	15,80	100,00	100,00	21,00	1,00	15,80	115,80	215,80	315,80	415,80	515,80
22	88,71	11,29	0,00	0,00	11,29	11,29	11,29	100,00	100,00	22,00	1,00	11,29	111,29	211,29	311,29	411,29	511,29
23	93,22	6,78	0,00	0,00	6,78	6,78	6,78	100,00	100,00	23,00	1,00	6,78	106,78	206,78	306,78	406,78	506,78
24	102,24	2,27	0,00	0,00	2,27	2,27	2,27	100,00	100,00	24,00	1,00	2,27	102,27	202,27	302,27	402,27	502,27
25	106,75	93,25	4,48	-2,24	93,25	93,25	93,25	100,00	100,00	25,00	1,00	93,25	193,25	293,25	393,25	493,25	593,25
26	111,26	88,74	6,75	-4,50	88,74	88,74	88,74	200,00	200,00	26,00	1,00	88,74	188,74	288,74	388,74	488,74	588,74
27	115,77	84,23	9,02	-6,75	84,23	84,23	84,23	200,00	200,00	27,00	1,00	84,23	184,23	284,23	384,23	484,23	584,23
28	120,28	79,72	11,29	-9,02	79,72	79,72	79,72	200,00	200,00	28,00	1,00	79,72	179,72	279,72	379,72	479,72	579,72
29	124,79	75,21	13,56	-11,29	75,21	75,21	75,21	200,00	200,00	29,00	1,00	75,21	175,21	275,21	375,21	475,21	575,21
30	129,30	70,70	15,83	-13,56	70,70	70,70	70,70	200,00	200,00	30,00	1,00	70,70	170,70	270,70	370,70	470,70	570,70
31	133,81	66,19	18,10	-15,83	66,19	66,19	66,19	200,00	200,00	31,00	1,00	70,70	170,70	270,70	370,70	470,70	570,70
32	138,32	61,68	20,37	-18,10	61,68	61,68	61,68	200,00	200,00	32,00	1,00	66,19	166,19	266,19	366,19	466,19	566,19
33	142,83	57,17	22,64	-20,37	57,17	57,17	57,17	200,00	200,00	33,00	1,00	61,68	161,68	261,68	361,68	461,68	561,68
34	147,34	52,66	24,91	-22,64	52,66	52,66	52,66	200,00	200,00	34,00	1,00	57,17	157,17	257,17	357,17	457,17	557,17
35	151,85	48,15	27,18	-24,91	48,15	48,15	48,15	200,00	200,00	35,00	1,00	52,66	152,66	252,66	352,66	452,66	552,66
36	156,36	43,64	29,45	-27,18	43,64	43,64	43,64	200,00	200,00	36,00	1,00	48,15	148,15	248,15	348,15	448,15	548,15
37	160,87	39,13	31,72	-29,45	39,13	39,13	39,13	200,00	200,00	37,00	1,00	43,64	143,64	243,64	343,64	443,64	543,64

Anche in questo caso si ripete lo stesso procedimento precedentemente definito; nell'esempio tutti gli utenti che passano da zona 1 a zona 4 vengono valutati deceduti (evidentemente in questo caso la distanza da percorrere per l'esodo, ossia la distanza dall'uscita, era molto elevata).

Alla fine di questa fase è stato determinato il numero veicoli i cui utenti non sono in grado di salvarsi durante l'evento. Per definire il numero di soggetti corrispondenti si moltiplica semplicemente questo numero per il numero medio di occupanti per veicolo definito inizialmente.

In caso di galleria bidirezionale, i calcoli appena descritti sono ripetuti 2 volte, una per ciascuna delle 2 direzioni in cui si accoderanno i veicoli: i tempi di esodo saranno diversi a seconda della posizione dell'evento iniziatore all'interno del tunnel e quindi della distanza delle uscite di sicurezza da raggiungere (cioè dal tempo di esodo).

Ringraziamenti

Innanzitutto vorrei ringraziare l'Ing. Roberto Maja e gli Ing. Rosanna Iuliano e Fabio Borghetti per l'aiuto fornitomi e per la costante disponibilità dimostratami in questi mesi durante lo sviluppo della presente tesi.

Desidero inoltre esprimere la mia gratitudine all'Ing. Lorini e al Dott. Proserpio per il sostegno datomi durante lo svolgimento del periodo di tirocinio.

Un ringraziamento va a chi in questi anni di studi mi ha aiutato e supportato, dai professori ai miei compagni di corso; in particolare Andrea e Nunzio, con cui ho condiviso gli ultimi 2 anni, e Luca, che oltre agli interi 5 anni di università ha condiviso con me anche gli ultimi anni delle scuole superiori, e che non mi ha mai mancato di consigli e suggerimenti.

Il ringraziamento più importante va di sicuro alla mia famiglia, le mie radici e le mie ali, in particolare ai miei genitori, che mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo, ai miei nonni, su cui so di poter sempre contare, e ai miei fratelli Carla e Mario, che mi hanno allo stesso modo aiutato ad arrivare qui, visto che hanno trascorso con me gran parte di questi 25 anni.

Un caloroso ringraziamento a Giulia, che in questo anno mi è stata vicino più di ogni altra persona, e a tutti i miei amici, sempre presenti, Alessandro, Attilio, Ezio, Gennaro, Marco, Martina, Matteo, Oscar, Riccardo, Sabrina, Simone e tutti gli altri.