



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale

Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti

XXXI Ciclo

Anno Accademico 2019-2020

Il progetto e la verifica di sicurezza del sistema stradale

Dottorando
Ing. Giuliano Rossi
matr. 781344

Tutor
Prof.ssa Ing. Mara Lombardi

Sommario

Abstract	9
Executive Summary	10
0 Introduzione	12
0.1 Progetto e verifica della sicurezza dell'infrastruttura stradale nel quadro normativo europeo	12
0.2 Progetto e verifica della sicurezza dell'infrastruttura stradale nel quadro normativo italiano	13
0.3 Stato dell'arte nell'applicazione dei metodi strutturati di QRA nel caso italiano	14
0.4 Struttura del lavoro	20
1 Normative di riferimento per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.....	24
1.1 La Circolare Ministeriale 7938 del 6/12/1999	25
1.2 Il Decreto Ministeriale 5/6/2001	25
1.3 Il Decreto Ministeriale 5/11/2001.....	25
1.4 Il Decreto Ministeriale 3476 del 14/9/2005	28
1.5 Circolare ANAS 33 del 2005	28
1.6 Direttiva 2004/54/CE.....	29
1.7 Decreto Legislativo n. 264 del 5 ottobre 2006	32
1.8 Coordinamento tra le previsioni del D. Lgs. 264/2006 e il Decreto Ministeriale 5/11/2001: l'intervento di armonizzazione del DL 24/1/2012 n. 1	35
1.9 Analisi delle norme di recepimento della Direttiva 2004/54/CE in altri Paesi europei.....	35
1.9.1 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Francia.....	35
1.9.2 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Spagna	39
1.9.3 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Austria	40
1.9.4 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Repubblica Ceca	43
1.9.5 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Olanda	44
1.9.6 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Germania.....	44
1.10 Direttiva 2008/96/CE.....	45
1.11 D. Lgs. 35/2011	46
1.12 Decreto Ministeriale 2/5/2012 Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali	47
1.13 Direttiva 2008/114/CE.....	52
1.14 D.Lgs. 61/2011	54
1.15 DPR 151/2011	54
1.16 Conclusioni	56
2 Concetti generali dell'Analisi di Rischio Quantitativa.....	58
2.1 Affidabilità e Sicurezza.....	58

2.1.1	Ruolo dell'affidabilità nella progettazione dei sistemi per la mobilità.....	59
2.1.2	Affidabilità del componente: il guasto	60
2.1.3	Metodi di valutazione analitica dell'affidabilità di sistema	65
2.1.4	Metodi di prova e ottimizzazione dell'affidabilità: il progetto.....	67
2.2	Analisi del rischio.....	69
2.2.1	L'identificazione degli incidenti rilevanti.....	70
2.2.2	Dal guasto del componente all'incidente: Fault Tree Analysis.....	70
2.2.3	Tecniche di analisi delle serie storiche per la stima della frequenza attesa dell'evento iniziatore 71	
2.2.4	Le medie mobili e la determinazione del campione omogeneo rappresentativo	72
2.2.5	Frequenze attese sulla base di osservazioni limitate e per occorrenze mai verificate	72
2.2.6	Scenari evoluti di incidente: Event Tree Analysis	74
2.2.7	La misura del rischio	75
2.2.8	La valutazione del rischio.....	76
2.2.9	Analisi costi – benefici (ACB)	78
2.2.10	Sommario grafico delle tecniche utilizzate nella QRA.....	80
2.3	Critica dei metodi di analisi di rischio.....	81
2.3.1	Effettività e completezza dell'ETA	82
2.3.2	Attendibilità della stima di d_i	83
2.3.3	Dai difetti di attendibilità dell'analisi alla consistenza degli indicatori di rischio.....	83
2.3.4	Valutazioni etiche circa l'indicatore di rischio sociale sul piano F-N.....	87
2.4	La stima del danno.....	91
2.4.1	L'incendio.....	91
2.4.2	Dinamica dell'incendio	94
2.4.3	Potenza termica generata dall'incendio.....	95
2.4.4	La modellazione termo-fluidodinamica dell'incendio	98
2.4.5	I codici di calcolo computazionali	102
2.4.6	FDS 5: modellazione e simulazione dell'incendio.....	102
2.4.7	Condizioni di esodo in emergenza.....	105
2.4.8	EVAC: modellazione e simulazione dell'esodo	107
2.4.9	Il modello umano del movimento in EVAC.....	109
2.4.10	Interazione tra uomo (EVAC) e fuoco (FDS)	114
2.4.11	Tempi di evacuazione	116
2.5	Incidente coinvolgenti merci pericolose (ADR)	119
2.5.1	Effetti di danno da dispersione di materiale ADR	125

2.6	Sottosistemi condizionanti il flusso del pericolo in galleria	127
3	L'incidente come fenomeno e la sua stima	130
3.1	Premessa	130
3.2	Finalità degli studi sull'incidentalità stradale	132
3.2.1	Studi indirizzati alla verifica di specifiche evidenze con approccio epidemiologico - descrittivo 133	
3.2.2	Studi indirizzati alla verifica delle variabili infrastrutturali causali del fenomeno incidentale 133	
3.2.3	Studi e ricerche indirizzati alla formulazione di funzioni previsionali dell'incidentalità	137
3.3	Un contributo indirizzato alla generalizzabilità dei costrutti predittivi: gli <i>Accident Prediction Models</i>	141
3.4	L'incidentalità stradale nelle gallerie.....	143
3.5	Gli incendi in galleria	145
3.5.1	Proporzione tra incendi originari e incendi determinati da incidenti	146
3.5.2	Stima del tasso di incendio per tipologia veicolo	147
3.5.3	Cause di incendio.....	147
3.5.4	Proporzione tra incendi secondari ed incidenti gravi.....	148
3.5.5	Misura del danno.....	148
3.5.6	Collocazione spaziale degli eventi nel tunnel.....	148
3.5.7	Collocazione temporale degli eventi nelle fasce orarie della giornata e in periodi dell'anno 148	
3.6	Metodi di previsione finalizzati alla gestione della sicurezza e all'analisi del rischio di uno specifico sito	148
4	L'approccio RAMS per LA verifica della prestazione dei sottosistemi tecnici.....	154
4.1	Affidabilità e disponibilità di un sistema E, E, EP secondo la norma IEC 61508.....	154
4.1.1	Struttura della IEC 61508.....	154
4.1.2	Il Safety Integrity Level	154
4.1.3	HFT (Hardware Fault Tolerance).....	155
4.1.4	SFF (Safe Failure Fraction)	155
4.2	I componenti di un sistema di sicurezza tipico delle installazioni in galleria	157
4.2.1	Sensori	157
4.2.2	Collegamenti.....	157
4.2.3	NAS (Network Attached Storage)	159
4.2.4	VSR (Voltage Sensitive Relay)	159
4.2.5	DSS (Decision Support System)	159
4.2.6	SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) e PLC (Programmable Logic Controller)	159

4.2.7	Attuatori	160
4.3	Funzionamento dell'impianto di ventilazione in galleria	161
4.3.1	Le singole funzioni dell'impianto	161
4.3.2	Le CCF (Common Cause Failures)	162
4.3.3	Il Partial Beta Model	162
4.3.4	Il BETAPLUS Model	163
4.3.5	Modello esponenziale del BETAPLUS Model	164
4.3.6	Il coefficiente CMooN	164
4.3.7	Schema funzionale dell'impianto	165
4.3.8	Calcolo dell'affidabilità	166
4.4	Esempio di implementazione della funzione di disponibilità del singolo sottosistema nel sistema complessivo	170
4.4.1	Database guasti e anomalie impianti di galleria	171
5	Applicazione della procedura di analisi di rischio quantitativa esperta alla galleria Clap Forat (A23)..	173
5.1	Descrizione della struttura di case study	173
5.2	Dati statistici per la qualificazione dei tassi di incidente	180
5.3	Allargamento del campione di stima	181
5.3.1	Dati I.STAT	181
5.3.2	Verifica di omogeneità delle gallerie delle tratte 4-6	185
5.3.3	Identificazione del campione omogeneo di strutture per il calcolo dei tassi di incidente grave e di incendio in galleria	187
5.4	Struttura ETA	188
5.4.1	Traffico registrato, modello di accadimento per fasce di traffico e modello di accadimento a seguito di incidente	188
5.4.2	Probabilità di incidente in galleria	193
5.4.3	Alberi preliminari	193
5.4.4	Struttura di dettaglio dell'ETA	196
5.5	Attribuzione del danno	197
5.6	Valori delle affidabilità e delle disponibilità attribuite ai sottosistemi rilevanti	199
5.7	Risultati	200
5.8	Dichiarazione dei limiti di validità	203
5.9	Conclusioni	203
6	La rete stradale come Infrastruttura Critica	205
6.1	La Resilienza	205
6.1.1	Le variabili che determinano la resilienza	207

6.2	La rete stradale come collezione di archi e nodi	210
6.2.1	Resilienza del sistema: una metrica quantificabile dipendente dal tempo.....	210
6.2.2	Le funzioni di prestazione.....	211
6.3	Analisi topologica di una rete	212
6.3.1	Analisi di disponibilità di rete minima a connessione totale: rete più performante.....	214
6.4	Prestazione di un grafo stradale.....	216
7	Linea guida per l'applicazione della procedura di analisi di rischio per le gallerie stradali ex D. Lgs. 264/2006	217
7.1	L'analisi di rischio ex art. 13.....	217
7.2	Il Glossario di cui all'allegato I del D.Lgs. 264/2006	219
7.3	Le Misure di Sicurezza di cui all'Allegato II del D.Lgs. 264/2006	224
7.4	Gli obiettivi di sicurezza e la metodologia di analisi di rischio ex Allegato III del D. Lgs. 264/2006	226
7.5	Proposta del metodo esperto di analisi di rischio quantitativa conforme allo spirito e alla lettera del D. Lgs. 264/2006	230
8	Conclusioni	231
9	Bibliografia.....	233
9.1	Principali norme analizzate	233
9.2	Principali pubblicazioni analizzate	233
	Indice delle figure	241
Allegato 1	Analisi annuari statistici del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco	244
Allegato 2	Analisi delle statistiche Aspi	245
A2.1	Il fattore galleria sull'incidentalità in genere.....	245
Allegato 3	Banca Dati incidenti Commissione Gallerie Stradali presso il	247
A3.1	Premessa	247
A3.2	Consistenza della banca dati	247
A3.3	Prime analisi di consistenza sulla base dati degli incidenti in galleria.....	252
A3.3.1	Definizione del campione di incidenti in galleria classificabili come incidenti stradali tipici	252
A3.3.2	Distribuzione di frequenza campionaria degli incidenti tipici stradali per classi di L e per classi di TGM	252
A3.3.3	Distribuzione di frequenza teorica	253
A3.3.4	Confronto fra i dati reali e le distribuzioni teoriche	254
A3.4	Analisi statistiche di correlazione semplice ed esplorazione di ipotesi di regressione multipla lineare	258
A3.5	Analisi per gravità del sottocampione incendi	260
Allegato 4	Base Dati Gestori	263

A4.1	Premessa	263
A4.2	Identificazione di un sottocampione omogeneo e caratteristiche	263
A4.3	Analisi dell'incidentalità per tratta	265
A4.4	Analisi statistica dei campioni	278
A4.4.1	Analisi degli incidenti lievi	279
A4.4.2	Analisi degli incidenti gravi.....	283
A4.4.3	Analisi degli incendi	287
A4.4.4	Commento ai risultati.....	294

Lo studio propone un'analisi contestuale dei metodi di stima della misura della sicurezza stradale con approccio sistemico relativamente all'infrastruttura di rete TERN (Trans European Road Network), rispettivamente in gallerie di lunghezza superiore a 500 m (ex Direttiva Europea CE/2004/54, recepita in Italia con il D. Lgs. 264/2006) e nelle restanti tratte (ex Direttiva Europea CE/2008/96, recepita in Italia con il D. Lgs. 35/2011). Mentre le due citate norme impongono metodi di misura e strategie di intervento con riferimento al miglioramento della sicurezza degli utenti della strada, la Direttiva CE/2008/114 (recepita in Italia con il D. Lgs. 61/2011) impone l'adozione di *analisi di rischio* con riferimento alla continuità di funzione di collegamento garantita dalla strada in quanto Infrastruttura Critica (europea o nazionale).

I metodi per l'analisi delle prestazioni di sicurezza indicati nelle tre fonti normative sono estremamente differenti, pur richiamando in tutti i casi il concetto di analisi del rischio. Nel caso dell'analisi della sicurezza delle gallerie di rete TERN, il D. Lgs. 264/2006 impone l'adozione di una *Quantitative Risk Analysis*, la cui ambizione modellistica non sembra corrispondere alla qualità delle valutazioni proposte in quasi 15 anni di esperienza applicativa, caratterizzate sia da difetti di stima sistematici che da scarsa informatività; nel caso dell'analisi della sicurezza stradale per le tratte restanti, l'approccio proposto dal D. Lgs. 35/2011 si basa su un metodo di giudizio esperto strutturato di consolidata efficacia; nel caso, infine, della richiesta analisi di continuità della funzione in quanto Infrastruttura Critica, il D. Lgs. 61/2011 non definisce metodi di riferimento applicabili, lasciando alla responsabilità dell'Operatore (Gestore) la scelta della procedura da adottare.

Muovendo da una analisi di dettaglio delle tecniche di analisi di rischio consolidate, lo studio propone un metodo esperto (e cioè basato sull'esperienza disponibile) per l'implementazione di una Quantitative Risk Analysis (QRA) direttamente applicabile alle gallerie stradali, valorizzando le evidenze di migliore pratica ottenibili dal procedimento di giudizio esperto applicato alle tratte non in galleria e previste dal D. Lgs. 35/2011 e dalle Linee Guida del 2 maggio 2012; l'approccio proposto si basa:

- sull'adozione di un criterio di campionamento dell'incidentalità di struttura individuando gruppi di strutture analoghe (per caratteristiche strutturali e di traffico verificate come significativamente correlate al fenomeno incidentale) per l'ottenimento di stime incidentali più robuste,
- sull'adozione sistematica dei concetti e dei metodi di calcolo RAMS (reliability, availability, maintainability, safety) ex UNI EN 61508 per l'analisi della prestazione dei sottosistemi rilevanti,
- sullo sviluppo di modelli dettagliati per l'analisi del flusso del pericolo,

allo scopo di migliorare precisione dei risultati e informatività dell'analisi.

Tale approccio si propone inoltre come adeguato, con opportune modifiche (sostituzione della variabile aleatoria *danno* con la variabile aleatoria *indisponibilità*), a restituire la stima dell'*indisponibilità attesa* di un collegamento stradale origine – destinazione e conforme, pertanto, a candidarsi come metodo utilizzabile per la redazione del Piano di Sicurezza dell'Operatore (Gestore) di Infrastruttura Critica.

L'applicazione del metodo alla galleria Clap Forat della tratta A23 Udine – Tarvisio ha infine consentito di verificare, con riferimento al particolare caso dell'analisi di rischio delle gallerie stradali, la rilevanza della prestazione di disponibilità associata ai sottosistemi condizionanti il flusso del pericolo, tra i quali risulta decisivo il contributo fornito dal sistema di interdizione all'accesso in galleria in caso di incendio o incidente coinvolgente materiale ADR, e l'opportunità di implementare, oltre alle previste misure di mitigazione in caso di incendio, anche le ordinarie misure di prevenzione incidentale utilmente adottate per l'incremento della sicurezza delle strade in genere e per l'incremento della sicurezza stradale secondo il D. Lgs. 35/2011 in particolare.

Executive Summary

Lo studio muove dall'analisi delle norme per la gestione della prestazione di sicurezza e continuità della funzione delle strade TERN (Trans European Road Network), che stabiliscono lo scopo dell'incremento della sicurezza stradale (Direttiva Europea CE/2004/54, recepita in Italia con il D. Lgs. 264/2006 da applicarsi alle gallerie di lunghezza superiore a 500 m; Direttiva Europea CE/2008/96, recepita in Italia con il D. Lgs. 35/2011 da applicarsi al resto delle tratte stradali di rete TERN) e della resilienza funzionale (Direttiva CE/2008/114, recepita in Italia con il D. Lgs. 61/2011 da applicarsi alla generalità delle infrastrutture identificate come Infrastrutture Critiche Europee o Nazionali).

Gli interventi di incremento della prestazione devono, in tutti i casi, essere motivati sulla base di un approccio di analisi utilizzando metodi di valutazione sulla dimensione della sicurezza o del rischio (suo complemento logico). I metodi sono tuttavia diversi, e in particolare:

- Per la valutazione del rischio delle gallerie di lunghezza superiore a 500 m, la procedura di analisi di rischio da applicarsi è definita in un allegato tecnico del D. Lgs. Di riferimento (Allegato III del D. Lgs. 264/2006, cd Decreto Gallerie), applicata da tecnici terzi non ulteriormente qualificati, e con riferimento alla sola quota di rischio incrementale dovuta all'effetto di confinamento dell'ambiente galleria; il metodo si presta in astratto all'applicazione di principi di gestione ALARP (*as low as reasonably practicable*) del rischio;
- Per la analisi di sicurezza delle tratte di rete TERN escluse dall'applicazione del Decreto Gallerie, la procedura di valutazione è indicata nelle Linee Guida del 2 maggio 2012 e prevede analisi, ispezioni e giudizio esperto motivato applicate da tecnici terzi opportunamente formati, adottando i metodi di valutazione di efficacia degli interventi consolidati in decenni di ricerche e principalmente basati sull'analisi dell'incidentalità puntuale e di tratta, e orientate all'ingegnerizzazione delle prevenzioni ulteriori adottabili; il metodo è compatibile con lo scopo strategico di ottenere una ordinalità delle criticità e dei benefici attesi dagli interventi migliorativi, e restituisce la possibilità di una allocazione ottimizzata delle risorse disponibili;
- Per l'analisi di resilienza dei sistemi stradali come Infrastrutture Critiche, la norma impone l'adozione di un Piano di Sicurezza Operatore adottato sulla base di una analisi di rischio non meglio qualificata.

Lo studio muove da una critica sulla qualità dell'applicazione alle gallerie del metodo di Analisi di Rischio Quantitativa (Quantitative Risk Analysis, QRA) per le gallerie, ottenuta dall'analisi delle valutazioni pervenute Alla Commissione Permanente per le Gallerie Stradali presso il CSLLPP (**Capitolo 0**). In particolare la critica evidenzia la sistematica sovrastima del rischio a livello aggregato di comparto ed evidenzia la scarsa informatività delle analisi proposte.

Sulla base di tali evidenze, lo studio individua lo scopo strategico di una armonizzazione dell'approccio di valutazione della sicurezza.

A questo scopo lo studio propone una analisi complessiva delle norme (**Capitolo 1**) e delle tecniche di analisi (**Capitolo 2**), e una analisi della bibliografia disponibile per la qualificazione concettuale e operativa del fenomeno dell'incidentalità stradale (**Capitolo 3**).

Lo studio propone quindi l'analisi di dettaglio dell'approccio RAMS (**Capitolo 4**) direttamente applicato allo scopo della stima dell'indisponibilità del sistema di ventilazione, e infine, sulla scorta di quanto sviluppato, l'applicazione di Analisi di Rischio alla galleria Clap Forat (A23) (**Capitolo 5**).

Il metodo esperto di Analisi di Rischio proposto è direttamente applicabile al caso delle gallerie stradali e armonizzato rispetto all'approccio di analisi e gestione della sicurezza stradale applicata ai sensi delle Linee Guida del 2 maggio 2012. A tale scopo il metodo propone in particolare:

- L'adozione di un metodo di allargamento del campionamento per la qualificazione degli indicatori di incidentalità, con particolare riferimento all'incidentalità stradale tipica e agli incendi di automezzi, allo scopo di migliorare la qualità della stima e prevenire che, in carenza di dati, l'analisi adotti valori di cautela (con l'effetto di sovrastima sistematica del rischio);
- L'adozione sistematica della tassonomia e dei metodi RAMS ex UNI EN 60508 (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) per la qualificazione della prestazione dei sottosistemi rilevanti nel condizionare il flusso del pericolo in caso di incidente;
- L'applicazione di principi di completezza dell'analisi tecnica ad Albero degli Eventi.

Sia il metodo in generale che la sua specifica applicazione al *case study* valorizzano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati di incidentalità riportati negli **Allegati da 1 a 4**.

Il **Capitolo 6** propone gli elementi essenziali ed utili all'inquadramento dell'approccio di QRA al caso dell'analisi del rischio di perdita della funzione, sviluppando i concetti operativi della resilienza funzionale, e indirizzando all'opportuno adattamento del costrutto di analisi di rischio nella declinazione di analisi dell'indisponibilità attesa, così prefigurando un approccio coerente allo scopo della norma che inquadra la strada come Infrastruttura Critica.

Il **Capitolo 7** propone infine, alla luce di quanto in precedenza sviluppato, una lettura critica dell'Allegato 3 del D. Lgs. 264/2006, evidenziando la possibilità di migliore specificazione della tecnica di analisi da applicare al caso delle gallerie.

Seguono, e chiudono lo studio, le conclusioni generali (**Capitolo 8**), ottenute da una sistematica ricognizione delle conclusioni parziali ottenute nelle varie fasi dello studio, che comprendono il sommario dei punti di forza dell'approccio esperto proposto (sia in termini di migliore qualità della stima del rischio che di informatività dell'analisi), sia gli elementi di migliore sinergia metodologica che l'approccio esperto valorizza rispetto agli ambiti applicativi diversi dalle gallerie stradali.

0.1 Progetto e verifica della sicurezza dell'infrastruttura stradale nel quadro normativo europeo

Il tema di dottorato è stato selezionato alla luce della rilevanza tecnica ed etica del tema della sicurezza stradale.

Il sistema stradale fornisce un servizio di cittadinanza essenziale, tanto che la rete TERN è compresa tra le infrastrutture critiche ai sensi della Direttiva 2008/114/CE (recepita in Italia con il D. Lgs. 61/2011). L'incremento della sicurezza degli utenti della strada costituisce uno degli obiettivi strategici dell'Unione Europea. La sicurezza dell'infrastruttura stradale è l'oggetto di due distinte Direttive (CE 2004/54 e CE 2008/96); l'ambito di applicazione della Direttiva CE 2004/54 è costituito dalle gallerie di rete TERN superiori a 500 m, mentre quello di applicazione della Direttiva CE 2008/96 è costituito dalla generalità della rete stradale TERN con l'esplicita esclusione delle gallerie più lunghe di 500 metri. Quindi l'ambito di applicazione dei due decreti costituisce una partizione completa dell'ambito viario TERN.

Le gallerie stradali italiane censite su rete TERN sono più di 700, e circa 500 di queste hanno lunghezza superiore ai 500 m. Le strutture sono state costruite, nella quasi totalità dei casi, a partire dal 1950, con realizzazioni per anno tendenzialmente crescenti nel tempo. Le tecniche di scavo mutate nel tempo, così come la domanda di trasporto progressivamente cresciuta, hanno portato alla definizione di standard costruttivi progressivamente più performanti: ciò indirettamente determina che le prime gallerie realizzate (corrispondenti alle prime tratte autostradali o stradali realizzate nel periodo 1950-1970) presentano le caratteristiche strutturali meno sicure, sia in termini di prevenzione incidentale che in relazione all'evoluzione degli incidenti che in esse dovessero realizzarsi. Considerando il sottogruppo di strutture facenti parte della rete strategica europea TERN (Trans European Roads Network), l'Italia detiene oltre il 50% delle strutture.

Le metodologie per la verifica del livello di sicurezza indicate dalla Direttiva 96 (generalità della rete) sono costituite da valutazioni di giudizio esperto strutturato, mentre quelle indicate dalla Direttiva 54 (ambito galleria di lunghezza maggiore di 500 metri) sono riconducibili alle teorie di analisi del rischio quali / quantitative, senza l'individuazione di un approccio cogente, e come tale può essere adottata ogni metodica di analisi e gestione che garantisca *consistenza, completezza ed efficacia*. Un approccio di metodo corretto e consistente, che proceda attraverso analisi dei pericoli e valutazione delle conseguenze, e riconosca gli ambiti di prevenzione e mitigazione efficaci, può garantire il raggiungimento degli scopi di tutela.

La formulazione delle due Direttive evidenzia quindi una discontinuità nell'approccio adottato per la gestione delle verifiche ed analisi di sicurezza, applicate ad ambiti differenziati, secondo un approccio formale *rationae materiae*.

Un orientamento alla gestione congiunta delle procedure tecniche di progetto e verifica della sicurezza viaria è emerso, nella comunità tecnica, a seguito dell'incidente del 2012 al Tunnel Sierre (Svizzera) che ha causato 28 morti, tra cui 22 bambini. La presenza di un elemento di delimitazione di una piazzola di sosta interna al tunnel, costituito da una muratura ortogonale all'asse di marcia, ha costituito l'elemento di pericolo che ha determinato, a seguito di impatto, l'incidente in questione. Con l'applicazione delle misure di sicurezza previste per la generalità delle strade (ai sensi della corrente Direttiva) la conformazione della delimitazione sarebbe stata rilevata come pericolosa e l'ostacolo sarebbe stato gestito, in termini progettuali, in modo sicuro.

In molta parte della comunità tecnica e scientifica è giudizio consolidato che sarebbe preferibile individuare una gestione coerente dell'approccio alla sicurezza di progetto e di verifica (fino all'esercizio incluso) delle

due “singolarità” attualmente facenti riferimento a diverse Direttive. In particolare, l’obiettivo dovrebbe essere quello di garantire *interventi più rapidi, più sostenibili e pianificati con la massima sicurezza per i lavoratori e gli altri utenti della strada*. L’obiettivo si dovrebbe concretizzare nella raccolta di buone pratiche tra i due settori per la determinazione di un modello congiunto, e più integrato possibile. Questo obiettivo dovrebbe prevedere, per i Paesi che dispongono di entrambe le singolarità, di *approcci pilota*.

Una prima ipotesi orientativa è l’esportazione del modello di RSA (controlli di sicurezza) e RSI (ispezioni di sicurezza), già previsti per la sicurezza stradale, alle gallerie stradali. Tale ipotesi è esplorata nel lavoro presente sia dal punto di vista concettuale che operativo, ed è proposto un approccio di stima dell’incidentalità rilevante per la valutazione del rischio in galleria che integra tali valutazioni alla fine di individuare basi campionarie omogenee da cui estrarre, con approccio semplificato, stime ragionevoli dell’incidentalità a più bassa frequenza attesa.

Il tema è solo marginalmente trattato dal recente intervento normativo comunitario (Direttiva 2019/1936) che, alla premessa 18, evidenzia che *“i tratti della rete stradale contigui a gallerie della rete stradale transeuropea oggetto della direttiva 2004/54/CE presentano un rischio di incidenti particolarmente elevato. Dovrebbero perciò essere introdotte ispezioni di sicurezza stradale congiunte su questi tratti, con il coinvolgimento di rappresentanti delle autorità competenti in materia di strade e gallerie, al fine di migliorare la sicurezza della rete stradale che rientra nella presente direttiva.”*. Resta tuttavia ancora non valorizzato l’approccio sistemico di prevenzione incidentale lato galleria, rispetto al quale la Direttiva CE/2004/54 continua ad essere carente.

0.2 Progetto e verifica della sicurezza dell’infrastruttura stradale nel quadro normativo italiano

L’applicazione della Direttiva 54 all’ordinamento italiano ha visto l’emanazione del D. Lgs. 264/2006 che elegge l’approccio di analisi di rischio quantitativo (assoluto e comparativo) quale metodo di verifica della sicurezza. Se l’articolato del D.Lgs. si propone come sostanziale riproduzione della fonte di diritto comunitario, tuttavia l’Allegato 3 del Decreto formula concetti sostanzialmente originali, dichiarando che *“eventi propri dell’incidentalità stradale, connessi a caratteristiche geometriche dell’infrastruttura e non indotti dallo specifico ambiente galleria, che non comportino per l’utenza rischi aggiuntivi rispetto ai rischi connessi alla circolazione stradale, sono da considerarsi e da fronteggiarsi per la prevenzione nell’ambito della regolamentazione del traffico e della progettazione stradale. Le vittime di questi ultimi incidenti vanno contabilizzate nell’ambito dell’incidentalità stradale.”* [Cfr Allegato 3, punto 1, capoverso 2 del D. Lgs. 264/2006].

Tale formulazione, che apparentemente prende atto della peculiarità dell’ambito di applicazione della norma, introduce una separazione concettuale (tra rischio tipicamente incidentale generale e rischio caratteristico dell’ambiente confinato) che è sostanzialmente fuorviante rispetto alla natura stessa dei pericoli e del loro ambito di genesi e sviluppo. Se infatti in termini di scenari di incidente è possibile identificare, per l’ambiente confinato, peculiarità evidenti, tuttavia va considerato che l’insorgenza della condizione di pericolo presenta ampie ricoperture causali tra ambiente ordinario e ambiente di galleria. Una quota non irrilevante degli incidenti in ambiente stradale (quindi anche in galleria) si generano, infatti, a seguito di urti o tamponamenti riconducibili all’incidentalità stradale tipica, così come la quasi totalità degli incidenti evoluti coinvolgenti materiale ADR hanno origine da incidenti tipici stradali. La previsione dell’Allegato 3 del D. Lgs. 264/2006 costituisce quindi una potenziale sottrazione di possibilità di analisi e quindi di migliore gestione del rischio, esponendo ad inefficienza l’elaborazione del progetto integrato della sicurezza del sistema galleria.

Al contrario, il riconoscimento del completo ambito di genesi del rischio incidentale dell'ambiente galleria - e quindi l'analisi di tutte le sorgenti di pericolo, e cioè dell'intero rischio di struttura - avrebbe consentito di operare la gestione del rischio di struttura con approccio costi – benefici ad un livello di efficienza superiore. Secondariamente, e con approccio sicurezza-dominante, il mantenimento di un approccio unitario alla gestione del rischio di struttura avrebbe consentito ai progettisti / analisti di ricomprendere, tra le varie tecniche di supporto di analisi dei pericoli e dei rischi, anche quelle in uso per l'ambito stradale non confinato, individuate nella Direttiva 2008/96.

0.3 Stato dell'arte nell'applicazione dei metodi strutturati di QRA nel caso italiano

L'applicazione dei principi dell'Analisi di Rischio - obbligatoria ai sensi del Decreto citato – vede rilevanti difficoltà a causa dell'assenza di linea guida applicative e nell'ambito dell'attività svolta sono stati raccolti elementi critici rilevanti sulla qualità delle analisi di rischio oggi disponibili.

In occasione di un seminario di studio che ha avuto luogo nel 2016, in occasione del quale sono stati presentati dati relativi all'attività di monitoraggio condotta dal supporto tecnico alla Commissione Permanente per le Gallerie stradali istituita presso il CSLPP sotto la direzione scientifica dell'Università Sapienza di Roma, è stata restituita una rappresentazione complessiva degli studi di Analisi di Rischio condotti sul parco gallerie.

Tali studi sono stati realizzati nell'interesse dei committenti Gestori da enti terzi. Gli studi, richiesti dal D. Lgs. 264/2006 e condotti in conformità alle previsioni dell'Allegato 3 del Decreto, hanno il principale scopo di misurare il livello di sicurezza di ciascuna struttura e indirizzare il gestore all'applicazione delle misure di sicurezza previste per la classe di appartenenza della struttura, e di verificare, in caso di carenze, la necessità di interventi integrativi per l'ottenimento del livello di sicurezza prescritto.

I risultati ottenuti dalla verifica dei lavori proposti sono sinteticamente rappresentati nella seguente immagine, nella quale sono rappresentate sul piano F-N tutte le funzioni retrocumulate del danno ottenute dall'applicazione della QRA alle singole strutture.

Analisi di rischio pervenute alla Commissione permanente per le Gallerie

Suddivisione degli scenari in base all'Analista del rischio

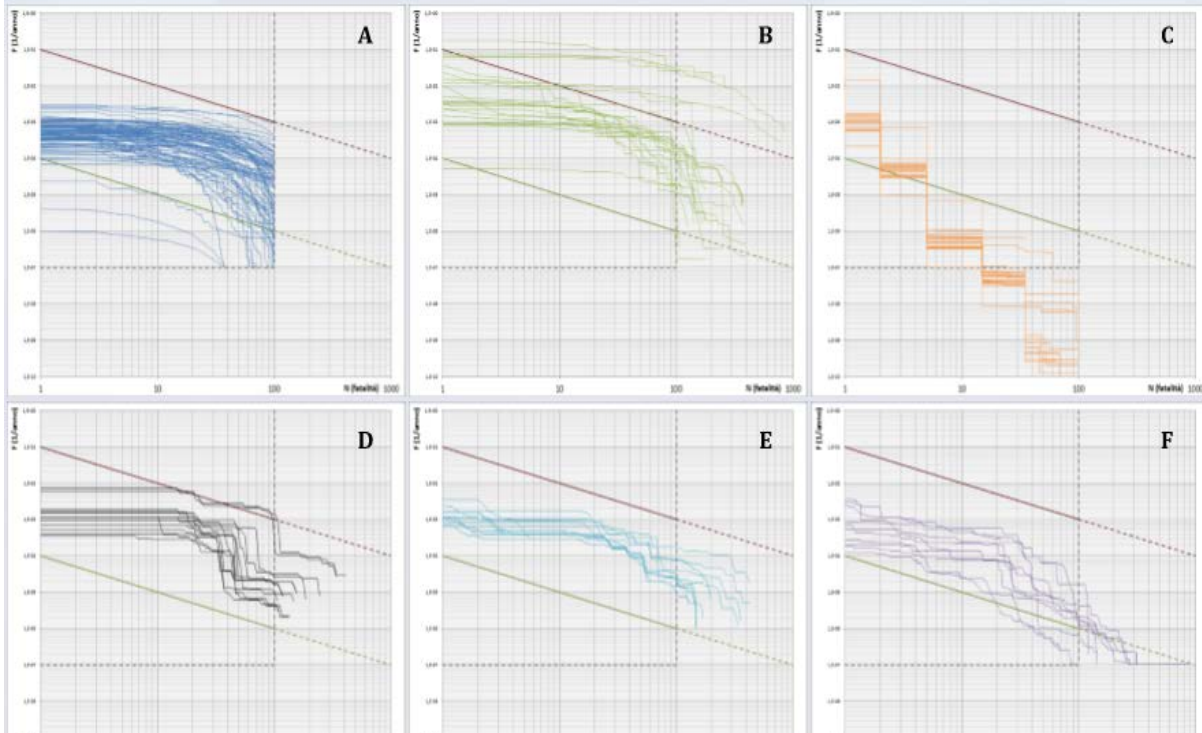


Figura 1: Funzioni F-N prodotte da 6 diversi studi professionali in applicazione del D. Lgs. 264/2006 su gallerie di rete TERN italiane (Ing. Michele de Vito)

La forma delle retrocumulate evidenzia che i costrutti di analisi utilizzati dai vari redattori sono il determinante principale dei risultati ottenuti. In assenza di dati di maggior dettaglio, è infatti comunque evidente che la varianza funzionale tra le FN proposte è, per forma complessiva e collocazione relativa nel sistema di riferimento, in misura dominante tra i gruppi e solo secondariamente all'interno dei gruppi. Ciò evidenzia l'opportunità di approfondire i sottomodelli applicativi della procedura QRA, restituendo qualificati indirizzi di metodo finalizzati a maggiore oggettivazione del processo di analisi.

Il gruppo di supporto tecnico alle attività della Commissione ha inoltre verificato che il Valore Atteso del Danno [annuale] (VAD) associato alle singole strutture (in numero di circa 500) occupa un range di tre ordini di grandezza, da 10^{-2} ad alcune vittime attese per struttura per anno, con una media pari a 0.1 circa.

Il valore complessivo di vittime attese nell'ordinario esercizio dell'intero parco gallerie soggetto a sorveglianza risulterebbe quindi pari a 35 vittime/anno; ciò indica una rilevante sovrastima complessiva del rischio, che rispetto ai dati ricavabili dagli incidenti correnti avvenuti in galleria può essere stimata in circa 2 ordini di grandezza.

La sovrastima delle correnti valutazioni è evidente confrontando la medesima rappresentazione con la retrocumulata ottenibile dai dati di incidenti rilevanti censiti in Italia dal 1980 al 2018.

In questo periodo sulla rete autostradale nazionale sono stati registrati 4 eventi di incidente in galleria con danni maggiori, e in particolare (PIARC, 2018).

Data	galleria	tratta	mezzo incendiato	mezzi coinvolti	Incendio originario	ADR	vittime	feriti
feb-83	Pecorile	A10	1 pesante	10 leggeri	NO	NO	9	22
nov-93	Serra Ripoli	A1	1 pesante	5 pesanti, 11 leggeri	NO	NO	4	4
mar-96	Isola delle femmine	A29	1 pesante	1 bus, 18 leggeri	NO	SI	5	20
mar-99	Monte Bianco	traforo alpino	1 pesante	23 pesanti, 10 leggeri, 1 motoveicolo	SI	NO	39	0

Tabella 1: incidenti con incendio occorsi nelle gallerie delle autostrade italiane nel periodo dal 1/1/1980 al 31/12/2018

Circa la rappresentatività del campione si consideri che:

- Gli eventi collezionati sono certamente tutti quelli accaduti (mentre per eventi con effetto di danno inferiore non è possibile stabilire con certezza la completezza campionaria, in questo caso, per l'ampia eco che tali eventi determinano, si può assumere con certezza che tutto quanto collezionato è corrispondente a tutto quanto effettivamente accaduto);
- Il periodo di osservazione (39 anni) e l'area osservata (l'intero territorio nazionale) sono ampi;
- Gli eventi sono tutti antecedenti all'entrata in vigore delle attuali norme di sicurezza sulle gallerie, e restituiscono quindi la condizione di rischio mediata tra lo status quo e lo status quo ante; è quindi certo che il campione restituisce una fotografia del rischio con indici caratteristici maggiori rispetto a quelli che dovrebbero caratterizzare la condizione adeguata del parco gallerie (cui si riferiscono, di converso, le rappresentazioni sul piano F-N consegnate alla Commissione e in precedenza riportate).

Ciò detto, è possibile normalizzare gli eventi occorsi sul parco di strutture in esercizio negli anni dal 1980 al 2018, attraverso l'utilizzo dei dati AISCAT estratti dalle pubblicazioni del Consorzio e disponibili in rete, e riportati per sintesi nella tabella seguente.

Anno	rete autostradale [Km]	N. Gallerie [-]	Gallerie [Km]	% Km gallerie su rete [-]	Traffico annuo sulla rete	Traffico annuo sulle tratte in galleria
1980	4921	551	723	14,7	29.746.000.000	4.370.145.602
1981	4921	551	723	14,7	30.692.000.000	4.509.127.574
1982	4921	551	723	14,7	31.283.000.000	4.595.954.578
1983	4921	551	723	14,7	32.334.000.000	4.750.362.667
1984	4952	552	724	14,6	34.283.000.000	5.014.254.348
1985	4967	555	728	14,7	36.436.000.000	5.341.935.204
1986	5009	558	732	14,6	39.242.000.000	5.735.924.154
1987	5082	563	739	14,5	42.550.000.000	6.185.038.366
1988	5135	569	747	14,5	46.388.000.000	6.744.450.418
1989	5150	569	747	14,5	49.804.000.000	7.220.019.344
1990	5153	569	747	14,5	51.936.000.000	7.524.709.210
1991	5163	570	748	14,5	53.125.000.000	7.695.569.647
1992	5172	571	749	14,5	55.333.000.000	8.015.505.353
1993	5278	579	760	14,4	56.091.000.000	8.073.678.657
1994	5312	582	764	14,4	58.025.000.000	8.341.596.278
1995	5368	586	769	14,3	59.726.000.000	8.554.953.201
1996	5372	586	769	14,3	60.799.000.000	8.702.161.673
1997	5371	586	769	14,3	63.199.000.000	9.047.357.875
1998	5380	590	774	14,4	65.983.000.000	9.494.473.633
1999	5380	590	774	14,4	68.129.000.000	9.803.267.419
2000	5380	591	775	14,4	70.477.000.000	10.158.315.888
2001	5388	599	786	14,6	73.143.400.000	10.669.485.534
2002	5388	599	786	14,6	75.224.500.000	10.973.057.235
2003	5593	599	786	14,1	77.436.200.000	10.881.075.932
2004	5638	599	786	13,9	79.054.800.000	11.020.835.010
2005	5638	600	787	14,0	80.000.000.000	11.171.221.718
2006	5649	597	783	13,9	82.000.000.000	11.369.855.814
2007	5655	598	785	13,9	83.000.000.000	11.516.985.142
2008	5694	601	789	13,8	83.072.000.000	11.504.440.990
2009	5724	613	834	14,6	82.431.000.000	12.007.506.604
2010	5689	631	844	14,8	83.271.000.000	12.350.647.695
2011	5689	631	844	14,8	82.357.100.000	12.215.099.221
2012	5715	635	854	14,9	76.424.900.000	11.418.598.236
2013	5814	641	863	14,8	75.122.000.000	11.149.094.625
2014	5906	663	874	14,8	75.881.700.000	11.226.030.993
2015	5989	686	881	14,7	79.352.200.000	11.669.363.235
2016	6003	698	897	14,9	82.024.500.000	12.251.618.941
2017	6003	705	891	14,8	83.832.600.000	12.436.504.907
2018	6003	705	891	14,8	84.129.300.000	12.480.520.135

Tabella 2: estesa in km e percorrenze in veicKm della rete autostradale italiana e delle corrispondenti tratte in galleria nel periodo 1/1/1980 – 31/12/2018

Dai dati precedenti è possibile ricavare il numero di gallerie*anno osservate e le caratteristiche di lunghezza e traffico della galleria media corrispondente al campione, come riportato nella tabella seguente.

gallerie*anno osservate	23370
caratteristiche della galleria media	
L [Km]	1,312
Traffico annuo [veicKm]	15.326.947
TGM per corsia	10.498

Tabella 3: gallerie*anno osservate e caratteristiche della galleria media del campione

È quindi possibile, normalizzando i dati relativi agli incidenti occorsi, ricavare la funzione F-N relativa al campione disponibile, ottenendo, con riferimento alla galleria media descritta nella precedente tabella, la probabilità annua di superamento del valore di vittime nel range di valori di danno compresi tra 4.4 e 39 vittime equivalenti.

Sono quindi di seguito riportate la tabella dati e la rappresentazione F-N, completa dei criteri di verifica introdotti dal Decreto 264/2006.

Vittime	$F=f(D>D^*)$
4,4	1,71E-04
7	1,28E-04
11,2	8,56E-05
39	4,28E-05

Tabella 4: valori della funzione F-N ricavata per la galleria media autostradale relativa al periodo di osservazione 1/1/1980 – 31/12/2018

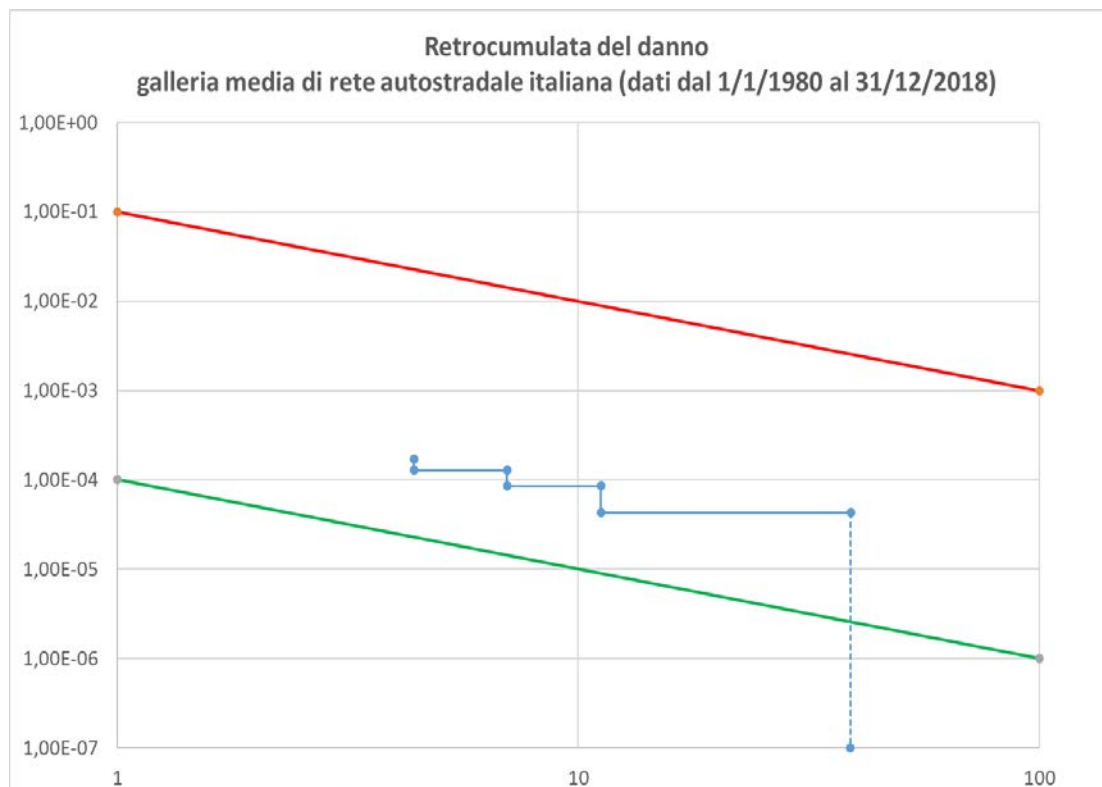


Figura 2: rappresentazione sul piano F-N ex Allegato 3 del D.Lgs. 264/2006 dei valori della funzione F-N ricavata per la galleria media autostradale relativa al periodo di osservazione 1/1/1980 – 31/12/2018

La rappresentazione seguente riporta la funzione dei dati osservati sul medesimo piano di rappresentazione delle funzioni F-N proposte dai Gestori alla Commissione.

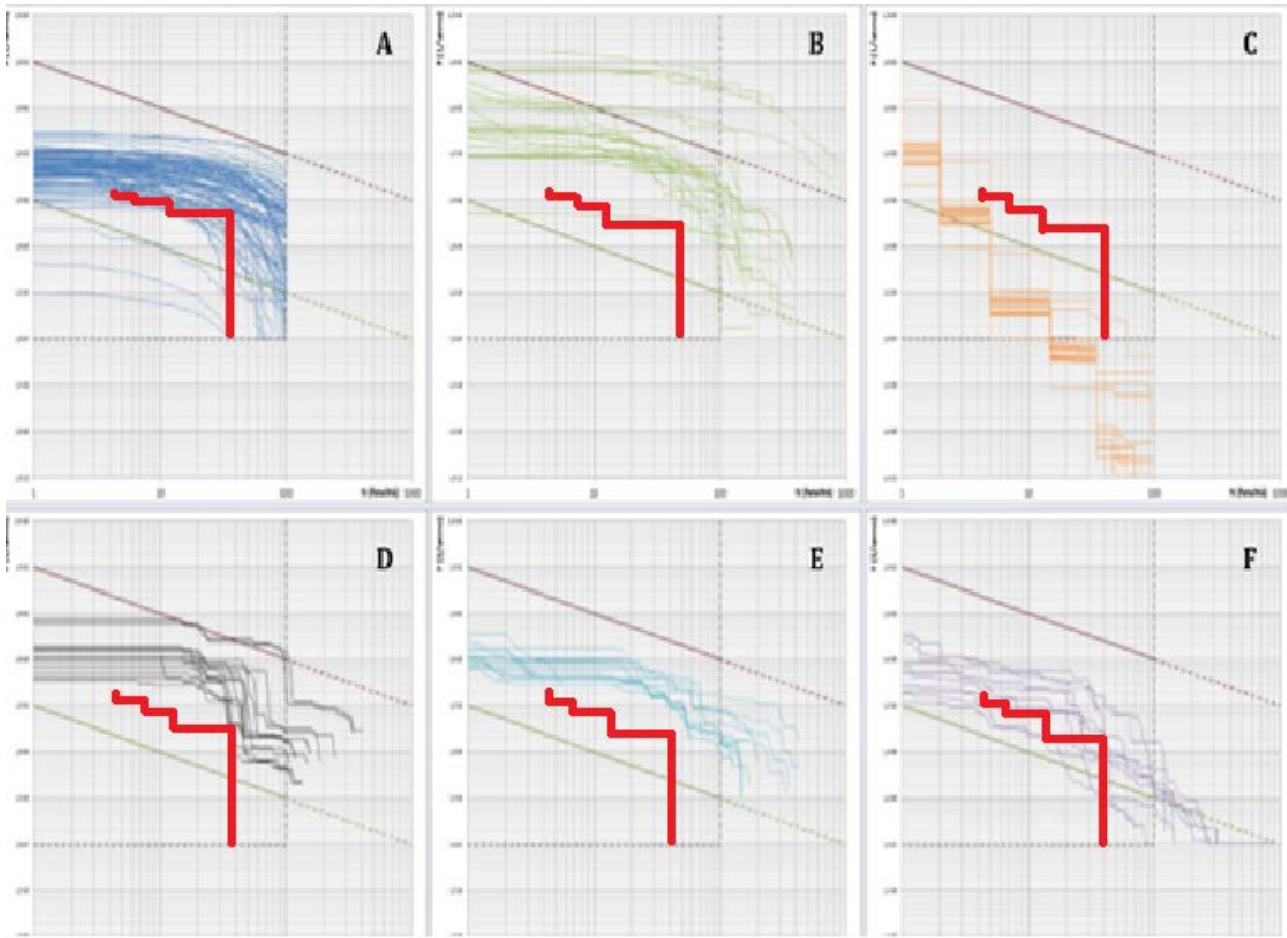


Figura 3: rappresentazione sul piano F-N delle retrocumulate presentate alla Commissione Gallerie Stradali e dei valori della funzione F-N ricavata per la galleria media autostradale relativa al periodo di osservazione 1/1/1980 – 31/12/2018

Dal confronto grafico, e con tutte le limitazioni del caso, si evince la sistematica sovrastima delle rappresentazioni proposte in 4 casi su 6 (casi A, B, D, E). In un caso le retrocumulate proposte si situano tendenzialmente allo stesso livello della retrocumulata campionaria (caso F). In un ulteriore caso le retrocumulate sono sistematicamente posizionate al di sotto della retrocumulata campionaria (caso C).

La sistematica sovrastima del rischio è ancora più evidente ove si consideri che, per quanto detto in relazione agli eventi che determinano l'andamento della funzione campionaria, sarebbe stato logico attendersi che le F-N di calcolo si fossero situate mediamente nella fascia sottostante alla F-N ricavata dai dati di esperienza.

Allo scopo di fornire un quadro di confronto, è infine di seguito riportata la rappresentazione sul piano F-N dei criteri di verifica (non sempre cogenti) utilizzati negli altri Paesi europei che utilizzano la retrocumulata del danno quale indicatore di rischio preferenziale o accessorio nella valutazione di conformità.

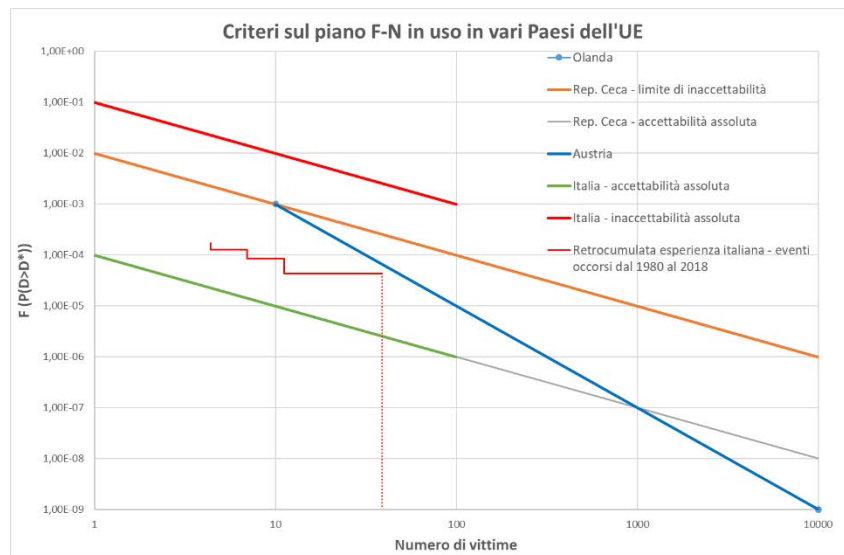


Figura 4: rappresentazione sul piano F-N dei criteri di verifica (non sempre cogenti) utilizzati negli altri Paesi europei

Allo scopo di fornire un utile fattore di scala, sul grafico è riportata la retrocumulata degli eventi occorsi nell'esperienza italiana dal 1980 al 2018.

Attraverso tale rappresentazione risulta evidente che la funzione limite di inaccettabilità adottata in Italia è la meno stringente del gruppo di Paesi selezionati, e che la fascia ALARP è la più ampia. La collocazione della retrocumulata evidenzia inoltre che la performance media della galleria tipo italiana (nel senso descritto in precedenza) sostanzialmente rispetta, con migliore centratura, le funzioni retrocumulate di verifica imposte negli altri Paesi censiti.

* * * * *

Considerato che i valori degli indicatori di rischio delle singole strutture (VAD e funzione retrocumulata del danno sul piano F-N) costituiscono i parametri sulla base dei quali sono valutate e validate le strategie di investimento per l'implementazione della sicurezza delle gallerie esistenti (per le quali sono realizzati e previsti lavori per alcuni miliardi di euro), l'evidenza di una sistematica sovrastima del rischio delle strutture determina (in gran parte ha già determinato) rilevanti effetti distorsivi rispetto alla strategia di investimento ottima. In particolare, la carenza di qualità delle analisi correnti non consente, in generale, di applicare consistenti analisi costi-benefici per la verifica degli interventi di implementazione di sicurezza sull'intero parco gallerie dei gestori, né di verificare l'opportunità di investimenti in sicurezza destinati a singole gallerie, con l'esito di una sostanziale disfunzionalità nell'allocazione degli investimenti di adeguamento.

0.4 Struttura del lavoro

La ricerca dottorale ha lo scopo di proporre una armonizzazione delle metodologie di valutazione della sicurezza, e ha il fine, in particolare, di definire un avanzato metodo quantitativo di valutazione della sicurezza e della continuità della prestazione.

In entrambi gli ambiti applicativi – di galleria e a cielo aperto - la progettazione della sicurezza integrata, che pure oggi si basa su un complesso di norme tecniche cogenti e norme di buona pratica, può essere ottenuta solo a seguito dell'affinamento dei modelli di analisi utilizzati.

La possibilità di migliore coordinamento tra gli approcci di sicurezza e gestione del rischio con riferimento ai due ambiti deve essere supportato, in particolare, dall'implementazione dei modelli di incidentalità (ambito

generatore del pericolo in qualunque condizione) e da metodi di misura della prestazione che restituiscano il livello di sicurezza e di disponibilità di infrastrutture specifiche e tratte stradali.

La QRA è, inoltre, lo strumento più adatto ad essere implementato nel processo di analisi della disponibilità delle reti di trasporto stradale intese come Infrastrutture Critiche (secondo le definizioni proposte nella Direttiva 2008/114/CE). Quanto proposto costituisce quindi il **metodo scalabile, a livello di gestione della rete**, per proporre una coerente analisi di disponibilità e resilienza secondo un approccio conforme alla gestione della funzione di trasporto della rete stradale come **Infrastruttura Critica**.

Nel merito, la QRA dei sistemi complessi si articola in metodi di analisi del pericolo e metodi di analisi della vulnerabilità e del danno. Tali metodi si strutturano nel diagramma a bow-tie sotto riportato.

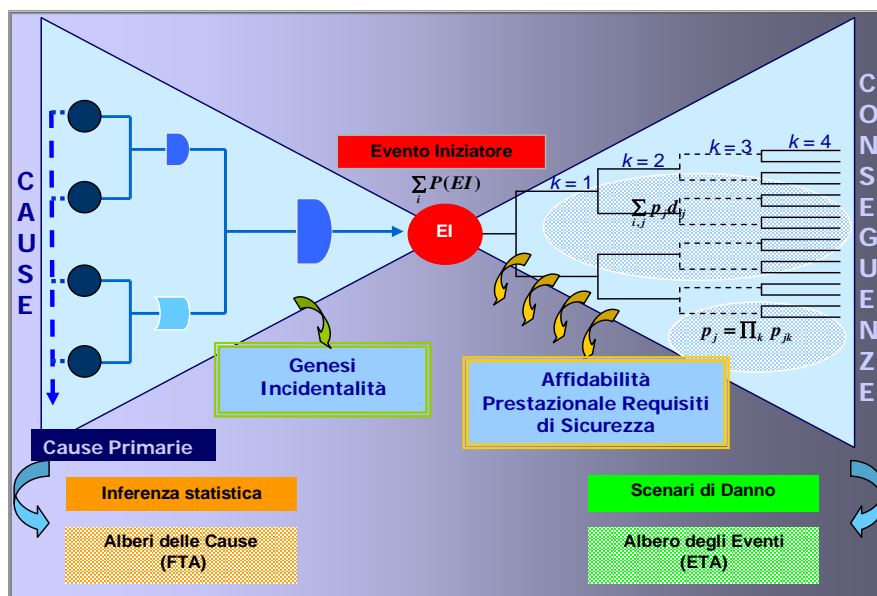


Figura 5: schema bow-tie per l'analisi di rischio quantitativa

Il diagramma vede l'articolazione, nel nodo centrale costituito dall'Evento Iniziatore (o Evento Incidentale, o Top Event), delle due fasi di analisi di genesi del pericolo (Fault Tree Analysis, parte sinistra del diagramma, che costituisce un compositore probabilistico di eventi) e di analisi dell'evoluzione del pericolo (Event Tree Analysis, parte destra del diagramma, che costituisce un partitore probabilistico degli scenari).

L'affinamento del metodo richiede in particolare:

- l'analisi dei pericoli rilevanti caratteristici del sistema, per la definizione del Gruppo Completo degli Eventi Iniziatori;
- la formulazione delle regole di relazione tra i predittori degli Eventi Iniziatori, per ciascun Evento Iniziatore;
- la formulazione delle regole di ripartizione che dall'Evento Iniziatore conducono al Gruppo Completo degli Eventi Conseguenza);
- la determinazione delle modalità integrate (con approccio RAMS e con supporto statistico) per la stima delle probabilità di funzionamento, delle disponibilità, dell'efficienza / efficacia delle funzioni condizionanti il flusso del pericolo;
- la definizione delle modalità di trattamento dei dati di esercizio, per l'individuazione dell'esposizione dei beni esposti (principalmente la vita umana e secondariamente i beni materiali).

Lo scopo di formulare la migliore metodica di analisi e di effettivo trattamento delle informazioni ha indirizzato lo studio verso il conseguimento di target di ricerca specifici riferiti allo scopo strategico dell'implementazione dei sottomodelli di analisi di rischio, e in particolare:

- a. La qualificazione degli indicatori di rischio opportuni attraverso l'analisi di review, nonché la loro caratterizzazione in termini di consistenza e stabilità statistica;
- b. la definizione del metodo di analisi statistica degli incidenti stradali finalizzata alla determinazione delle probabilità di accadimento degli eventi incidentali da utilizzare nello sviluppo della QRA, riconoscendo le informazioni essenziali che dovrebbero essere elaborate (e quindi, a monte, collezionate nelle Banche Dati (BD) incidentali implementate da Gestori e Vigilanti);
- c. la determinazione, ad esito degli output precedenti, di un metodo coerente alle previsioni della IEC 61508 (approccio *RAMS – reliability availability maintainability safety* per i sistemi tecnici) da applicarsi all'analisi delle prestazioni dei sottosistemi tecnici che hanno rilevanza nel condizionare il flusso del pericolo in galleria; tale implementazione è essenziale al fine di riconoscere i caratteri di effettività e completezza nelle valutazioni di rischio.

Il lavoro non propone particolari affinamenti ai sottomodelli di valutazione del danno in relazione ai vari scenari, avendo valutato che, in ragione della progressiva affermazione di programmi simulativi (a partire da FDS + EVAC per la verifica del danno verso esposti in caso di incendio), e della più diretta possibilità di validazione / confutazione delle singole applicazioni, il metodo di QRA complessivamente considerato non abbia in questi specifici aspetti principali vulnerabilità, soprattutto ove l'affidabilità dei risultati ottenuti nell'applicazione di questi strumenti specifici viene confrontata con le altre vulnerabilità proprie della procedura di analisi del rischio.

L'attività di analisi dell'incidentalità è stata condotta sulla Base Dati (BD) o Database (DB) resa disponibile dal soggetto vigilante costituito presso il CSLPP (Commissione Gallerie Stradali) nell'ambito di una collaborazione attivata con la struttura tecnica di supporto alla Commissione permanente delle gallerie stradali presso il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Nell'ambito di tale collaborazione è stato possibile verificare, inoltre, lo stato dell'arte dell'Analisi di Rischio per le gallerie stradali. Per motivi di riservatezza i dati trattati sono presentati in forma aggregata ed anonimizzata. All'analisi del DB in questione è stata affiancata l'analisi di altre base dati utili all'inquadramento di specifici fattori caratterizzanti il fenomeno, sia di libero accesso, che collezionate dai singoli gestori. Tra le altre, la BD di migliore completezza e numerosità, che ha consentito l'applicazione di costrutti esplorativi statistici complessi, è costituita dalla BD incidenti in galleria dei Gestori italiani anni 2006 - 2009. Infine, allo scopo della prima applicazione esemplificativa del metodo di analisi di rischio proposto, è stata elaborata la base dati I.STAT dell'incidentalità georiferita anni 2014 – 2018, che ha consentito di applicare il metodo esperto di ampliamento campionario che costituisce uno dei principali punti di forza del metodo proposto.

L'attività di approfondimento e applicazione sperimentale dei costrutti di progetto e verifica riconducibili alla teoria della Fidatezza (EN 61508, in quanto applicabile, nell'ambito dell'approccio RAMS - Reliability, Availability, Maintainability e Safety) è stata condotta sviluppando le analisi relative a uno specifico impianto, Elettrico – Elettronico Programmabile, costituito da un impianto di ventilazione longitudinale esistente.

Il documento si apre con una analisi sommaria delle norme applicabili al settore e finalizzate all'incremento della sicurezza di sistema, a partire dalle norme comunitarie e fino alle norme nazionali di attuazione. Per quanto riguarda la normativa sulla sicurezza delle gallerie stradali, è stata condotta una preliminare analisi delle norme di recepimento nazionali di altri Paesi considerati rilevanti, anche allo scopo di confrontare la

scelta italiana di introdurre la cogente previsione di redigere una QRA estesa rispetto a soluzioni alternative altrove adottate (Capitolo 1).

Il documento propone quindi un approfondimento sui metodi di Analisi di Rischio Quantitativa (QRA) assumendo il metodo di analisi di rischio quantitativa ex Allegato 3 del D. Lgs. 264/2006 come metodo di riferimento - Quantitative Risk Analysis, QRA, incardinato sul modello concettuale del Bow-tie - (Capitolo 2) e una review orientata sui modelli esistenti di *analisi dell'incidentalità* (Capitolo 3), cui si coordinano, in specifici allegati, i risultati ottenuti dall'applicazione di costrutti statistici ai dati resi disponibili durante lo svolgimento dello studio.

Verificato lo stato dell'arte della ricerca sui temi portanti e funzionali alla definizione di un metodo razionale di QRA, il documento propone una disamina dei concetti RAMS applicabili e dei metodi di calcolo necessari alla determinazione di affidabilità e disponibilità di funzionamento, e una applicazione del metodo ad un caso specifico, costituito da un impianto di ventilazione longitudinale (capitolo 4).

Quanto proposto nei Capitoli 1, 2, 3 e 4 costituisce la premessa logica, concettuale e di calcolo all'applicazione esperta della QRA al caso delle gallerie, della quale è proposta nel Capitolo 5 una specifica applicazione.

La definizione di una procedura esperta e strutturata per la valutazione della pericolosità degli eventi e del rischio dell'infrastruttura, e l'implementazione di metodi di analisi tipici della ricerca operativa applicata ai grafi, consentono inoltre di proporre in via esplorativa elementi finalizzati alla formulazione di una procedura di valutazione della continuità di prestazione di una infrastruttura o di una tratta stradale come Infrastruttura Critica (Capitolo 6).

Sulla base degli approfondimenti di metodo ottenuti, è infine proposta una linea guida alla lettura e all'applicazione tecnica e alla formulazione dell'analisi di rischio ex D. Lgs. 264/2006, orientata alla riduzione degli errori di stima più comuni ai quali la QRA è, in una certa misura inevitabilmente, esposta (Capitolo 7).

Il documento si chiude con un capitolo di generale ricognizione dei risultati ottenuti, e delle prospettive di sviluppo dello studio del tema (Capitolo 8).

1 Normative di riferimento per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali

Il presente capitolo ha lo scopo di descrivere quanto previsto dalla normativa nazionale ed europea in materia di sicurezza delle strade in generale e delle gallerie stradali in particolare. L'ambito normativo relativo alla sicurezza delle gallerie stradali presenta una particolare rilevanza in quanto la successione delle fonti nell'ordinamento italiano ed europeo corrisponde alla presa d'atto della rilevanza del tema della sicurezza stradale, affrontato con approccio tecnico innovativo rispetto al caso delle tratte a cielo aperto, soprattutto a seguito degli eventi incidentali occorsi tra il 1999 e il 2001, che sono avvenuti al culmine di un periodo di progressivo incremento dell'incidenza della mortalità riconducibile a incidenti rilevanti in galleria, come dimostrato dalla statistica di seguito riportata (riferita agli incidenti di maggiore gravità avvenuti nelle gallerie stradali di tutto il mondo).

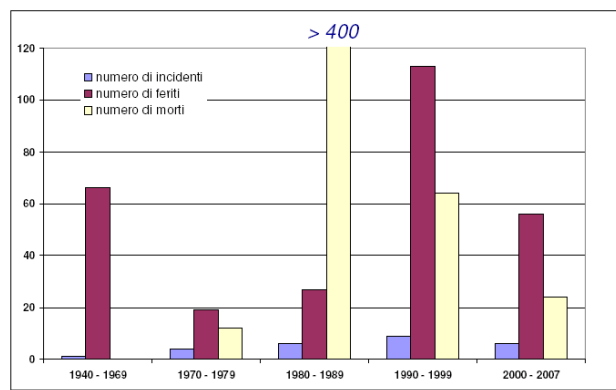


Figura 6: danni conseguenti agli eventi incidentali occorsi in gallerie stradali nel mondo dal 1940 al 2007 (Panzavolta D., 2008)

La Circolare del Ministero dei lavori pubblici n° 7938 del 1999, inerente “la sicurezza della circolazione nelle gallerie stradali con particolare riferimento ai veicoli che trasportano merci pericolose”, costituisce la norma reattiva agli eventi citati, e all'incidente del Monte Bianco in particolare.

La Circolare prevedeva l'adozione di una serie di misure di sicurezza (impianti di spegnimento incendi, colonnine di soccorso in corrispondenza della piazzola di sosta d'emergenza ecc.), e rappresentava il principale riferimento normativo per tutte le gallerie prima dell'emanazione della Direttiva 2004/54/CE. Quest'ultima, recepita nell'ordinamento italiano con il Decreto Legislativo 5 ottobre 2006, n. 264, si applica alle gallerie della Rete Transeuropea di lunghezza superiore a 500 m. La Direttiva stabilisce una serie di requisiti minimi a cui le gallerie devono ottemperare per garantire un livello minimo di sicurezza.

A questi obblighi si aggiungono quelli di prevenzione incendi, previsti dal DPR 151/11 che al punto 80 ha ricompreso tra le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi anche le gallerie di lunghezza superiore a 500 metri.

Per la restante parte della rete, e dal 1° gennaio 2016 per la rete non TERN, è in vigore il Decreto Legislativo 15 marzo 2011 n. 35 di recepimento della Direttiva Europea 2008/96/CE, inerente “la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali”. Inoltre, per le gallerie gestite dall'ANAS il documento “Linea Guida per la progettazione delle gallerie stradali”, descrive le modalità per la progettazione e la messa in sicurezza delle gallerie, in esercizio o da realizzare, in accordo a quanto previsto dalla Direttiva 2004/54/CE. In ogni caso la progettazione delle gallerie deve rispettare le prescrizioni stabilite dal Codice della Strada e del D.M. 05/11/01 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”.

1.1 La Circolare Ministeriale 7938 del 6/12/1999

La prima reazione all'incendio del Monte Bianco si è avuta con l'emanazione della Circolare Ministeriale 7938 del 6/12/1999 Sicurezza della circolazione nelle gallerie stradali con particolare riferimento ai veicoli che trasportano materiali pericolosi, nella quale sono definite misure di maggior dettaglio rispetto al quadro normativo previgente (D. Lgs. 285/1992) per la gestione del rischio relativo al trasporto di merci pericolose. La Circolare imponeva inoltre ai Gestori di procedere ad una descrizione tecnica delle caratteristiche geometriche di ogni galleria inserita nella rete di competenza, nonché degli impianti e dei dispositivi di sicurezza presenti, attraverso la compilazione di una scheda di classificazione articolata in funzione dei livelli di rischio. La Circolare richiama inoltre i Gestori alla responsabilità gestione circa l'ipotesi, in caso di rischio ritenuto inaccettabile, di procedere a limitazioni del traffico e fino all'interdizione per categorie specifiche di mezzi e merci pericolosi. Dal punto di vista tecnico, la Circolare introduce l'obbligo alla verifica delle condizioni geometriche e impiantistiche, e pone l'accento in particolare sulla rilevanza dell'illuminazione e del colore del rivestimento (indicato obbligatoriamente chiaro).

La Circolare introduceva inoltre una serie di requisiti minimi obbligatori previsti per le gallerie con lunghezza superiore a 1000 m in ambito extraurbano e 500 per quelle in ambito urbano (installazione di punti SOS per la chiamata del soccorso dotate di estintori portatili, introduzione di segnaletica luminosa di pericolo, eventuale impianto semaforico di sicurezza). Per le gallerie di lunghezza superiore a 2000 metri era inoltre introdotto l'obbligo di realizzazione di una rete idrati UNI 45.

La Circolare introduceva inoltre alcuni principi gestionali per la razionalizzazione dei centri di controllo, indicando la necessità di adottare un manuale di sicurezza delle strutture completo di procedure di emergenza da attivare in relazione a scenari di incidente di riferimento.

1.2 Il Decreto Ministeriale 5/6/2001

Il Decreto introduce nell'ordinamento, con robustezza di fonte accresciuta, alcune delle indicazioni già fornite con la precedente Circolare, così rendendo tassativi gli obblighi già previsti in quella.

1.3 Il Decreto Ministeriale 5/11/2001

Il DM innova le *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade* e stabilisce quindi i criteri di progettazione per la realizzazione di nuove infrastrutture e per l'adeguamento condizionato delle esistenti.

Per le gallerie di nuova costruzione sono introdotte sezioni trasversali di riferimento che impongono la realizzazione di banchine in continuità alla carreggiata esistente a cielo aperto e adiacente alla struttura. Inoltre, è imposto un limite (derogabile) al 4% della pendenza, e ulteriormente ridotto per le gallerie lunghe. È inoltre introdotto l'obbligo alla realizzazione di piazzole di sosta e collegamenti pedonali verso esterno o verso la canna adiacente (per gallerie monodirezionali).

In particolare, il decreto stabilisce:

- per tutti i tipi di strade, l'altezza libera della galleria misurata a partire da qualsiasi punto della piattaforma non deve essere inferiore a 4,80 metri. In caso di controsoffitto o intradosso piano (gallerie artificiali) o in presenza di apparecchi sospesi il franco libero in corrispondenza della carreggiata non deve essere inferiore a 5,00 metri;
- per le gallerie ricadenti in strade di tipo A, B, D la pendenza longitudinale non deve superare il 4 %, per contenere le emissioni di sostanze inquinanti;

- per le strade a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico (tipo A, B o C) si devono prevedere gallerie a doppio foro [Figura 7-8];
- per le gallerie ricadenti in strade di tipo A o B le carreggiate e le banchine di destra e sinistra devono essere mantenute di dimensioni invariate rispetto all'esterno;
- per le gallerie ricadenti in strade di tipo D deve essere previsto, su ciascuna delle carreggiate e affiancato alle banchine di destra, un marciapiede di larghezza non inferiore a 1,50 metri protetto da dispositivo di ritenuta invalicabile [Figura 9];
- per le gallerie di lunghezza superiore ai 1000 metri devono essere previste delle piazzole di sosta di dimensioni minimi (45 x 3) con interdistanza di 600 metri per ogni senso di marcia;
- per le gallerie a doppio fornice devono essere previsti collegamenti pedonali ogni 300 metri e collegamenti per il passaggio di veicoli di soccorso o di servizio ogni 900 metri;

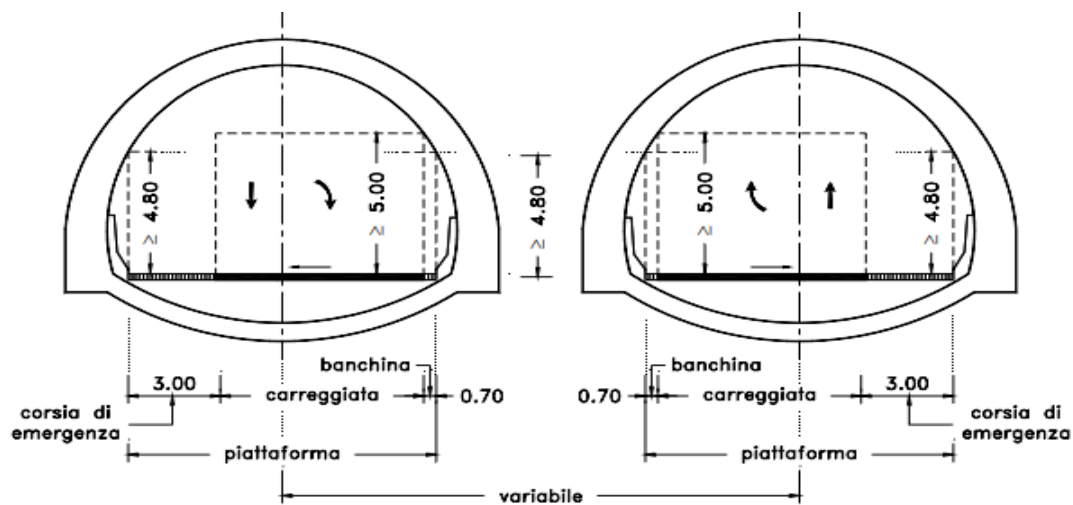


Figura 7: Sezione stradale per le gallerie ricadenti in strade di Tipo A (D.M. 5.11.2001)

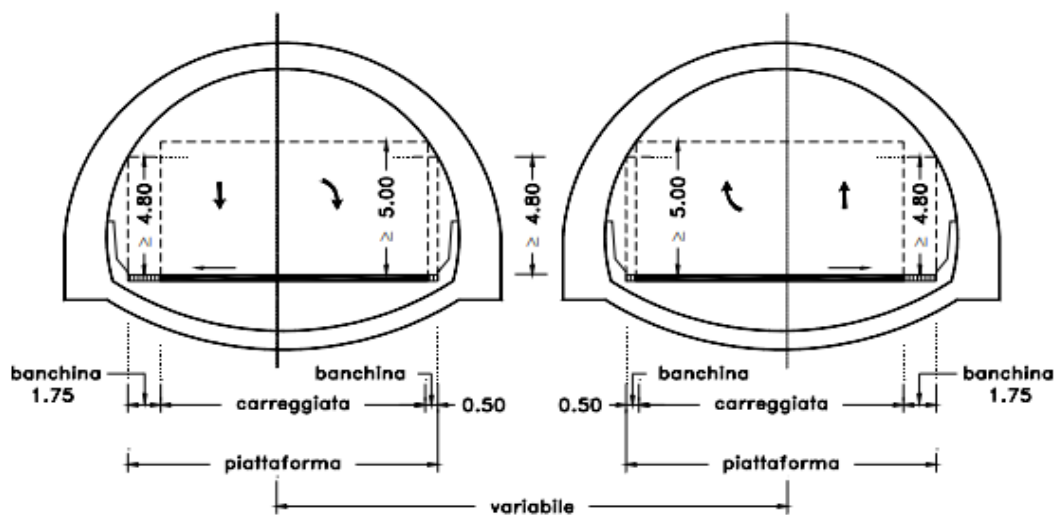


Figura 8: Sezione stradale per le gallerie ricadenti in strade di tipo B (D.M. 5.11.2001)

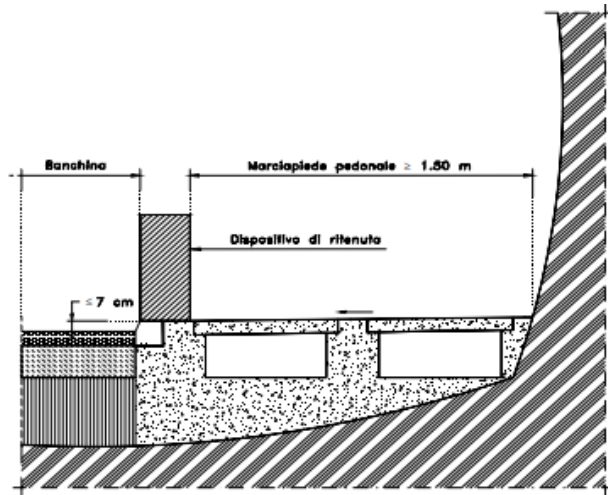


Figura 9: Marciapiede gallerie ricadenti in strade di tipo D (D.M. 5.11.2001)

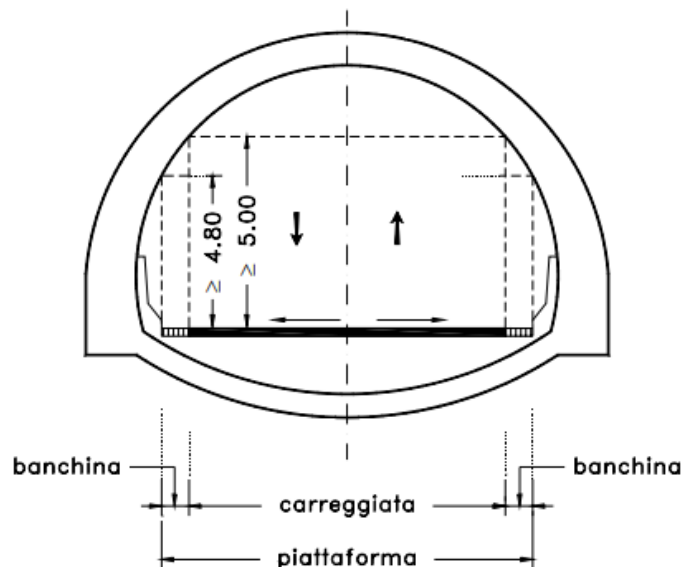


Figura 10: Sezione stradale gallerie ricadenti in strade di tipo C e F (D.M. 5.11.2001)

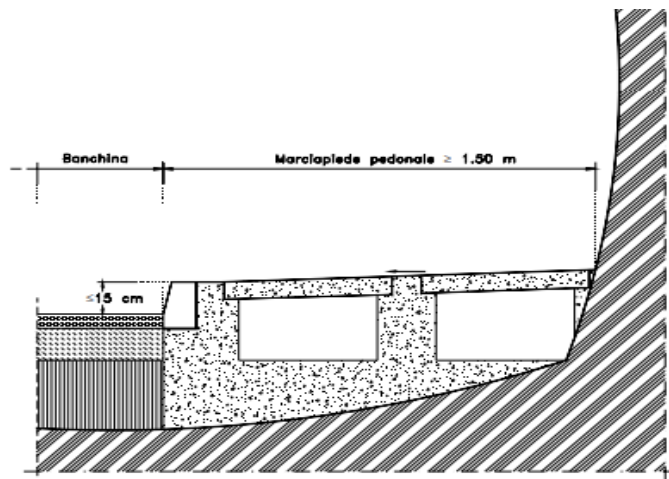


Figura 11: Marciapiede galleria ricadenti strade di tipo E e F (D.M. 5.11.2001)

1.4 Il Decreto Ministeriale 3476 del 14/9/2005

Il Decreto indica le *Norme di illuminazione delle gallerie stradali* e richiama (facendone riferimento cogente) la norma UNI 11095 del 1/2/2003 per la progettazione, la realizzazione e la manutenzione dell'illuminazione delle gallerie. L'aggiornamento della norma UNI del 2003 specifica i requisiti che l'impianto deve garantire al fine di assicurare al conducente del veicolo, in qualunque condizione prevedibile, il transito in galleria alla velocità illuminotecnica di progetto con un grado di sicurezza e comfort non inferiore a quelli dei corrispondenti ai tratti di strada all'aperto. L'applicazione della norma UNI è generalmente richiesta anche per le gallerie esistenti, accettando la rispondenza agli scopi per le sole gallerie nelle quali fosse stato dimensionato e installato l'impianto di illuminazione ai sensi della CEI 88/90.

Il Decreto 3476 individua anche criteri di progettazione, installazione e manutenzione che devono essere tenuti in conto per l'ottenimento di un impianto efficace ed efficiente. In particolare, individua gli scopi strategici di:

- affidabilità di funzionamento;
- durabilità di componenti e sistema;
- ottimizzazione delle modalità, dei tempi e dei costi di installazione, gestione e manutenzione, anche attraverso la progettazione dimensionata sul parametro di decadimento dell'efficienza degli apparecchi di illuminazione (fattore di manutenzione);
- sinergica integrazione dell'impianto di illuminazione con altri eventuali sistemi di sicurezza, allo scopo di evitare conflitti gestionali a svantaggio della disponibilità funzionale.

1.5 Circolare ANAS 33 del 2005

La Circolare, che rileva in quanto Anas è il principale gestore stradale italiano, recepisce in forma anticipatoria le indicazioni della Direttiva Europea 2004/54/CE (nell'attesa del recepimento con norma nazionale, che sarebbe avvenuto solo un anno più tardi col D. Lgs. 264/2006).

L'Anas interviene così ad aggiornare le sezioni tipo delle gallerie da realizzare, individuando sezioni allestite come quella sotto riportata.

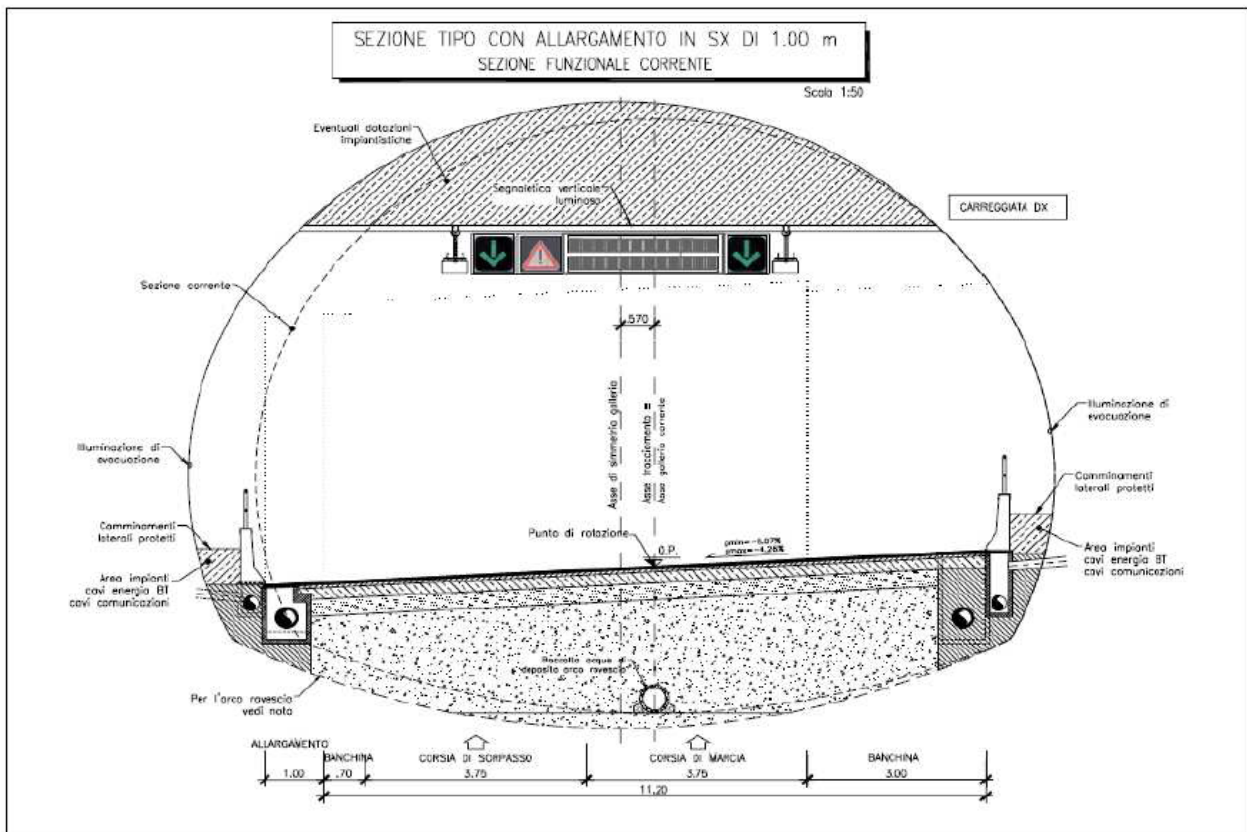


Figura 12: sezione tipo della galleria monodirezionale di categoria A con allargamento in curva

1.6 Direttiva 2004/54/CE

La Direttiva, finalizzata alla definizione dei *Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea*, costituisce il caposaldo normativo comunitario che definisce, a seguito dei gravi incidenti avvenuti tra il 1999 e il 2002, il quadro di riferimento nella gestione della sicurezza delle gallerie europee di rete TERN (definita alla sezione 2 dell'allegato I della decisione n. 1692/96/CE) di lunghezza superiore a 500 m, e ha l'obiettivo di garantire "un livello minimo di sicurezza agli utenti della strada, mediante la progettazione e l'adozione di misure di prevenzione atte alla riduzione di situazioni critiche che possono mettere a repentaglio la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria, nonché mediante misure di protezione in caso di incidente" (ex art. 2 della citata Direttiva). Adottata sulla base della principale iniziativa dei Paesi europei caratterizzati da maggiore presenza di gallerie (Austria, Francia, Germania, Italia e Svizzera - cfr. punto (5) delle Premesse al testo), introduce, tra gli altri, l'innovativo principio dell'autosoccorso come misura di protezione tipica per questo tipo di strutture (cfr. punto 11 delle Premesse).

La Direttiva, che contenente 19 articoli e 3 Allegati, espone gli obiettivi di sicurezza da perseguire e classifica la pericolosità preliminare delle gallerie sulla base di parametri essenziali costituiti dalla configurazione della struttura, dalle variabili di esposizione (AADT, o TGM per corsia, e lunghezza) e di composizione del traffico (percentuale di veicoli pesanti).

Le figure destinarie di obblighi e responsabilità nella gestione della sicurezza di una galleria stradale sono:

- Autorità amministrative;
- Gestore della galleria;
- Responsabile della sicurezza;
- Ente ispettivo.

Le Autorità amministrative sono nominate dagli Stati membri e hanno la responsabilità generale per tutti gli aspetti relativi alla sicurezza di una galleria, prendendo le disposizioni necessarie per garantire l'osservanza della Direttiva. L'autorità amministrativa può essere istituita a livello nazionale, regionale o locale (Art. 4).

Per ciascuna galleria situata sul territorio di uno Stato membro, che si trovi nella fase di progettazione, di costruzione o di funzionamento, l'Autorità amministrativa identifica, quale gestore della galleria, l'organismo pubblico o privato che sia, responsabile della gestione della galleria nella fase interessata. Questa funzione può essere esercitata dalla stessa Autorità amministrativa. Per ogni galleria situata sul territorio di due Stati membri, le due Autorità amministrative corrispondenti, o quella comune, riconoscono un solo organismo responsabile del funzionamento del tunnel (Art. 5).

Per ciascuna galleria, il gestore designa un responsabile della sicurezza, che deve essere preventivamente accettato dall'Autorità amministrativa, e che coordina tutte le misure di prevenzione e di salvaguardia dirette a garantire la sicurezza degli utenti e del personale di esercizio. Il Responsabile ha piena responsabilità ed autonomia nell'affrontare tutte le questioni attinenti alla sicurezza nelle gallerie stradali e, riguardo tali questioni. Il Responsabile può assolvere le sue mansioni per più infrastrutture in una determinata regione (Art. 6).

Gli Stati membri garantiscono che le ispezioni, le valutazioni ed i collaudi vengano effettuati da Enti per le ispezioni. Questa funzione può anche essere esercitata dall'Autorità amministrativa. Ogni Ente deve possedere un alto livello di competenza e disporre di procedure di qualità elevata, e deve essere funzionalmente indipendente dal Gestore della galleria (Art. 7).

La Direttiva individua nell'Analisi di rischio lo strumento analitico che indirizza le scelte delle figure responsabili della sicurezza nelle gallerie stradali. In particolare, il c. 1 dell'art. 13 stabilisce che *"l'analisi dei rischi viene effettuata, se necessario, da un organismo funzionalmente indipendente dal gestore della galleria. Il contenuto e i risultati delle analisi dei rischi sono inseriti nella documentazione di sicurezza trasmessa all'autorità amministrativa. L'analisi di cui trattasi è un'analisi dei rischi di una galleria determinata che tiene conto di tutti gli elementi inerenti alle sue caratteristiche progettuali e delle condizioni del traffico che incidono sulla sicurezza, e segnatamente le caratteristiche ed il tipo di traffico, la lunghezza e la geometria della galleria, nonché il numero previsto di veicoli pesanti in transito giornaliero."*

Il contenuto e i risultati delle analisi dei rischi sono inseriti nella documentazione di sicurezza trasmessa all'Autorità amministrativa.

La Direttiva stabilisce che è compito degli Stati membri provvedere affinché, a livello nazionale, sia utilizzata una metodologia analitica ben definita e corrispondente alle migliori pratiche disponibili.

L'Allegato I della Direttiva individua i parametri rilevanti per la classificazione della pericolosità della struttura, e individua i requisiti minimi obbligatori previsti per l'ottenimento del livello di sicurezza accettabile.

Il superamento di valori limiti di alcuni dei parametri rilevanti per la sicurezza determina la necessità di adottare specifici requisiti e, generalmente, procedere a valutazioni più approfondite attraverso lo sviluppo di analisi di rischio specifiche. Alcuni dei parametri e dei corrispondenti valori limite (superati i quali si determinano condizioni di maggiore pericolosità) sono:

- percentuale di pesanti: 15%;
- pendenza longitudinale: 3%; viene inoltre stabilito il limite massimo di pendenza longitudinale per i nuovi tunnel, individuato nel 5%;
- TGM per corsia: 10000 veicoli giorno;
- TGM per corsia che determina l'obbligatorietà delle uscite di sicurezza verso esterno: 2000 veicoli giorno;

- Presenza o meno di traffico pesante di merci pericolose, in relazione alla quale caratteristica deve essere realizzato un impianto di drenaggio sifonato.

I requisiti minimi sono riportati nelle tabelle di seguito riprodotte.

SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI			Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni
			500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3000m	>3000m	
Misure strutturali	2 o più fornici	§2.1						Obbligatorio se le previsioni su 15 anni indicano traffico > 10000 veicoli/corsia
	Dislivelli ≤ 5 %	§2.2	*	*	*	*	*	Obbligatorio a meno che non sia geograficamente possibile
	Banchine pedonabili di emergenza	§2.3.1 §2.3.2	*	*	*	*	*	Obbligatorio se non esiste una corsia di emergenza, a meno che sia rispettata la condizione di cui al punto 2.3.1. Nelle gallerie esistenti sprovviste sia di corsie di emergenza sia di banchine pedonabili di emergenza devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzate
	Uscite di emergenza almeno ogni 500 m	§2.3.3 §2.3.9	○	○	*	*	*	La creazione di uscite di emergenza nelle gallerie esistenti deve essere valutata caso per caso
	Gallerie trasversali per i servizi di pronto intervento almeno ogni 1500 m	§2.4.1	○	○ / ●	○	○ / ●	●	Obbligatorio nelle gallerie a doppio fornice di lunghezza superiore a 1500 m
	Punti di attraversamento dello spartitraffico al di fuori di ciascun portale	§2.4.2	●	●	●	●	●	Obbligatorio al di fuori delle gallerie a due o più fornici ovunque sia geograficamente possibile
	Piazzole di sosta almeno ogni 1000 m	§2.5	○	○	○	○ / ●	○ / ●	Obbligatorio nelle nuove gallerie bidirezionali > 1500 m. sprovviste di corsie di emergenza. Nelle gallerie bidirezionali esistenti > 1500 m in funzione dell'analisi della situazione. Per le gallerie nuove ed esistenti, in funzione della larghezza supplementare utilizzabile della galleria
	Drenaggio di liquidi infiammabili e tossici	§2.6	*	*	*	*	*	Obbligatorio se è autorizzato il trasporto di merci pericolose
Caratteristiche ignifughe delle strutture	§2.7	●	●	●	●	●	Obbligatorio se un eventuale cedimento locale può avere conseguenze catastrofiche	

Figura 13: Requisiti minimi strutturali ex Allegato I della Direttiva 2004/54/CE

SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI			Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni
			500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3000m	>3000m	
Illuminazione	Illuminazione ordinaria	§2.8.1	●	●	●	●	●	
	Illuminazione di sicurezza	§2.8.2	●	●	●	●	●	
	Illuminazione di evacuazione	§2.8.3	●	●	●	●	●	
Ventilazione	Ventilazione meccanica	§2.9	○	○	○	●	●	
	Disposizioni speciali per la ventilazione (semi) trasversale	§2.9.5	○	○	○	○	●	Obbligatorio nelle gallerie bidirezionali dove esiste un centro di controllo
Stazioni di emergenza	Almeno ogni 150 m	§2.10	●	●	●	●	●	Munite di telefono e di 2 estintori. È consentito un intervallo massimo di 250 m nelle gallerie esistenti
Erogazione idrica	Almeno ogni 250 m	§2.11	●	●	●	●	●	Se non è prevista, è obbligatorio assicurare in altro modo una sufficiente erogazione idrica
Segnaletica stradale		§2.12	●	●	●	●	●	Per tutti gli impianti di sicurezza previsti per gli utenti della galleria (cfr. allegato III)
Centro di controllo		§2.13	○	○	○	○	●	La sorveglianza di diverse gallerie può essere accentrata in un unico centro di controllo
	Telecamere	§2.14	●	●	●	●	●	Obbligatorio se esiste un centro di controllo
Impianti di sorveglianza	Rilevamento automatico degli incidenti e/o degli incendi	§2.14	●	●	●	●	●	Almeno uno dei due sistemi è obbligatorio nelle gallerie dove esiste un centro di controllo
Impianto per chiudere la galleria	Semafori prima degli ingressi	§2.15.1	○	●	○	●	●	
	Semafori all'interno della galleria almeno ogni 1000 m	§2.15.2	○	○	○	○	●	Raccomandato se esiste un centro di controllo e se la lunghezza è superiore a 3000 m

Figura 14: Requisiti minimi impiantistici e gestionali ex Allegato I della Direttiva 2004/54/CE

Per le gallerie esistenti, con caratteristiche tali da non consentire una completa adesione alle prescrizioni della Direttiva o per quelle che presentano delle particolarità nei parametri di sicurezza (le cosiddette gallerie speciali), è consentito adottare misure di sicurezza alternative e supplementari, purché queste si traducano

in una protezione equivalente o comunque accresciuta (art. 3). L'efficacia di tali provvedimenti deve essere dimostrata mediante un'analisi dei rischi. La Direttiva Europea non definisce alcune metodologie di analisi di rischio rimandando tale onere alle leggi di recepimento; la previsione impone comunque l'adozione di un approccio sistemico per la verifica del livello di sicurezza delle strutture esistenti e per la progettazione delle gallerie di nuova costruzione.

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.

L'Allegato III definisce la segnaletica, unica a livello europeo e conforme, da utilizzarsi nelle gallerie degli Stati membri.

1.7 Decreto Legislativo n. 264 del 5 ottobre 2006

Il Decreto reca l'attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea, mantenendone invariato il campo di applicazione, sia con riferimento alle strutture allo stato di progetto che a quelle in fase di costruzione o già in esercizio.

La norma individua misure afferenti a due ambiti tra loro strettamente connessi e che concorrono alla riduzione del rischio:

- ambito impiantistico/strutturale, con l'individuazione di requisiti minimi che la specifica galleria deve possedere;
- ambito gestionale, con l'individuazione delle modalità organizzativo-gestionali determinanti nella fase di gestione dell'emergenza.

Le prestazioni impiantistiche e le caratteristiche strutturali determinano effetti sia in termini di prevenzione che in fase di emergenza, mentre le misure gestionali sono dirette ad assicurare il funzionamento atteso del sistema in fase di emergenza allo scopo della più efficace riduzione del danno.

In merito alle figure per la sicurezza, il D. Lgs. 264/2006 individua la figura del Gestore in ANAS per le strade a gestione diretta, mentre, per quelle affidate in concessione, il Gestore è il Concessionario (Art.1 e Art.5). L'Autorità Amministrativa è individuata nella *Commissione Permanente per le Gallerie Stradali* (di seguito anche Commissione), istituita presso il CSLPP.

La Commissione in particolare:

- provvede alla messa in servizio delle gallerie non aperte al traffico;
- individua le gallerie con caratteristiche speciali;
- valuta gli aggiornamenti e le nuove proposte di Analisi del Rischio;
- sospende o limita l'esercizio di una galleria;
- approva i progetti della sicurezza;
- effettua le ispezioni, le valutazioni e le verifiche funzionali;

Il Gestore è direttamente responsabile di tutti gli aspetti legati alla sicurezza, e in particolare:

- effettua su base periodica prove, verifiche funzionali e controlli, comprese le esercitazioni;
- rende operativi i Piani di gestione dell'emergenza;
- garantisce la sorveglianza e l'intervento gestionale per la messa in sicurezza della galleria attraverso l'applicazione delle procedure previste in caso di incidente sotto il coordinamento di un centro di controllo;

- attua gli interventi previsti dall'analisi di rischio, compresa l'introduzione di limitazione della velocità di esercizio e campagne di informazione.

L'Allegato 2 del Decreto 264/2006 riporta l'elenco puntuale dei requisiti minimi di sicurezza che devono essere adottati nelle specifiche strutture in relazione alla classe di gallerie d'appartenenza, differenziate in funzione della lunghezza e del traffico in transito. I requisiti minimi riguardano sia l'aspetto infrastrutturale (numero di fornici, pendenza longitudinale, larghezza delle corsie, uscite d'emergenza...) che l'aspetto impiantistico (illuminazione, ventilazione, impianti antincendio, impianti di sorveglianza...). Le deroghe all'applicazione dei requisiti minimi prescritti sono ammesse previa valutazione della Commissione Permanente, che valuta e delibera sulle misure compensative proposte dai Gestori, fermo restando il principio di sicurezza equivalente da dimostrarsi con gli strumenti dell'analisi di rischio (ex art.13).

Tale procedura ha anche l'effetto di favorire l'installazione di equipaggiamenti innovativi e l'utilizzo di nuove procedure di sicurezza.

Il D. Lgs. 264/2006 dispone che le misure di sicurezza da realizzarsi in una galleria siano necessariamente fondate su considerazioni integrate: questo significa che esse dovranno esaminare tutti gli aspetti del sistema galleria, dall'infrastruttura, all'esercizio, agli utenti e, non da ultimo, ai veicoli.

L'Allegato 3 del Decreto indica la procedura da adottare per l'applicazione della valutazione di rischio ai sensi dell'art. 13. L'analisi di rischio richiesta è di tipo quantitativo.

L'analisi di rischio ha come obiettivo quello di ottenere una misura quantitativa del livello di rischio associato ad una galleria stradale in termini di opportuni indicatori quantitativi. Come riportato nell'Allegato III del Decreto, l'analisi si riferisce esclusivamente agli eventi considerati critici nello specifico ambiente confinato delle gallerie, ovvero incendi, collisioni con incendio, sversamenti di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e nocive. Non rientrano quindi nella valutazione del rischio gli incidenti stradali ordinari. In particolare, il Dlgs 264/2006 riporta che *"Eventi propri dell'incidentalità stradale, connessi a caratteristiche geometriche dell'infrastruttura e non indotti dallo specifico ambiente galleria, che non comportino per l'utenza rischi aggiuntivi rispetto a quelli connessi alla circolazione stradale, sono da considerarsi e fronteggiarsi per la prevenzione nell'ambito della regolamentazione del traffico e della progettazione stradale. Le vittime di questi incidenti vanno contabilizzate nell'ambito dell'incidentalità stradale"* (Allegato 3, § 1, secondo capoverso). L'analisi deve essere effettuata da un soggetto terzo o comunque funzionalmente indipendente dall'Ente gestore della galleria, nei casi e secondo le modalità previste dal Decreto.

L'analisi deve dimostrare che le misure di sicurezza, siano esse alternative o integrative, realizzino un livello di protezione equivalente o accresciuto rispetto a quelle previste dall'Allegato 2 del D. Lgs. 264/2006 (Requisiti minimi) nel quale sono individuate classi di strutture omogenee per le quali, in funzione delle variabili di esposizione, è necessario adottare misure specificate; le valutazioni di sicurezza si riferiscono in particolare alla tutela degli utenti, del personale addetto e dei servizi di soccorso (Art. 13, comma 3).

Il metodo di Analisi dei Rischi da adottare è chiaramente individuato nella tecnica QRA (Quantitative Risk Analysis) strutturata nella forma del Bow-Tie Model. La metodologia di analisi così individuata si avvale di strumenti logici come la Fault Tree Analysis (FTA) e l'Event Tree Analysis (ETA) (cfr. Allegato 3, § 3).

I risultati dell'analisi vengono utilizzati per il calcolo di diversi indicatori di quantitativi del rischio (cfr. Allegato 3, § 4):

- **valore atteso del danno di struttura**, ottenuto come somma dei rischi totali calcolati in corrispondenza di ciascun singolo evento iniziatore; il rischio totale corrispondente allo specifico albero è ottenuto attraverso la sommatoria dei prodotti delle probabilità di fine ramo e dei danni corrispondenti al singolo scenario;

- **rischio sociale, corrispondente alla distribuzione della probabilità di superamento di un determinato livello di danno**, rappresentato graficamente sul piano F-N (dove F indica la probabilità di superamento di una soglia di danno e N il numero di fatalità).

Il § 4 dell'Allegato 3 del Decreto, individua "gli obiettivi di sicurezza ed i criteri di accettabilità del rischio per le gallerie stradali [...] rappresentati dalle linee soglia riportate nella figura seguente."

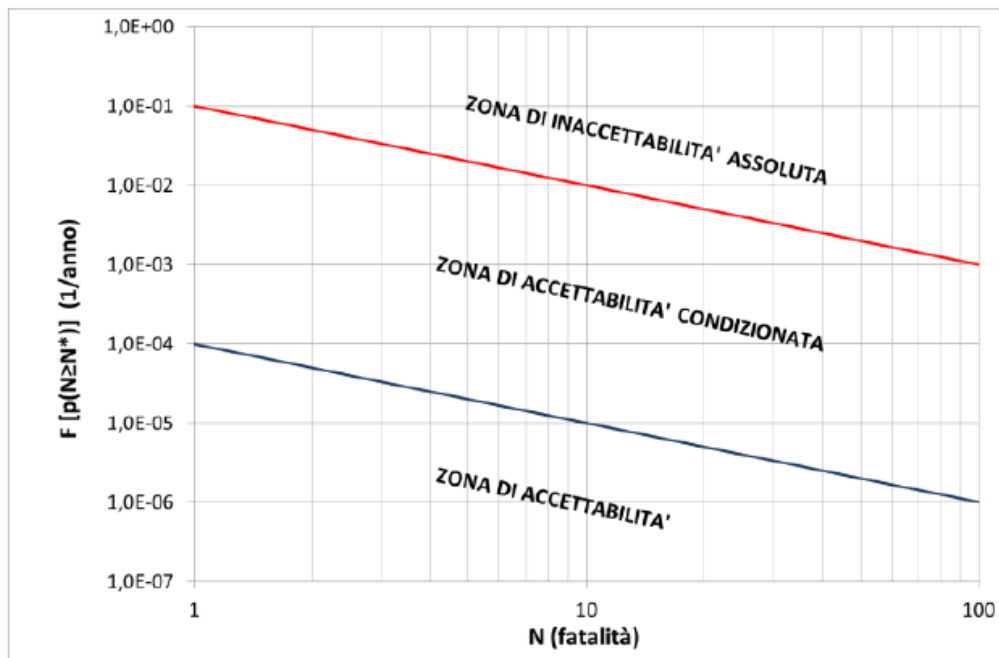


Figura 15: Criteri di verifica sul piano F-N – D. Lgs. 264/2006

La figura precedente rappresenta il piano F-N e riporta limite di accettabilità e limite tollerabilità rispetto ai quali la rappresentazione retrocumulata del rischio di struttura deve verificare il criterio di compliance.

In tutti i casi previsti dal Decreto, incluso il caso in cui si debba verificare il livello di rischio di una galleria con caratteristiche speciali, si deve direttamente confrontare la distribuzione cumulata complementare della galleria reale con il limite di rischio tollerabile. Quando viene richiesta l'analisi di rischio quantitativa con criterio comparativo per la dimostrazione dell'equivalenza garantita da misure compensative, tale analisi deve essere condotta sulla galleria reale dotata di requisiti integrativi verificando che il valore atteso del danno della galleria in esame sia uguale o inferiore a quello della galleria virtuale a parità di condizioni di funzionamento dei sottosistemi, dove la galleria virtuale è struttura caratterizzata dai medesimi parametri di sicurezza della galleria in esame e in possesso di tutti i requisiti minimi obbligatori (Glossario, Allegato I).

L'Allegato 4 del Decreto individua la procedura formale per l'approvazione del progetto, i contenuti della documentazione di sicurezza, la procedura per la messa in esercizio e le previsioni obbligatorie circa le esercitazioni periodiche.

Tra i metodi in uso in Italia, l'IRAM (Italian Risk Analysis Method) è menzionato come riferimento da PIARC (2013). Il metodo è, in termini qualitativi, sostanzialmente corrispondente alle previsioni di legge.

1.8 Coordinamento tra le previsioni del D. Lgs. 264/2006 e il Decreto Ministeriale 5/11/2001: l'intervento di armonizzazione del DL 24/1/2012 n. 1

È utile osservare che i due decreti sopra citati presentano degli elementi di disaccordo che riguardano:

- distanze delle uscite di sicurezza: il Dlgs 264/2006 prevede un interdistanza tra le uscite di sicurezza non superiore a 500 metri, mentre il Decreto 5.11.2001 prescrive la realizzazione, per le gallerie di nuova costruzione, di collegamenti pedonali ad un interdistanza di 300 metri;
- distanza accessi carrabili: mentre il Dlgs 264/2006 richiede come requisito minimo una interdistanza tra gli accessi carrabili non superiore a 1500 metri, il Decreto 5.11.2001 prescrive la realizzazione di collegamenti carrabili ad un interdistanza di 900 metri;
- distanze della piazzola di sosta: il Dlgs 264/2006 richiede la realizzazione di piazzole di sosta ad un interdistanza di 600 metri per le gallerie con lunghezza superiore a 1000 metri per ogni senso di marcia, mentre il Dlgs 264/2006 prescrive la realizzazione di piazzole di sosta per le sole gallerie bidirezionali con lunghezza superiore a 1500 metri e un volume di traffico superiore di 2000 veicoli per corsia qualora non siano previste corsie d'emergenza;

A tal proposito il Decreto-legge 24.1.2012 n.1, *Disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo e le infrastrutture e la competitività* riporta all'art 54 che: "non devono essere applicate alla progettazione e costruzione delle nuove gallerie stradali e autostradali nonché agli adeguamenti di quelle esistenti parametri e standard tecnici e funzionali più restringenti di quelli previsti dagli accordi e dalle norme dell'Unione Europea."

Da ciò deriva che per tutte le gallerie ricadenti nell'ambito di applicazione del Decreto 264/2006 si applicano i requisiti richiesti dalla Direttiva anche se meno vincolanti di quelli del Decreto, mentre per le altre tratte rimangono in vigore le disposizioni prescritte dal D.M. 5.11.2001.

1.9 Analisi delle norme di recepimento della Direttiva 2004/54/CE in altri Paesi europei

1.9.1 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Francia

L'ordinamento francese ha recepito la Direttiva Europea con i Decreti n. 2005-701 del 25 giugno 2005 e n. 2006-1354 dell'8 novembre 2006, che introducono sottosezioni speciali all'interno del *Codice della viabilità stradale* (Capitolo VIII, *Sicurezza delle opere della rete stradale che presentano rischi particolari per la sicurezza delle persone*).

Il Capitolo VIII del Codice della Viabilità così introdotto stabilisce l'istituzione di una Commissione Nazionale di Valutazione della Sicurezza delle opere stradali (tra le quali rientrano le gallerie sopra a 300 m di lunghezza) definendo, in particolare, le responsabilità dei diversi attori e le procedure da seguire nelle diverse fasi della vita della struttura.

L'ente pubblico sorvegliante (corrispondente, per certi aspetti, alla italiana Commissione Permanente) è la *Commission nationale d'évaluation de la sécurité des ouvrages routiers* (CNESOR), costituita da 22 membri, dei quali 6 nominati dalle Amministrazioni Centrali, 4 nominati dagli Enti Territoriali, oltre 12 esperti nominati dalle Amministrazioni Centrali competenti. Il 23esimo membro è il Presidente, nominato dal Ministero per le Infrastrutture.

Il principale protagonista nella pianificazione e gestione sicurezza è il *maître d'ouvrage* (soggetto responsabile), che stabilisce, di concerto con le istituzioni pubbliche del soccorso, i piani di emergenza

specifici, nonché le strategie di prevenzione, strutturali, impiantistiche e gestionali, da applicare al tunnel del quale ha assunto la responsabilità.

La relazione tra *maître d'ouvrage* e *Commission nationale* è intermediata dal *Prefet*, figura amministrativa di rilevante potere e responsabilità nell'organizzazione statale francese, che si relaziona con la Commissione nazionale per la sicurezza dei lavori stradali (CNESOR) e con la Commissione consultiva dipartimentale per la sicurezza e l'accessibilità (CCDSA), le quali hanno il potere di approvazione sul piano di gestione (eventualmente comprendente gli interventi di modifica) proposto dal *maître d'ouvrage*. L'approvazione del piano di gestione corrisponde all'autorizzazione alla messa in esercizio, che dura 6 anni e deve essere rinnovata in ogni occasione di accadimento di incidente rilevante e/o a seguito di evidenza di modifica del livello di rischio precedentemente stimato e/o in occasione di significative modifiche del sistema.

Prefet e CNESOR hanno il potere di richiedere una diagnosi di sicurezza in qualsiasi momento.

Il piano di gestione, che costituisce il fondamentale documento di gestione della sicurezza della struttura, è articolato in una ricognizione delle caratteristiche dell'opera e del suo livello di esercizio, a cui corrisponde l'adozione di requisiti minimi di sicurezza, e di una ricognizione sistematica degli incidenti avvenuti nei 5 anni più recenti, nonché del piano di emergenza adottato. Le valutazioni di sicurezza devono essere corrispondenti ad una *analisi degli scenari d'emergenza*, compresi gli incidenti a mezzi trasportanti merci pericolose, ragionevolmente possibili nella struttura. Tali valutazioni sono redatte da un esperto o un organismo qualificato e terzo e acquisite dal *maître d'ouvrage*.

Le norme impongono la realizzazione di esercitazioni almeno annuali per ogni struttura o per ogni gruppo di strutture analoghe e territorialmente prossime.

Specificamente per i tunnel di rete TERn di lunghezza superiore a 500 m, la norma stabilisce che l'attività di coordinamento svolta ordinariamente dal *maître d'ouvrage* sia supervisionata (con approvazione esplicita) da un *agent de sécurité* (responsabile della sicurezza) cui è garantita indipendenza e che è qualificato come soggetto competente in conformità al disposto della Direttiva 2004/54/CE.

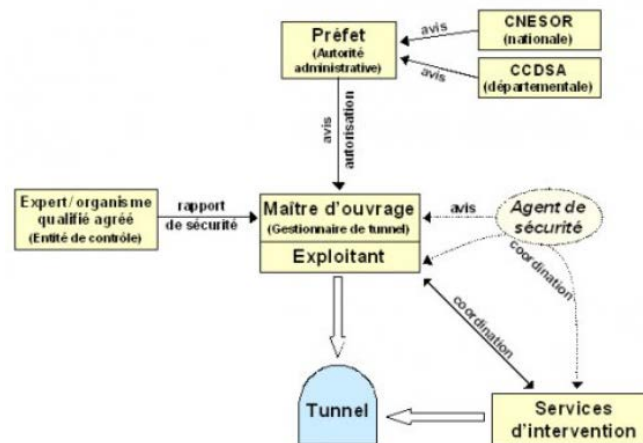


Figura 16: relazione delle responsabilità tra i soggetti responsabili previsti dal sistema normativo francese in attuazione della Direttiva 2004/54/CE



Figura 17: contenuto del dossier di sicurezza nelle previsioni normative francesi – gallerie superiori a 500 m di lunghezza e facenti parte del sistema di rete stradale TERN

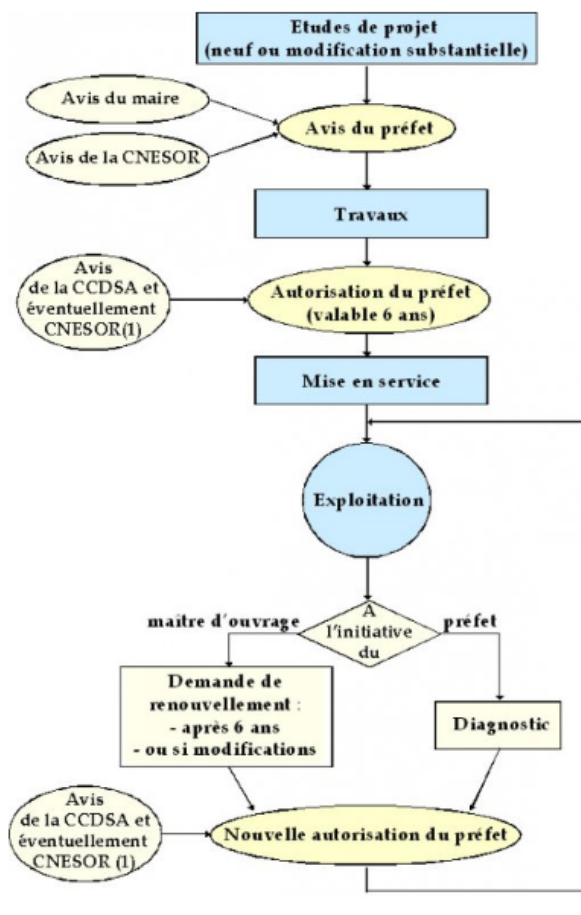


Figura 18: regime delle procedure di approvazione delle misure di sicurezza e autorizzazione all'esercizio delle gallerie

Metodi per la valutazione del rischio adottati in Francia

Numerosi lavori di ricerca sulla sicurezza nelle gallerie sono stati realizzati in seguito all'incendio del tunnel del Monte Bianco. Uno dei risultati di questi lavori è stata la pubblicazione nel 2003 di raccomandazioni sui fascicoli di sicurezza. Il metodo e la procedura per stabilire lo studio specifico dei pericoli sono presentati nel

fascicolo 4, Studio Specifico dei Pericoli, della “*Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers*” che indica, quale riferimento unico nazionale, una analisi di scenario (senza lo sviluppo di una Analisi di Rischio Quantitativa, QRA), articolata nelle sezioni:

- Capitolo 1: Panoramica del tunnel e del suo ambiente
- Capitolo 2: Descrizione funzionale della galleria
- Capitolo 3: Individuazione dei pericoli e scelta degli scenari, anche attraverso una valutazione quantitativa delle frequenze degli eventi iniziatori, stimati con riferimento a quanto effettivamente occorso nella struttura nei 5 anni precedenti; la scelta degli scenari di riferimento a partire dall’analisi degli incidenti è ottenuta attraverso una qualificazione degli eventi trigger, riconosciuti adottando una matrice di rischio standardizzata di frequenza-conseguenza;
- Capitolo 4: Esame degli scenari, con analisi di dettaglio dell’attesa condizione TermoFluidodinamica dei fenomeni pericolosi e del comportamento atteso dei soggetti esposti al pericolo
- Capitolo 5: Sintesi.

Di seguito è riportata la matrice di rischio di preliminare classificazione utilizzata nel metodo.

	I Mineur ou nul	II Significatif	III Critique	IV Catastrophique	V Catastrophe Majeure
A Très fréquent					
B Fréquent					
C Occasionnel					
D Rare					
E Très rare					
F Extrêmement rare					

Figura 19: Matrice di rischio utilizzata in Francia per la prima qualificazione della pericolosità della struttura (PIARC, 2013)

La verifica di conformità tra design della struttura e condizione di sicurezza attesa è demandata ad un giudizio esperto sulla base delle modellazioni di scenario citate. Eventuali carenze di prestazione sono compensate con **interventi integrativi, prequalificati** negli effetti attesi in caso di loro adozione (sia con riferimento alla riduzione della frequenza degli incidenti – e quindi con effetto preventivo – sia con riferimento alla riduzione del danno conseguente al verificarsi dell’incidente di riferimento – e quindi con effetto protettivo). Le valutazioni sono incentrate sulla sicurezza degli utenti della strada e sulla capacità di **autosoccorso** garantita dal sistema. Le valutazioni, inoltre, devono essere accompagnate da una **verifica sull’effetto dei guasti** degli impianti e, in particolare, da una analisi dei conflitti del sistema complesso al fine di prevenire cause comuni di guasto (**CCF**) per apparecchiature integrate e destinate a garantire la sicurezza.

Esclusivamente per quanto riguarda l’analisi dei rischi connessi al trasporto di merci pericolose, in Francia la valutazione quantitativa dei rischi (EQR) lo standard adottato in Francia è il modello OCSE/AIPCR.

Il metodo EQR si basa sull’analisi di scenari considerati rappresentativi e costituiti da 13 eventi di incidente a mezzi stradali con dispersione di materiale pericoloso. I 13 eventi di riferimento, e le caratteristiche di scenario essenziali, sono riportati nella tabella seguente (PIARC 2013).

No. Scénario.	Description	Masse concernée	Diamètre de brèche (mm)	Débit de rejet (kg/s)
1	Incendie de poids lourd 20 MW, sans marchandise dangereuse	-	-	-
2	Incendie de poids lourd 100 MW, sans marchandise dangereuse	-	-	-
3	BLEVE de GPL en bouteille	50 kg	-	-
4	Feu de nappe d'essence en citerne	28 tonnes	100	20,6
5	Explosion d'un nuage de vapeur (VCE) d'essence en citerne	28 tonnes	100	20,6
6	Fuite sur une citerne de chlore	20 tonnes	50	45
7	BLEVE de GPL en citerne	18 tonnes	-	-
8	Explosion d'un nuage de vapeur (VCE) de GPL en citerne	18 tonnes	50	36
9	Feu chahmeau sur une citerne de GPL	18 tonnes	50	36
10	Fuite sur une citerne d'ammoniac	20 tonnes	50	36
11	Fuite sur une citerne d'acroléine	25 tonnes	100	24,8
12	Fuite sur une bouteille d'acroléine	100 litres	4	0,02
13	BLEVE de dioxyde de carbone en citerne (sans les effets d'anoxie)	20 tonnes	-	-

Figura 20: scenari di riferimento del modello EQR-MD (PIARC)

Gli scenari vengono studiati con una modellazione semplificata, che considera:

- Il volume di traffico di mezzi pesanti e trasportanti merci pericolose in particolare;
- Il volume di traffico complessivo e sommarie indicazioni sulla stagionalità e sulla presenza di picchi di traffico giornalieri;
- I tassi di incidente della tratta in esame;
- Le caratteristiche geometriche e la disponibilità di impianti del tunnel;
- La condizione della ventilazione disponibile.

Va evidenziato che il modello non ha lo scopo di una restituzione completa del profilo di rischio di una galleria, conforme quindi alla rappresentazione sul piano F-N dell'intero rischio di sistema, e dovrebbe essere utilizzato per valutazioni comparative e analisi specifiche.

1.9.2 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Spagna

L'ordinamento spagnolo ha recepito la Direttiva Europea mediante il Regio Decreto 635/2006 del 26 Maggio 2006 (Real Decreto 635/2006). Il Decreto è stato emanato ai sensi dell'articolo 149.1.24 della Costituzione che attribuisce allo Stato la competenza per i lavori pubblici di interesse generale e nell'ambito delle competenze regolamentari attribuite al governo dalla disposizione addizionale seconda e la disposizione finale della legge Strade n. 25/88 del 29 luglio 1988. Il suo scopo è regolare la progettazione, la costruzione e il funzionamento delle gallerie della rete stradale dello Stato.

La norma si applica a tutte le gallerie della rete statale, e disciplina i compiti assegnati alle diverse figure cui compete la responsabilità della sicurezza delle gallerie, individuate nell'Autorità amministrativa, nel Gestore della galleria e nel Responsabile della sicurezza. Nelle gallerie della rete stradale statale (CER), il gestore è la direzione Generale stradale del ministero dello Sviluppo. Quest'ultima, a sua volta, durante la fase di esercizio, può designare un operatore per ogni galleria CER. Se la galleria fa parte di una strada in concessione, l'operatore è la società concessionaria.

La messa in esercizio di una nuova galleria o la riapertura di una esistente sono soggette ad una procedura regolata, nella quale l'intervento del responsabile della sicurezza garantisce in ogni momento un'attenzione prioritaria al rispetto dei requisiti minimi stabiliti dalla normativa.

L'ispezione periodica delle gallerie è obbligatoria al fine di garantire in ogni momento il mantenimento delle condizioni di sicurezza e l'eventuale adozione di misure atte a migliorare tale sicurezza. La norma disciplina anche l'adeguamento delle gallerie esistenti alle condizioni e requisiti minimi che sono stabiliti in dettaglio, anche nei casi in cui possono essere ammesse deroghe debitamente giustificate da adeguate analisi dei rischi. Viene inoltre definito il **sistema di segnalazione degli incidenti** per ampliare la conoscenza sul funzionamento di questo tipo di strutture singolari.

Il Regio Decreto comprende tre allegati.

L'Allegato 1 individua le misure minime di sicurezza, e quindi elenca caratteristiche strutturali e impianti in dotazione da adottare in funzione delle variabili di esposizione al rischio, costituite, conformemente alla norma europea e alla bibliografia in materia, da lunghezza e flusso di traffico.

L'Allegato 2 indica forma e contenuto della documentazione di sicurezza e del piano di emergenza, nonché le misure di addestramento e formazione (tra le quali l'esecuzione di esercitazioni periodiche) e delle procedure da seguire per l'ammissione in esercizio e/o la riammissione delle gallerie stradali.

L'Allegato 3 contiene le peculiarità della segnaletica in galleria che consentono agli utenti di utilizzarli in condizioni di sicurezza adeguate.

Metodi per la valutazione del rischio adottati in Spagna

Tra la documentazione di sicurezza che deve essere tenuta a disposizione di ogni galleria, come indicato al punto 2.3 dell'Allegato 2 del regio decreto 635/2006, è citato lo **Studio Specifico di Rischio** che "[...] *descrive i possibili incidenti che incidano chiaramente sulla sicurezza degli utenti delle gallerie e possano verificarsi durante la fase operativa, nonché la natura e l'entità delle possibili conseguenze; lo studio deve specificare e giustificare le misure volte a ridurre la probabilità di incidenti e loro conseguenze*".

L'Allegato 1, al punto 1.1.3, definisce inoltre i parametri che fanno scattare l'obbligo ad una valutazione di rischio estesa: "*Quando una galleria presenta caratteristiche particolari rispetto a (d) alcuni parametri (ad esempio inosservanza di requisiti strutturali, eccezionalità per tecniche innovative, caratteristiche speciali in relazione ai parametri di sicurezza, requisiti minimi di equipaggiamento, pendenze superiori al 3%), è effettuata un'analisi dei rischi a norma dell'articolo 11 per stabilire se siano necessarie ulteriori misure di sicurezza o attrezzature complementare per garantire un adeguato livello di sicurezza della galleria*".

Per la redazione delle analisi di rischio è necessario adottare "*una metodologia dettagliata e ben definita, in linea con le norme di buona pratica disponibile*". La valutazione di rischio, effettuata da un organismo funzionalmente indipendente dal gestore della galleria, è elaborata per analizzare scenari di rischio specifici, come quelli legati al passaggio di merci pericolose all'interno delle gallerie o quando altri vincoli operativi che lo richiedano. Il contenuto e i risultati dell'analisi dei rischi sono inclusi nel manuale operativo trasmessa all'autorità amministrativa per ottenere le autorizzazioni pertinenti.

Il gestore della galleria è tenuto a mantenere aggiornato il manuale operativo e, di conseguenza, aggiornare lo studio sull'analisi dei rischi contenuto in tale documento.

1.9.3 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Austria

L'ordinamento austriaco ha recepito la Direttiva Europea mediante la "*Road Tunnel Safety Act*" (STSG-n.54/2006).

Con la STSG sono state attuate le disposizioni della direttiva UE per tutte le gallerie della rete stradale di *alto livello* (A o S) secondo le definizioni della legge federale sulle strade del 1971, e caratterizzate da una lunghezza di oltre 500 m. La norma di recepimento fissa i requisiti formali, stabilisce il contenuto della documentazione di sicurezza della galleria per le diverse fasi definite nella legge (pianificazione, entrata in esercizio, esercizio e manutenzione) e disciplina i documenti complementari alla documentazione di sicurezza della galleria attraverso le procedure individuate ai paragrafi 7, 7bis e 8 della STSG. La norma impone che la necessaria valutazione di sicurezza sia affidata ad uno specialista in materia di sicurezza delle gallerie.

La documentazione di sicurezza delle gallerie è il documento di sicurezza essenziale alla progettazione, gestione e manutenzione della struttura.

L'autorità amministrativa procede a verifica con riferimento a:

- Procedura di cui ai paragrafi 7, 7 bis e 8 sulla base della documentazione relativa alla sicurezza nelle gallerie.
- Procedura di esame del progetto preliminare di galleria o di messa in servizio di una galleria.

La documentazione di sicurezza della galleria contiene le informazioni riguardanti la sicurezza di una galleria allo scopo di fornire una chiara comprensione del progetto in modo che i diversi responsabili (gestore della galleria, responsabile della sicurezza della galleria, responsabile della gestione della galleria, ecc.) possano, in base alla documentazione di sicurezza della galleria, ottenere una rapida panoramica dei principali aspetti legati alla sicurezza della struttura;

La struttura della documentazione relativa alla sicurezza delle gallerie è standardizzata così da fornire rapidamente all'Autorità Amministrativa un riepilogo delle informazioni degli impianti e delle eventuali Deroghe ai sensi del paragrafo 7 della STSG;

Ai sensi dell'allegato 12, paragrafo 1, STSG, l'analisi del rischio galleria deve essere effettuata quando una galleria presenta caratteristiche particolari per quanto riguarda i parametri di sicurezza descritti nell'STSG, per verificare se siano necessarie misure di sicurezza ulteriori rispetto alle minime imposte, e/o ulteriori aggiuntive, al fine di garantire un livello di sicurezza conforme.

Metodi per la valutazione del rischio adottati in Austria

Prima dell'introduzione della STSG la valutazione della sicurezza dei tunnel stradali era basata sul giudizio esperto; il livello di sicurezza minimo era implicitamente definito attraverso la previsione di specifiche prescrizioni.

Con la SGST è invece imposta una metodologia per un'analisi quantitativa integrata del rischio, che prende il nome di TuRisMo (Tunnel Risk Model).

La procedura di QRA applicata ai tunnel austriaci analizza l'intero sistema complesso, articolando la valutazione in specifiche analisi di incidentalità e di efficacia / efficienza dei sottosistemi rilevanti per la sicurezza, il metodo si articola in particolare in:

- un modello logico - analitico (che utilizza l'analisi dell'Albero delle Cause - FTA e ad Albero degli Eventi - ETA) per l'analisi sequenziale di eventi evoluti a partire da un Iniziatore (incidente, guasto) e fino alla definizione dell'insieme degli scenari di conseguenza;
- un modello statistico per la quantificazione della frequenza attesa degli eventi iniziali (Tassi di incidenti nei tunnel) e la stima delle proporzioni di ripartizione delle probabilità condizionate tra i rami dell'ETA.
- un modello statistico per la quantificazione delle conseguenze degli effetti fisici determinati dagli incidenti a merci pericolose in galleria e che non determinano incendi;

- un modello combinato termofluidodinamico e di esodo, che restituisce per via simulativa, definito il numero di esposti al fenomeno, il numero vittime atteso in caso di incendio in galleria.

L'analisi è condotta considerando per ciascuna fase generativa ed evolutiva dell'emergenza considerando i parametri e le caratteristiche del sistema rilevanti. I fattori che hanno effetto sulla sicurezza sono raccolti per ambiti, come rappresentato nello schema sottostante (PIARC, 2013).

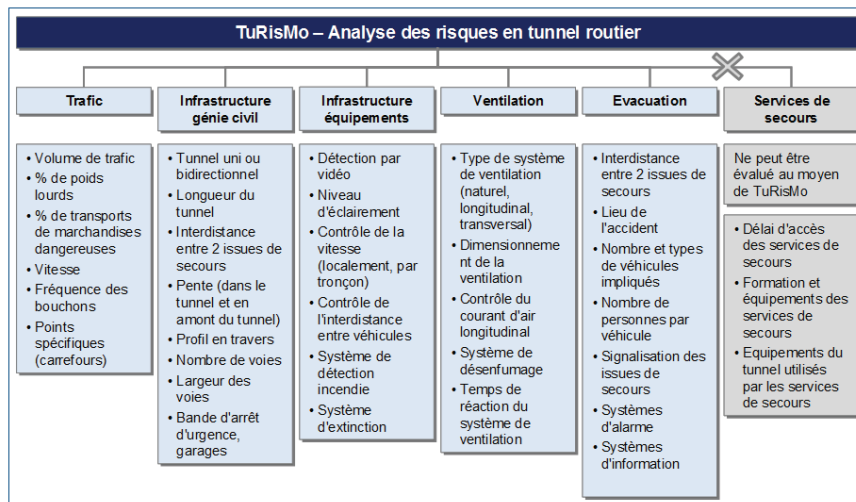


Figura 21: fattori determinanti il rischio di un sistema galleria stradale – TuRisMo (PIARC, 2013)

Gli indicatori di rischio ottenuti dall'applicazione del metodo sono costituiti dal Rischio Totale (o Valore Atteso del Danno, VAD) della struttura nella sua interezza e con riferimento all'esercizio annuale.

Le rispettive quote di rischio sono indicate separatamente per:

- effetti meccanici;
- incendi;
- merci pericolose.

La valutazione del rischio è effettuata confrontando:

- gli effetti di riduzione del rischio delle diverse misure di sicurezza;
- il rischio del tunnel indagato rispetto al rischio di un tunnel di riferimento.

La galleria di riferimento è costituita dalla galleria che presenta identiche caratteristiche della galleria reale (stessa lunghezza, geometria, caratteristiche di traffico) perfettamente conforme ai requisiti minimi di sicurezza di cui alla direttiva UE.

Eventuali carenze rispetto all'applicazione dei requisiti minimi obbligatori possono essere compensate attraverso l'adozione di misure alternative. La valutazione delle misure di sicurezza è in genere associata ad un'analisi costi-benefici.

Uno degli elementi di particolare rilevanza del metodo è la modellizzazione della complessa interazione della propagazione del fumo nel tunnel, che ha l'obiettivo di verificare, attraverso analisi di scenario, l'effetto dei sottosistemi rilevanti nel condizionare il flusso del pericolo e di determinare le influenze delle prestazioni di struttura e impianti sui tempi di esodo.

Sulla base delle analisi prodotte è stimato il VAD e la struttura è classificata per classe di pericolosità secondo la matrice rappresentata di seguito.

Espérance mathématique du risque		Classe de Danger
Limite inférieure	Limite supérieure	
-	$< 2 \cdot 10^{-2}$	I
$> 2 \cdot 10^{-2}$	$< 1 \cdot 10^{-1}$	II
$> 1 \cdot 10^{-1}$	$< 5 \cdot 10^{-1}$	III
$> 5 \cdot 10^{-1}$	-	IV

Figura 22: classi di pericolosità della struttura in relazione al valore del danno atteso – Austria (PIARC, 2013)

Ulteriore criterio di verifica è adottato sul piano F-N, con l'adozione di un limite rappresentato nella figura di seguito. Si evidenzia che il criterio è rischio avverso, presentando una pendenza pari a -2.

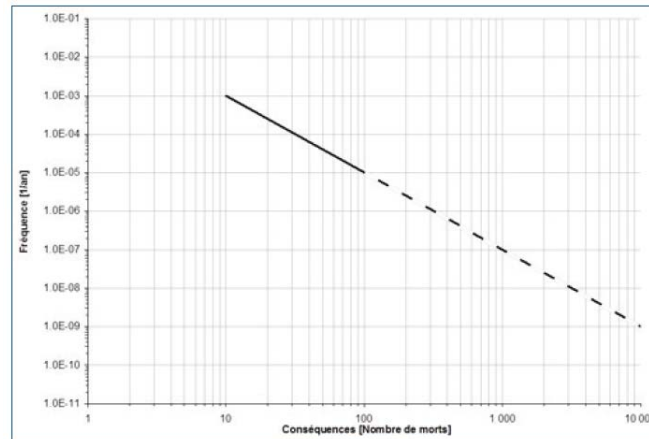


Figura 23: criterio sul piano F-N adottato in Austria (PIARC, 2013)

1.9.4 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Repubblica Ceca

Le misure di sicurezza previste per le gallerie stradali finalizzate al raggiungimento di un livello di sicurezza conforme sono contenute nelle norme tecniche TP98 *Tecnologie di allestimento delle gallerie stradali*, TP154 *Esercizio, gestione e manutenzione delle gallerie stradali*, TP229 *Sicurezza delle gallerie stradali* emanate dal Ministero dei Trasporti nazionale.

Il metodo raccomandato per la stima del rischio relativamente al trasporto di merci pericolose è il metodo EQR di OCSE/PIARC.

L'approccio di calcolo prevede l'utilizzo di probabilità incidentali fornite dal normatore e ricavate da una base dati riferita a circa 200 incidenti occorsi in 12 strutture. Sulla base di queste elaborazioni è stabilita una probabilità di incendio in galleria pari a 7.8×10^{-3} incendi per milioni di veicoliKm.

Un criterio di verifica di puro riferimento è adottato sul piano F-N, in assenza di alcun obbligo tassativo in merito. Il criterio di riferimento è riportato nella figura sottostante.

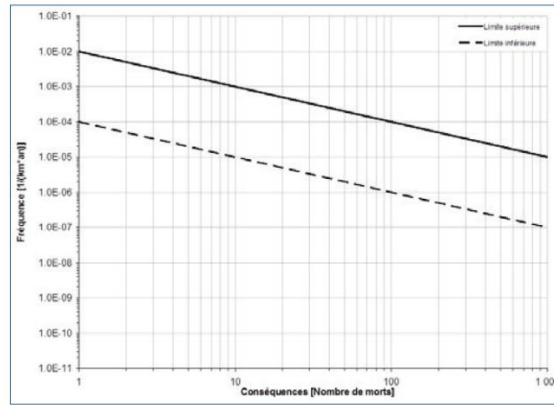


Figura 24: criterio di riferimento sul piano F-N adottato in Repubblica Ceca (PIARC, 2013)

1.9.5 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Olanda

Dal 2006 l'analisi di sicurezza dei tunnel stradali è obbligatoriamente effettuata applicando il metodo EQR-RWS, che si articola in:

- Metodi di analisi statistica degli incidenti e degli incendi, finalizzati a restituire le probabilità annue di incidente rilevante delle strutture;
- Analisi ad albero degli eventi per la qualificazione delle evoluzioni attese.

I criteri di verifica sono individuati sul rischio individuale (con un limite di accettazione di 10^{-7} vittime per Km/anno) e sul rischio sociale (piano F-N) con l'adozione di un criterio di verifica rischio avverso (pendenza della retta di verifica nel piano bilogaritmico pari a -2), riportata sotto (PIARC, 2013). Va evidenziato che il criterio sul piano F-N è adottato in modo non tassativo, come puro riferimento, essendo consentito l'esercizio di una struttura non conforme sulla base di adeguate giustificazioni.

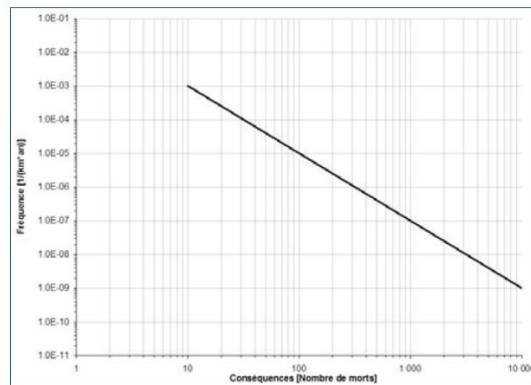


Figura 25: criterio orientativo sul piano F-N adottato in Olanda (PIARC, 2013)

1.9.6 Recepimento della Direttiva Europea 2004/54/CE in Germania

In Germania la gestione della sicurezza dei tunnel stradali si basa sulla Direttiva 2004/54/CE direttamente recepita, e sulla Direttiva Tecnica Nazionale RABT 2006.

Il livello di sicurezza delle gallerie non conformi ai Requisiti Minimi imposti dalla Direttiva Europea è verificato alla luce delle analisi di scenario riferite, esclusivamente, agli eventi:

- Collisione tra veicoli (in assenza di incendio);
- Incendio ad un veicolo (in assenza di merci pericolose secondo la classificazione ADR).

Le analisi di scenario sono condotte con riferimento alla galleria virtuale perfettamente adeguata e a quella reale, e l'indicatore di prestazione utilizzato è costituito dal numero di vittime e danni materiali conseguenti ai due scenari di riferimento, applicati a tronchi omogenei di galleria. I due indicatori possono essere ridotti all'unitarietà attraverso l'introduzione di un parametro di conversione costituito dal valore della vita umana persa.

Il criterio di accettazione – rifiuto non è definito in modo univoco, avendo a riferimento il livello di accettabilità del rischio ottenibile da studi in materia.

1.10 Direttiva 2008/96/CE

La Direttiva 2008/96/ce del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali disciplina la gestione della sicurezza delle strade TERN (come definite dalla decisione n. 1692/96/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 luglio 1996) con l'esclusione delle tratte costituite da gallerie di lunghezza superiore a 500 m. La Direttiva completa quindi il quadro di intervento normativo europeo finalizzato all'armonizzazione della disciplina delle misure di sicurezza da adottare per l'incremento della sicurezza stradale sulle infrastrutture viarie di maggiore rilevanza europea.

La Direttiva nasce dall'obiettivo strategico, assunto nel 2001 tra i vari Stati membri, di dimezzare il numero delle vittime sulle strade entro il 2010, e interviene sulla gestione della sicurezza delle strutture avendo preso atto che l'incidentalità e la gravità degli eventi sono positivamente evolute, nel periodo intercorso, soprattutto per merito delle migliori qualità di progetto e realizzazione dei veicoli stradali.

In particolare, la Direttiva indica che "il livello di sicurezza delle strade esistenti dovrebbe essere rafforzato concentrando gli investimenti sui tratti che presentano la concentrazione più elevata di incidenti e/o il maggiore potenziale di riduzione degli incidenti" (cfr. Premessa, punto (8)). La Direttiva individua nelle ispezioni le concrete misure di analisi e verifica delle peculiari pericolosità delle tratte stradali, con specifico riferimento all'incidentalità grave e mortale, rinviando quindi al giudizio esperto, strutturato in valutazioni procedurizzate, la valutazione delle misure più adatte allo scopo strategico individuato. Il giudizio esperto è dichiarato tale quando fornito da personale opportunamente formato allo scopo.

Dal punto di vista procedurale, la Direttiva impone che "la classificazione dei tratti ad elevata concentrazione di incidenti e la classificazione della sicurezza della rete aperta al traffico siano fondate su un esame del funzionamento della rete stradale con cadenza almeno triennale" (Art. 5, c. 1). L'analisi esperta è inoltre introdotta quale fase progettuale anche nella procedura di progettazione di nuove strade (Art. 4).

Le ispezioni sono previste anche per valutare "possibili effetti dei lavori in corso sulla sicurezza del flusso di traffico" (Art. 6, c. 2).

La Direttiva stabilisce anche un innovativo obiettivo per la gestione dei dati di incidente, indicando che l'organo competente provveda a redigere una relazione di incidente per ciascun incidente mortale verificatosi in una strada ricompresa nel campo di applicazione, e fornendo parametri econometrici di stima per la classificazione del danno sociale medio corrispondente agli incidenti gravi e mortali. I contenuti minimi della relazione di incidente sono definiti nell'Allegato 4 della Direttiva.

L'Allegato 1 individua i contenuti della valutazione d'impatto sulla sicurezza stradale per i progetti di infrastruttura, che si riferisce all'analisi della rete stradale complessiva di inserimento della nuova opera; le valutazioni di merito sono condotte sulla base dei criteri adottabili per lo svolgimento dei controlli di sicurezza (Allegato 2), che sono articolati in progressione coerente allo sviluppo delle varie fasi della progettazione.

L'Allegato 3 indica infine i criteri per individuare i tratti stradali ad elevata concentrazione di incidenti in rapporto al "numero di incidenti mortali nel corso degli anni precedenti per unità di distanza in rapporto al volume di traffico e, nel caso di incroci e svincoli, per punto di intersezione" (Allegato 3, § 1). L'individuazione dei tratti a sinistrosità elevata, assieme all'applicazione del valore di costo sociale medio relativo agli incidenti gravi e mortali, consente di valutare il costo sociale aggiunto di ciascuna tratta ad incidentalità specifica e, confrontando il costo attuale con il beneficio corrispondente ad eventuali interventi di miglioramento della sicurezza, di applicare un approccio di analisi costi-benefici per ottenere una ordinalità delle priorità di intervento su scala nazionale o locale.

L'analisi esperta dell'incidentalità è condotta sulla base del "*numero di incidenti, decessi e feriti gravi nel corso dei tre anni precedenti*" (Allegato 3, § 3, punto d) e si sostanzia in uno strutturato cronoprogramma di intervento che preveda:

- "eliminazione degli ostacoli fissi al margine della strada o applicazione di dispositivi di protezione dei medesimi,
- riduzione dei limiti di velocità e aumento del controllo della velocità a livello locale,
- miglioramento della visibilità in diverse condizioni meteorologiche e di luminosità,
- miglioramento delle condizioni di sicurezza delle attrezzature al margine della strada quali i sistemi di ritenuta stradale,
- miglioramento della coerenza, della visibilità, della leggibilità e della collocazione della segnaletica orizzontale (inclusa l'applicazione di rallentatori sonori) e della segnaletica verticale,
- protezione contro la caduta di sassi, smottamenti del terreno e valanghe,
- miglioramento dell'aderenza/ruvidità del fondo stradale,
- nuova concezione dei sistemi di ritenuta stradale,
- inserimento e miglioramento delle barriere protettive al centro strada,
- modifica degli schemi di sorpasso,
- miglioramento di incroci/svincoli/passaggi a livello,
- modifica dell'allineamento,
- modifica della larghezza stradale, aggiunta di una corsia d'emergenza,
- installazione di un dispositivo di gestione e di controllo del traffico,
- riduzione dei potenziali conflitti con gli utenti della strada più vulnerabili,
- adeguamento della strada agli standard odierni,
- miglioramento o sostituzione del manto stradale,
- utilizzo di segnali stradali intelligenti,
- miglioramento dei sistemi di trasporto intelligenti e dei servizi telematici ai fini dell'interoperabilità, dell'emergenza e della segnaletica."

1.11 D. Lgs. 35/2011

Il Dlgs n. 35 del 15.5.2011 "Attuazione della Direttiva Europea 2008/96/CE relativa alla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali" si applica a tutte le strade che fanno parte della rete stradale transeuropea, in fase di pianificazione, progettazione in costruzione o già aperte al traffico, escluse le gallerie stradali che rientrano nel campo di applicazione del Dlgs 264/2006. Il Decreto è sostanzialmente riproduttivo della Direttiva, con l'unica rilevante eccezione di un allargamento del campo d'applicazione, prevedendo che a partire dal 1/1/2016 le disposizioni si applichino anche alle strade appartenenti alla rete nazionale non comprese nella rete TERN.

Le attività di controllo e ispezioni previste dal Decreto sono rappresentate, nella loro procedura complessa, nella figura seguente.



Figura 26: Ciclo complessivo delle attività di controllo e ispezione previsto dal D. Lgs. 35/2011 (ex Allegato "Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali" al DM 2/5/2012)

Per agevolare l'applicazione delle disposizioni contenute nel decreto, il Ministero ha pubblicato le "Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali", adottate con Decreto Ministeriale del 2 maggio del 2012.

1.12 Decreto Ministeriale 2/5/2012 Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali

Il documento riporta i criteri e le modalità per l'attuazione dei controlli sui progetti, delle ispezioni sull'infrastruttura stradale e per l'attuazione del processo di classificazione della sicurezza della rete stradale.

Va evidenziato che la Linea Guida esplicita la sostanziale incongruenza costituita dalla mancata applicazione delle attività di ispezione e controllo nelle gallerie di rete TERN con lunghezza superiore a 500 m, evidenziando che "mentre la norma sulla sicurezza delle gallerie individua i requisiti minimi di sicurezza che tali infrastrutture devono soddisfare, nonché le relative procedure finalizzate a garantire che tali requisiti siano rispettati, la norma sulla sicurezza delle infrastrutture stradali non stabilisce alcun requisito tecnico-funzionale per le caratteristiche infrastrutturali ma introduce obblighi nei confronti dei diversi soggetti coinvolti nella gestione delle infrastrutture stradali affinché si realizzi un progressivo aumento del loro livello di sicurezza. In quest'ottica sarebbe stato più opportuno che la direttiva 2008/96/CE, intervenuta successivamente alla 2004/54/CE, avesse fatto salve le disposizioni specifiche sulle gallerie, già cogenti, ma non avesse escluso dal proprio campo di applicazione le gallerie, peraltro solo quelle di lunghezza superiore a 500 metri, poiché le disposizioni della direttiva 2008/96/CE si applicano a "tratti di infrastruttura stradale", che comprendono quindi anche eventuali gallerie, e che devono essere analizzati, sotto il profilo della sicurezza stradale dell'intero tratto, in modo unitario e complessivo" (pag. 10, LG citate).

Al di là della specificazione circa responsabilità e poteri dei soggetti coinvolti nelle procedure, le Linee Guida individuano "metodologie standardizzate da parte di ciascun OC, mediante la costruzione di una base di dati coerente ed omogenea, tale da consentire di pervenire potenzialmente alla definizione di una classificazione unitaria di tutta la rete stradale sull'intero territorio nazionale" (pag. 25 LG).

Il § 2.2.1.1 delle LG (Analisi delle caratteristiche geometriche e funzionali) indica che “la classificazione tecnico-funzionale è il presupposto per individuazione dei tratti stradali omogenei finalizzata alla classificazione della sicurezza della rete. L’individuazione dei tratti stradali omogenei non deve limitarsi alla suddivisione nelle tipologie tecnico-funzionali previste dalle norme ma deve essere attuata attraverso l’applicazione di ulteriori criteri significativi in termini di parametri rappresentativi della sicurezza”.

L’individuazione dei tratti stradali omogenei prevede quindi (§ 2.2.1.2):

- la discriminazione tra infrastrutture in ambito urbano ed extraurbano;
- l’ulteriore stratificazione per tipologia di strada, se a doppia o singola carreggiata;
- il contesto di inserimento ambientale (se la tratta è in pianura, o montagna);
- la classe funzionale della strada, ulteriormente specificata in relazione, ad esempio, a tratte a diverso numero di corsie per carreggiata;
- le caratteristiche geometriche del tracciato (sia con riferimento all’andamento planimetrico che altimetrico);
- le caratteristiche di traffico (in relazione a volume, componenti, densità e variabilità temporale).

Questa preliminare classificazione consente la destrutturazione della rete reale in una metafora funzionale costituita da archi a caratteristiche omogenee, articolati in nodi, costituiti dai punti singolari (intersezioni, svincoli, punti significativi di variazioni delle tratte).

Ciascun arco così definito, al quale sono associate le caratteristiche geometriche e funzionali omogenee, costituisce l’oggetto dell’analisi dell’incidentalità specifica. L’attribuzione dell’incidentalità propria allo specifico arco (con riferimento prioritario ad incidenti mortali e secondariamente ad incidenti gravi) consente quindi di operare, in termini sistematici, l’ordinamento degli archi a maggiore incidentalità, sui quali operare, con ordinalità coerente alla classificazione e con approccio di analisi costi – benefici, la pianificazione degli interventi migliorativi.

La base dati per l’attribuzione dell’incidentalità di tratta è costituita dal Data Base Istat (anche DB Istat).

Gli indicatori di incidentalità individuati sono costituiti da:

- tasso di incidentalità (espresso in funzione dei flussi di traffico);
- frequenza di incidenti (espresso in funzione della sola estesa chilometrica);
- numero di incidenti.

PRIORITA'	INDICATORI DI INCIDENTALITA'	UNITA' DI MISURA
1	tasso di incidentalità con morti su flusso	$n. \text{ incidenti con morti} / \text{veic.} \cdot \text{km}$
	tasso di incidentalità con feriti su flusso	$n. \text{ incidenti con feriti} / \text{veic.} \cdot \text{km}$
	tasso di incidentalità su flusso	$n. \text{ incidenti} / \text{veic.} \cdot \text{km}$
	tasso di mortalità su flusso	$n. \text{ morti} / \text{veic.} \cdot \text{km}$
	tasso di lesività su flusso	$(n. \text{ morti} + n. \text{ feriti}) / \text{veic.} \cdot \text{km}$
	tasso di ferimento su flusso	$n. \text{ feriti} / \text{veic.} \cdot \text{km}$
2	frequenza incidenti mortali	$n. \text{ incidenti con morti} / \text{km}$
	frequenza incidenti con feriti	$n. \text{ incidenti con feriti} / \text{km}$
	frequenza incidenti	$n. \text{ incidenti} / \text{km}$
	frequenza morti	$n. \text{ morti} / \text{km}$
	frequenza feriti	$n. \text{ feriti} / \text{km}$
3	tasso di mortalità	$n. \text{ morti} / n. \text{ incidenti}$
	tasso di lesività	$(n. \text{ morti} + n. \text{ feriti}) / n. \text{ incidenti}$
	tasso di ferimento	$n. \text{ feriti} / n. \text{ incidenti}$
	n. morti	numero
	n. feriti	numero
	n. incidenti	numero

La classificazione delle tratte omogenee per incidentalità decrescente consente all'OC di redigere il programma delle ispezioni che dovranno essere effettuate secondo l'ordine di tale classifica.

L'OC al fine di valutare il potenziale di miglioramento ed il risparmio dei costi connessi agli incidenti dovrà utilizzare l'indicatore "costo sociale medio", strettamente correlato agli indicatori di incidentalità di cui alla Tabella 7, e descritto nello "Studio di valutazione dei costi sociali dell'incidentalità stradale - Anno 2010", previsto dall'art. 7, c.2 del D.Lgs. n.35/11.

La classificazione della sicurezza della rete può essere effettuata tramite una valutazione del potenziale di riduzione degli incidenti e del costo ad essi connesso, più ampiamente definito "potenziale di sicurezza" (*Safety Potential – SAPO*), che individua il risparmio in termini economici derivante dalla riduzione attesa degli incidenti in seguito all'attuazione dei provvedimenti di messa in sicurezza dei tratti individuati come ad elevata concentrazione di incidenti, indipendentemente dal costo di realizzazione dell'intervento stesso, che invece dovrà essere considerato nella fase di pianificazione degli interventi, di cui al par. 2.4.2, attraverso le relative analisi benefici-costi.

Il SAPO è sostanzialmente il valore incrementale del costo sociale degli incidenti specifico della tratta, determinato dal costo annuo degli eventi di varia gravità (morti, feriti gravi, feriti lievi) del km tipo della tratta a cui è sottratto il costo medio annuo omologo del tratto kilometrico medio per la tipologia di strada corrispondente. Il SAPO può quindi assumere valori positivi (corrispondenti alle tratte con pericolosità sopra la media della tipologia di strada a cui appartiene) o negativi (viceversa).

Le ispezioni sono effettuate sulla base delle evidenze di fatto; le risultanze delle ispezioni costituiscono le valutazioni di merito degli interventi specifici e programmati.

Gli interventi possono essere sommariamente ricondotti a:

- interventi gestionali (rifacimento e sostituzione segnaletica orizzontale e verticale; sostituzione tappetino di usura; sostituzione di dispositivi di ritenuta; manutenzione impianti di illuminazione, semaforici, PMV, ecc.).
- Interventi infrastrutturali minimi (isolata e non significativa rettifica di tracciato; realizzazione di singoli accessi; realizzazione di aree di servizio; realizzazione di aree di sosta o parcheggio).

La LG affronta poi il caso dei controlli previsti per la realizzazione di nuove infrastrutture, per le quali è previsto lo svolgimento di VISS, disciplinati da specifico Decreto Ministeriale.

Riveste una importanza centrale la individuazione del metodo per la verifica dell'efficacia degli interventi realizzati, che deve essere attuata con approccio *before/after* (§2.6.1); in particolare "*l'identificazione dell'efficacia degli interventi pertanto si basa su:*

- analisi della variazione degli indicatori di incidentalità prima/dopo l'intervento;
- analisi della variazione dei flussi di traffico e della loro composizione;
- analisi della variazione delle velocità rilevate;
- applicazione dell'analisi benefici-costi (CBA) con i dati post-intervento o valutazione".

È inoltre specificato (§ 2.6.1) che la qualità dell'analisi dipende strettamente da:

1. "adeguatezza periodo di osservazione: gli incidenti possono essere considerati eventi statisticamente rari, e, per tale motivo, il processo di valutazione dei risultati richiede periodi di osservazione sufficientemente elevati. Periodi di osservazione inferiori ad un anno non possono essere ritenuti statisticamente significativi, sia per il periodo before sia per quello after;

2. variabilità del fenomeno ed influenza dei fattori esterni: la determinazione dei valori da utilizzare nel confronto "before/after" può essere influenzata da diversi fattori di variabilità insiti nel fenomeno, e risulta necessario considerare i seguenti elementi:
- regressione dalla media: gli incidenti hanno un andamento casuale nel tempo, per il quale si può assumere una distribuzione di frequenza (ad es. quella di Poisson), e pertanto ciò significa che i valori misurati possono essere diversi, in alcuni periodi, dai valori medi che si sarebbero attesi negli stessi punti;
 - migrazione degli incidenti: un evento verificabile nel periodo successivo all'intervento, che per effetti del tutto casuali può provocare una variazione del numero di incidenti, potrebbe essere erroneamente attribuito all'intervento stesso;
 - cambiamento dei volumi di traffico: è un fattore di variabilità che può agire sul numero di incidenti nel luogo in cui si è realizzato l'intervento;
 - trend di lungo periodo: per alcune tipologie di incidenti si possono osservare dei trend di medio-lungo periodo, determinati da fattori quali il miglioramento delle dotazioni dei veicoli, un cambiamento comportamentale degli utenti, ecc.;
 - coesistenza di più interventi."

La LG indica l'utilizzo di metodi empirici bayesiani per la correzione dei dati che presentino vulnerabilità come quelle riferite, facendo ricorso a correttivi ottenuti da indicatori di tratte omologhe (utilizzate come campione di controllo) attraverso il metodo delle *Safety Performance Functions* (SPFs), dei quali si dirà nel capitolo dedicato all'analisi dell'incidentalità.

Il § 4 della LG specifica la modalità di ispezione delle infrastrutture stradali.

Le ispezioni possono essere diffuse o puntuali, con differenziate caratteristiche come evidenziato nella tabella seguente.

TIPOLOGIA ISPEZIONE	DOVE	TIPOLOGIA INCIDENTALITA'	FINALITA'	QUANDO	PRIORITA'	PROGRAMMA
DIFFUSA	tutta la rete (per tratti omogenei)	DISTRIBUITA (incidentalità totale)	preventiva	periodica	tratti a maggiore concentrazione di incidentalità diffusa	unico programma tratti omogenei + siti critici (classificazione della sicurezza dell'intera rete)
PUNTUALE	singoli siti critici	LOCALIZZATA (prevalentemente incidentalità mortale)	preventiva + curativa	periodica + ad hoc	siti a maggiore incidentalità concentrata	
	cantieri		preventiva	ad hoc	flussi di traffico maggiori	programma cantieri

Figura 28: Tipologia di ispezioni (diffuse e puntuali) e caratteristiche specifiche delle attività (ex LG, § 4.2.1, pag. 89)

Le ispezioni hanno la finalità di:

Le ispezioni di sicurezza hanno la finalità di (§ 4.1):

- "individuare le criticità dell'infrastruttura stradale direttamente correlate agli eventi incidentali;
- identificare i fattori di potenziale pericolo dell'infrastruttura stradale, che potrebbero dar luogo a siti con elevata incidentalità;
- individuare la priorità degli interventi correttivi infrastrutturali per ridurre il numero e la gravità degli incidenti;
- individuare la priorità degli interventi correttivi infrastrutturali per prevenire ulteriori eventi incidentali;
- mantenere in costante osservazione lo stato di sicurezza della rete stradale.

L'attività ispettiva è specificamente definita per tipologie omogenee di ispezioni. Con riferimento all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata si riporta la Scheda 1_ISP_PD_EXDC corrispondente.

MACROVOCE	VOCE	PARAMETRO	INDICATORE	GIUDIZIO
ASPETTI GENERALI	CONDIZIONI AMBIENTALI CRITICHE	CONDIZIONI ATMOSFERICHE (nebbia, vento, neve, pioggia)	manca o insufficiente avviso utenza inadeguatezza contromisure	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">dovrà essere rilevata l'eventuale presenza di ostacoli presenti nella fascia di rispetto che causano una ridotta visibilità o potenziali pericoli in caso di fuoriuscita del veicolo dalla sede stradale</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">dovrà essere valutata l'eventuale differenza in eccesso o in difetto tra la velocità di progetto e la velocità massima consentita sul tratto ispezionato</div>
		CONDIZIONE PAVIMENTAZIONE STRADALE (ghiaccio, allagamenti, detriti)	manca o insufficiente avviso utenza inadeguatezza contromisure	
	TRAFFICO	VOLUME	Inadeguatezza sezione	
		TIPOLOGIA	presenza di componenti particolari	
	PAESAGGIO CIRCOSTANTE	FASCE PERTINENZA	presenza di ostacoli o pericoli, presenza strade di servizio	
		FASCE RISPETTO	presenza di costruzioni, alberi, ecc.	
		FASCE RISPETTO E OLTRE	distrazione guida per contesti particolari, presenza viabilità adiacente, altre infrastrutture, pubblicità	
	VELOCITA'	VELOCITA' DI PROGETTO - VELOCITA' MASSIMA CONSENTITA	differenza eccessiva (+/-)	
		VELOCITA' MASSIMA CONSENTITA - VELOCITA' OPERATIVA	differenza eccessiva (+/-)	
	SISTEMA SEGNALETICO	SEGNALETICA ORIZZONTALE	disomogeneità	
		SEGNALETICA VERTICALE	disomogeneità	
		PMV	inefficienza informazione	
GEOMETRIA	TRACCIATO PLANIMETRICO	RETTIFILI	lunghezze eccessive	
		CURVE TRANSIZIONE	assenza o inadeguatezza	
		CURVE CIRCOLARI	raggi di curvatura inadeguati	
	TRACCIATO ALTIMETRICO	LIVELLETTE	pendenze eccessive lunghezze eccessive	
		RACCORDI CONVESSI	presenza dossi	
		RACCORDI CONCAVI	presenza sacche	
		COORDINAMENTO PLANO-ALTIMETRICO	visibilità non corretta perdita di tracciato	

Figura 29: Scheda 1_ISP_PD_EXDC relativa all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata parte 1

ISPEZIONE GENERALE					PROGRESSIVA CHILOMETRICA										
MACROVOCE	VOCE	PARAMETRO	INDICATORE		0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,500	5,000	
SEDE STRADALE	PIATTAFORMA, MARGINI E FASCE DI PERTINENZA	BANCHINA LATERALE	assenza o insufficiente larghezza	M											
			restringimento in corrispondenza opera d'arte	G											
		CORSA EMERGENZA	assenza o insufficiente larghezza	M											
				G											
		CORSE MARCIA E SORPASSO	insufficienza larghezza	M											
			eccesso larghezza	G											
		BANCHINA INTERNA	assenza o insufficiente larghezza	M											
				G											
		SPARTITRAFFICO	inadeguatezza organizzazione spazi	M											
			effetti negativi su visibilità	G											
		DISPOSITIVI DI RITENUTA	assenza	M											
				G											
			inadeguatezza tipologia	M											
				G											
			inadeguatezza transizioni e terminali	M											
				G											
			inadeguatezza vardi spartitraffico	M											
				G											
		SCARPATE	scorrettezza condizioni di installazione	M											
				G											
		SCARPATE	inefficienza manutenzione verde	M											
				G											
		SCARPATE	manca protezione pericoli	M											
				G											
DRENAGGI	inefficienza manutenzione	M													
		G													
RECINZIONE	inefficienza manutenzione	M													
		G													

Figura 30: Scheda 1_ISP_PD_EXDC relativa all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata parte 2

La seconda parte della scheda è strutturata per l'osservazione degli elementi variabili in modo continuo lungo lo sviluppo dell'asse stradale che dovranno essere valutati dall'ispettore ogni tratta elementare di 500 metri, attraverso il giudizio di gravità (M=medio o G=grave) per ciascun indicatore, che potrà essere graficizzato, come di seguito riportato a titolo esemplificativo, con una diversa colorazione per il giudizio medio (color giallo) e giudizio grave (color rosso).

Alle due schede si aggiunge una terza, che costituisce un quadro sinottico che situa i punti critici noti o rilevati ex novo in ispezione, intersezioni, opere di scavalco, gallerie e cantieri.

RIFERIMENTI ISPEZIONE PUNTUALE						
PUNTI CRITICI	PUNTO CRITICO NOTO PRIMA DELL'ISPEZIONE <i>(da individuare con P1, P2, ...Pn in corrispondenza della progressiva)</i>					
	PUNTO CRITICO RICONTRATO DURANTE L'ISPEZIONE <i>(da individuare con Pn+1, Pn+2, ... proseguendo la numerazione del rigo precedente, in corrispondenza della progressiva)</i>					
	INTERSEZIONE A LIVELLI SFALSI <i>(da individuare con LS1, LS2, ...LSn in corrispondenza della progressiva)</i>					
PUNTI SINGOLARI	OPERE DI SCAVALCAMENTO (VIADOTTI, PONTI E SOVRAPPASSI) E SOTTOPASSI <i>(da individuare con V1, V2, ...Vn in corrispondenza della progressiva)</i>					
	GALLERIA <i>(da individuare con G1, G2, ...Gn in corrispondenza della progressiva)</i>					
	CANTIERE <i>(da individuare con C1, C2, ...Cn in corrispondenza della progressiva)</i>					

PROGRESSIVA CHILOMETRICA									
0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,500	5,000
	P1							P2	
			P3	P4		P5			
	LS1			LS2					LS3
							C1		

Figura 31: Scheda 1_ISP_PD_EXDC relativa all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata parte 3

Circa le risultanze dell'attività, è prescritto che "l'analisi dell'ispettore si concretizza in un rapporto finale nel quale viene esplicitato se, a seguito dell'ispezione, non emerga alcuna criticità e, in caso contrario, se devono essere indicati i provvedimenti, gestionali o infrastrutturali, necessari per il miglioramento delle caratteristiche di sicurezza del tratto stradale omogeneo esaminato".

L'elaborato finale, redatto dai soggetti ispettori, prevede necessariamente l'articolazione in:

- prescrizioni: soluzioni a carenze gravi connesse al mancato rispetto di norme primarie di progettazione e gestione, che devono essere adottate e recepite dall'Ente gestore su richiesta specifica dell'OC;
- raccomandazioni: soluzioni che contribuiscono in modo efficace al miglioramento della sicurezza ma che richiedono una pianificazione e una programmazione congiunta tra OC ed Ente gestore;
- indicazioni: suggerimenti di facile attuazione da parte dell'Ente gestore.

1.13 Direttiva 2008/114/CE

La Direttiva individua i metodi per l'individuazione e la designazione delle infrastrutture critiche europee e risponde alla necessità strategica di migliorarne la protezione.

Dal punto di vista definitorio, le Infrastrutture Critiche sono costituite da strutture o sistemi essenziali per il mantenimento delle funzioni vitali della società, della sanità, della sicurezza e del benessere economico e sociale dei cittadini. Le infrastrutture critiche europee (ECI) sono infrastrutture critiche dei paesi dell'UE la cui perturbazione o distruzione potrebbe avere un impatto significativo su almeno due paesi dell'UE (ad esempio impianti per l'energia elettrica oppure oleodotti per il trasporto del petrolio).

Il settore del trasporto, e la rete stradale TERN in particolare, rientrano nell'oggetto di applicazione della Direttiva, ex art. 3, c. 3, come rappresentato nella seguente grafica.

Elenco dei settori di ECI

Settore	Sottosettore	
I. Energia	1. Elettricità	Infrastrutture e impianti per la produzione e la trasmissione di energia elettrica per la fornitura di elettricità
	2. Petrolio	Produzione, raffinazione, trattamento, stoccaggio e trasporto di petrolio attraverso oleodotti
	3. Gas	Produzione, raffinazione, trattamento, stoccaggio e trasporto di gas attraverso oleodotti Terminali GNL
II. Trasporti	4. Trasporto stradale 5. Trasporto ferroviario 6. Trasporto aereo 7. Vie di navigazione interna 8. Trasporto oceanico, trasporto marittimo a corto raggio e porti	

Figura 32: Elenco dei settori di ECI (Allegato I della Direttiva 2008/114/CE)

Ai sensi dell'art. 3 della Direttiva, l'analisi della vulnerabilità dell'ECI dovrebbe adottare metodi che considerino, quali indicatori di prestazione, cosiddetti criteri intersettoriali, costituiti da (art. 3, c. 2):

- "il criterio del numero di vittime (valutato in termini di numero potenziale di morti e feriti);
- il criterio delle conseguenze economiche (valutate in termini di entità delle perdite economiche e/o del deterioramento di prodotti o servizi, comprese le potenziali conseguenze ambientali);
- il criterio delle conseguenze per i cittadini (valutate in termini di impatto sulla fiducia dei cittadini, sofferenze fisiche e perturbazione della vita quotidiana, compresa la perdita di servizi essenziali)".

Per il miglioramento della protezione delle ECI, tra le varie responsabilità di supervisione, coordinamento e valutazione che sono attribuite agli Stati Nazionali e a soggetti gestori, è centrale l'obbligo di redazione del Piano di Sicurezza da parte dell'Operatore - PSO (corrispondente al Gestore dell'Infrastruttura).

Ai sensi dell'Allegato II della Direttiva, il PSO individua preliminarmente gli elementi più importanti dell'infrastruttura, e quindi sviluppa:

- l'analisi dei rischi che, basata sui diversi tipi di minacce più rilevanti, individua la vulnerabilità degli elementi e le possibili conseguenze del mancato funzionamento di ciascun elemento sulla funzionalità dell'intera infrastruttura;
- l'individuazione, la selezione e la priorità delle misure e procedure di sicurezza distinte in misure permanenti e misure ad applicazione graduata.

Le misure permanenti sono quelle che si prestano ad essere utilizzate in modo continuativo e comprendono:

- sistemi di protezione fisica (strumenti di rilevazione, controllo accessi, protezione elementi ed altre di prevenzione);
- predisposizioni organizzative per allertamento comprese le procedure di gestione delle crisi; - sistemi di controllo e verifica;
- sistemi di comunicazione;
- addestramento ed accrescimento della consapevolezza del personale;
- sistemi per garantire la migliore continuità del funzionamento dei supporti informatici.

La norma ha quindi lo scopo di introdurre nell'ordinamento dei vari Paesi modalità di cogente gestione della vulnerabilità delle ECI, con ciò intendendo:

- strumenti di valutazione dell'attesa indisponibilità delle infrastrutture strategiche;
- strumenti per la gestione delle recovery strategy;

- modalità di implementazione delle caratteristiche rilevanti delle ECI finalizzate a ridurre la vulnerabilità (e quindi a incrementarne la resilienza).

Questi scopi di analisi e le finalità gestionali enunciate non propongono metodi concreti per assolvere a tali responsabilità, ma stabiliscono il principio – la cui pratica declinazione è nelle competenze dei singoli Stati membri – di riduzione massima (la cui misura di accettabilità è comunque rimessa al Paese membro competente) delle indisponibilità attese in relazione a servizi pubblici essenziali, caratterizzati da grande rilevanza e per le quali, in corrispondenza ad una perdita di funzione, si determinano impatti gravi sulle primarie libertà e sui fondamentali diritti di cittadinanza.

1.14 D.Lgs. 61/2011

Il Decreto Legislativo 61/2011 recepisce per l'Italia la direttiva 2008/118/CE, adattando al caso italiano le previsioni contenute nel testo recepito, e così attribuendo, nella organizzazione socio – economico – normativa italiana, le responsabilità dei processi generali (di analisi, valutazione e gestione) già visti e definiti nella fonte europea.

Rispetto alla procedura di valutazione della vulnerabilità e delle conseguenze attese dalla perdita di funzione, in relazione in particolare a quanto definito circa i criteri intersettoriali già visti, la norma italiana stabilisce che le analisi relative devono prevedere per ogni infrastruttura *“diverse ipotesi, tenendo conto della disponibilità di alternative, delle possibili diverse durate del danneggiamento e dei tempi per il ripristino della funzionalità”*, così prefigurando una analisi di vulnerabilità che tende alla valutazione completa di una analisi di rischio vera e propria. E in effetti, considerando il primo dei citati criteri intersettoriali, che fa riferimento al danno atteso sulla componente costituita da cittadini e utenti del servizio e specificamente orientata al calcolo del numero di vittime corrispondenti al verificarsi dei fenomeni, la previsione di legge sembra in tutto corrispondente ad una valutazione di QRA applicata all'IC.

Tuttavia, va osservato che tale valutazione integra la sostanza del solo primo criterio intersettoriale, al quale si affiancano inoltre le valutazioni relative alle conseguenze economiche e a quelle sociali.

L'attività prevista in capo all'Operatore, in genere tutelata da classificazione (quando non da segretezza) è quindi sostanzialmente priva di una linea guida applicativa minima, che restituisca una procedura di valutazione standardizzata utile alla qualificazione comparativa delle vulnerabilità intersettoriali o infrasettoriali.

1.15 DPR 151/2011

L'emanazione del DPR del 1.8.2011 n. 151, *Nuovo regolamento di prevenzioni incendi*, ha ricompreso tra le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi anche le gallerie di lunghezza superiore a 500 metri e quelle ferroviarie superiori a 2000 metri [punto 80 - Allegato I].

ALLEGATO I al D.P.R. n. 151/2011 (di cui all'articolo 2, comma 2)
ELENCO DELLE ATTIVITÀ SOGGETTE ALLE VISITE E AI CONTROLLI DI PREVENZIONE INCENDI

N.	[*]	ATTIVITÀ	CATEGORIA		
			A	B	C
80	-	Gallerie stradali di lunghezza superiore a 500 m e ferroviarie superiori a 2000 m	tutte		

Figura 33: Estratto dell'Allegato 1 del DPR 151/2011

Il decreto definisce le attività soggette al controllo di prevenzione incendi suddividendole in tre categorie (A, B e C) in relazione al livello del rischio incendio. Nella Categoria A ricadono quelle attività dotate di specifica regola tecnica di prevenzioni incendi. In questa categoria rientrano le gallerie di lunghezza superiore a 500 metri.

Per queste non è prevista la valutazione del progetto, ma il responsabile dell'attività è tenuto a presentare al comando provinciale dei vigili del fuoco, la SCIA, ovvero la Segnalazione Certificata di Inizio Attività. La ricevuta di avvenuta presentazione della Scia costituisce titolo abilitativo all'esercizio dell'attività ai soli fini antincendio.

Per le attività che ricadono nelle categorie B e C questa deve essere presentata solo dopo aver ottenuto l'approvazione del progetto.

Per quanto concerne le gallerie stradali e al fine di fornire un guida ai gestori delle gallerie per l'attuazione degli adempimenti previsti dal decreto è stata emanata da parte del Ministero dell'interno insieme con il Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, la Circolare n° 1 DIP.VVF del 29/01/2013. Quest'ultima riportati i termini e le modalità per la presentazione della SCIA, suddivisi per gallerie già esistenti e non, gallerie conformi o no alle disposizioni contenute nel Dlgs 264/06.

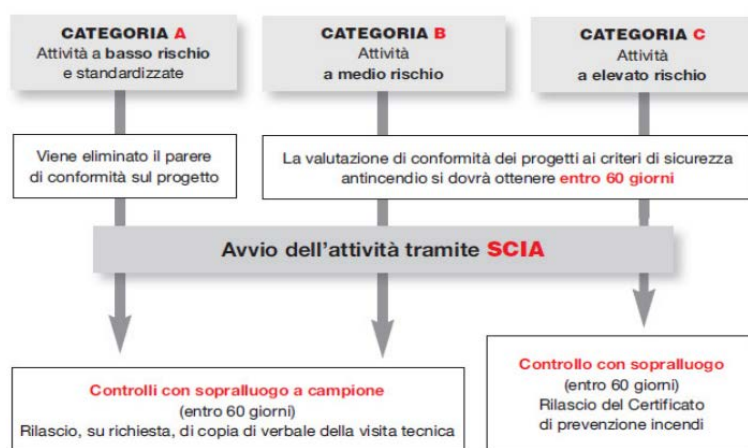


Figura 34: Procedure di prevenzione incendi per le tre categorie di attività

In particolare, per le gallerie esistenti:

- di lunghezza superiore a 500 metri ricadenti nella rete TERN che non risultano conformi ai requisiti del D.Lgs 264/06, i gestori entro il 12 febbraio del 2013 devono presentare al Comando provinciale dei vigili del fuoco: una scheda asseverata contenente le caratteristiche, le dotazioni antincendio esistenti e una relazione tecnica in cui viene riportato il programma degli interventi di adeguamenti da realizzare entro i termini stabiliti dal D.lgs.264/06;
- per quelle conformi il limite per presentare la Scia è fissato al 7 ottobre del 2013;
- per le gallerie non ricadenti nella rete TERN gli adempimenti sono sospesi in attesa dell'emissione di norme tecniche per la sicurezza delle gallerie stradali;

Per le gallerie che a seguito dei lavori di adeguamento risultano conformi, la Scia deve essere presentata entro sei mesi dalla data del completamento degli adeguamenti stessi, mentre per le gallerie di nuova realizzazione questa deve essere presentata prima dell'esercizio dell'attività.

1.16 Conclusioni

L'analisi di rischio quantitativa costituisce il metodo consolidato e normativamente imposto, a livello italiano, per la progettazione e la verifica del livello di sicurezza delle gallerie stradali di rete TERN (Trans European Network Road) di lunghezza superiore a 500 m (d. Lgs. 264/2006, recepimento della direttiva 2004/54/CE). Scelte diverse sono state fatte da altri Paesi europei destinatari della Direttiva. In nessun altro Paese è richiesta una applicazione sistematica della valutazione quantitativa del rischio come in Italia; ulteriormente l'Italia è l'unico Paese che ha fatto la scelta di adottare la funzione retrocumulata sul piano F-N quale indicatore di rischio sul quale operare la verifica di compliance (seppure per le sole gallerie speciali). Tale osservazione sarà particolarmente rilevante alla luce di quanto verrà esposto, nel capitolo dedicato, circa la vulnerabilità, in termini di stabilità e consistenza statistica in merito a tale indicatore.

L'Allegato III del Decreto Legislativo 264/2006 non esplicita modalità di trattamento dei dati da operare per la stima degli eventi iniziatori, né fornisce linee guida applicative per la migliore applicazione delle varie fasi dell'analisi richiesta. Questa carenza è certamente tra le cause di quanto già evidenziato in Premessa circa la qualità delle analisi prodotte in Italia.

In altri Paesi in sede di conversione della Direttiva Europea 2004/54/CE, l'ambizione ad una valutazione completa, quantitativa e unitaria è stata evidentemente contenuta, e, pur nel coerente quadro di riferimento della Direttiva, maggiore attenzione è stata riservata alla specifica modalità di analisi dei dati e di valutazione esperta delle misure di sicurezza (è il caso della Francia, ad esempio, nella cui legislazione è specificato a quale orizzonte temporale di dati di incidentalità fare riferimento, e come valorizzare il giudizio esperto collettivo sulle opere di maggiore rilevanza, nonché con riferimento alla necessità di un aggiornamento delle valutazioni di sicurezza in conseguenza di ogni incidente maggiore occorso).

La rete TERN complementare alle gallerie di lunghezza superiore a 500 m è d'altronde progettata e verificata attraverso procedure di giudizio esperto strutturato conformemente alle previsioni del D.Lgs. 35/2011, recepimento della direttiva 2008/96/CE. La LG (Decreto Ministeriale 2/5/2012) sviluppa, in verità, una lunga analisi di procedura e di merito per la standardizzazione di valutazioni esperte che supportano compiutamente il personale tecnico chiamato ad effettuare le ispezioni, il quale, oltre ad essere indipendente nell'esercizio delle proprie responsabilità, deve essere inoltre competente e appositamente formato (formazione invece non richiesta per il redattore della QRA in applicazione dell'art. 13 ed Allegato 3 del D. Lgs. 264/2006). Il relevantissimo valore aggiunto delle LG è inoltre la standardizzazione del processo di selezione dei dati in analisi e della procedura di rilievo di campo (fase ispettiva concreta), e l'applicazione di uno standard di analisi *before-after* che risponde alle migliori tecniche di analisi disponibili per le valutazioni quantitative di efficacia sugli interventi di miglioramento stradale, come risulterà evidente dall'analisi della review sul fenomeno dell'incidentalità riportata nel capitolo dedicato.

Il D. Lgs. 61/2011 (attuazione della Direttiva 2008/114/CE) qualifica infine le strade di rete TERN come infrastrutture critiche europee, imponendo al gestore la valutazione della vulnerabilità (della resilienza) del sistema a pericoli esogeni ed endogeni, e l'adozione di opportuni programmi di implementazione della prestazione, ottenuta attraverso l'incremento della robustezza (capacità del sistema di resistere agli eventi avversi mantenendo la funzione essenziale) e la riduzione del tempo di resa in pristino della funzione in caso di fuori servizio. Rispetto a tale previsione di legge, che comprende l'infrastruttura stradale di rete TERN (Trans European Road Network) in quanto *"essenziale per il mantenimento delle funzioni vitali della società, della salute, della sicurezza e del benessere economico e sociale dei cittadini ed il cui danneggiamento o la cui distruzione avrebbe un impatto significativo [...]"*¹, l'obbligo di gestione della continuità (resilienza) del servizio svolto dalla rete, posto in capo al Gestore, si concretizza nella predisposizione di un Piano di Sicurezza

¹ cfr c. 1, let. a) art. 2 Direttiva 2008/114/CE

dell'Operatore (PSO) non meglio specificato in contenuti e modalità di analisi, con l'effetto di una sostanziale variabilità degli strumenti adottati allo scopo dai vari Gestori.

In Italia la gestione della sicurezza delle gallerie stradali è inoltre rilevante ai sensi del DPR 151/2011, che ha inserito le gallerie stradali, di lunghezza superiore a 500 m, tra le attività soggette a controllo di prevenzione incendi, in un sistema compartecipato di verifica di congruità ed efficacia delle misure proposte che vede un intreccio di competenze tra il soggetto tecnico ministeriale (Commissione gallerie stradali) e i Comandi competenti per territorio dei Vigili del Fuoco.

2 Concetti generali dell'Analisi di Rischio Quantitativa

Il processo di valutazione strutturato nell'Analisi di Rischio Quantitativa (Quantitative Risk Analysis, QRA) comprende metodi statistici, inferenziali e logici che hanno lo scopo di caratterizzare, attraverso assunzioni trasparenti e consistenti, le incertezze che caratterizzano un sistema.

Il metodo si qualifica come metodo di stima, ed è quindi affetto da incomprimibili incertezze nelle assunzioni e nelle valutazioni.

Il capitolo si apre con un inquadramento generale dei metodi di affidabilità e sicurezza, sviluppa quindi una review sui metodi strutturati di QRA e si chiude con una analisi delle incertezze e la resa in evidenza delle vulnerabilità tipiche a cui sono esposti i metodi, con particolare rilevanza posta sulla consistenza e stabilità statistica degli Indicatori di Rischio, che costituiscono i valori di misura della sicurezza di un sistema complesso.

2.1 Affidabilità e Sicurezza

L'affidabilità nel funzionamento e la sicurezza in caso di malfunzionamento costituiscono requisiti prestazionali fondamentali di qualunque sistema ingegneristico. Le teorie dell'affidabilità e della sicurezza hanno lo scopo, rispettivamente, di fornire metodi per valutare se un componente o un sistema sarà funzionante per la durata (o l'occasione) in cui l'utilizzatore lo richiederà e, in caso contrario, se il malfunzionamento costituirà pericolo per persone o cose.

Si definisce:

- *sistema*: gruppo di elementi connessi reciprocamente che compiono una funzione;
- *pericolo*: qualità potenziale di un sistema di generare danno;
- *danno*: riduzione misurabile di valore o valore di ripristino o valore di liquidazione; comprende, nel caso di sistemi produttivi, anche l'effetto di mancato guadagno per fuori servizio del sistema;
- *guasto*: condizione di impossibilità di funzionamento atteso del sistema;
- *incidente*: condizione di guasto evoluta che realizza, attraverso una sequenza di eventi più o meno complessa, un flusso del pericolo (e quindi danno, D) verso valori esposti (beni materiali costituiti dal sistema stesso o presenti al contorno, persone);
- *affidabilità*: attitudine di un sistema ad adempiere alla funzione richiesta nelle condizioni fissate e per un periodo di tempo stabilito.
- *rischio*: misura dell'effettiva concretizzazione di un potenziale di pericolo, dimensionalmente definito dal prodotto tra la probabilità di realizzazione dell'incidente e il danno conseguente.

Nella trattazione corrente la centralità concettuale è assunta dal fenomeno del *guasto*, eminentemente aleatorio, la cui trattazione richiede un approccio probabilistico. Le tecniche di analisi e gestione dell'affidabilità hanno lo scopo di progettare la probabilità di guasto di un sistema attraverso l'introduzione di ridondanze di sistema, politiche di rodaggio e di manutenzione preventiva dei componenti, nonché gestione della manutenibilità in caso di guasto.

Le tecniche di analisi e gestione del rischio di un sistema hanno lo scopo di progettare la sicurezza di un sistema attraverso la valutazione del danno atteso (conseguenze in caso di guasto e di sua evoluzione in incidente) e la gestione di affidabilità e prestazioni di sistemi di produzione e sistemi di sicurezza per l'ottimizzazione e il controllo delle esternalità negative.

Definendo con \mathcal{R} la configurazione di un sistema in condizione funzionante (tale cioè da rispondere alle necessità di scopo nelle condizioni fissate²) e con \mathcal{R}^* la condizione di guasto, con \mathcal{S} la configurazione sicura (tale cioè di non esprimere effetti negativi verso persone o beni esposti³) e con \mathcal{S}^* la condizione di pericolo, l'analisi del livello di sicurezza del sistema si articola:

- nella valutazione affidabilistica, finalizzata a stimare la probabilità della configurazione \mathcal{R} , pari a P_R (e quindi del suo complemento $P_f = 1 - P_R$), operando secondo metodologie riconducibili all'approccio RAMS;
- nella valutazione qualitativa / quantitativa del rischio, finalizzata a valutare gli esiti della realizzazione di configurazioni \mathcal{R}^* ; in particolare valutando le condizioni evolutive del guasto verso stati \mathcal{S} o \mathcal{S}^* , attraverso la qualificazione/quantificazione degli scenari finali in termini di probabilità di accadimento e di danno conseguente, secondo metodologie riconducibili all'approccio Risk Analysis.

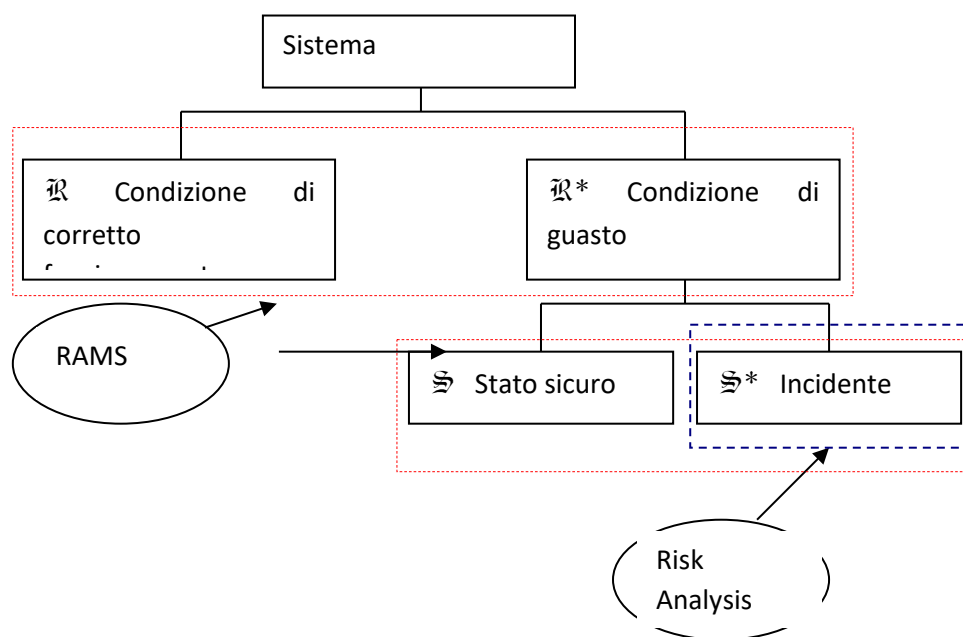


Figura 35: partizione logica dell'analisi di sicurezza di un sistema

2.1.1 Ruolo dell'affidabilità nella progettazione dei sistemi per la mobilità

La moderna teoria dell'affidabilità si integra nell'approccio olistico della teoria della *dependability*, che definisce l'insieme delle proprietà che descrivono la disponibilità in condizione di corretto funzionamento di un componente o di un sistema ed i fattori che la condizionano. La *dependability* (fidatezza, sicurezza di funzionamento) è il termine collettivo utilizzato per descrivere le prestazioni di disponibilità ed i fattori che le condizionano: affidabilità, disponibilità, manutenibilità, sicurezza.

Tale approccio unitario, che prende il nome di **RAMS**⁴, esprime l'affidabilità del corretto funzionamento di un sistema in rapporto a:

² Si anticipa che per *condizioni fissate* devono intendersi anche le condizioni di sicurezza nel funzionamento, mentre non sono comprese le condizioni di sicurezza nel malfunzionamento.

³ Più correttamente, anticipando definizioni successive, per sicurezza si intende lo stato in cui il rischio (cioè la probabilità di danno a persone o cose) è inferiore ad una soglia di accettabilità.

⁴ UNI EN ISO 8402

- **Reliability (affidabilità):** attitudine di un sistema ad adempiere alla funzione richiesta nelle condizioni fissate e per un periodo di tempo stabilito;
- **Availability (disponibilità):** attitudine di un sistema ad essere in grado di svolgere una funzione richiesta a un dato istante o durante un dato intervallo di tempo, in condizioni determinate, supponendo che siano assicurati i mezzi esterni eventualmente necessari; rispetto all'affidabilità tale attitudine risulta condizionata dai tempi di riparazione in caso di guasto;
- **Maintenability (manutenibilità):** attitudine di un sistema, nelle condizioni specificate di uso, ad essere conservato o ripristinato in uno stato nel quale può adempiere alle funzioni richieste, quando la manutenzione è espletata nelle condizioni specificate e usando le procedure ed i mezzi prescritti;
- **Safety (sicurezza):** stato in cui il rischio di danno alle persone o alle cose è limitato ad un livello accettabile.

2.1.2 Affidabilità del componente: il guasto

Nell'ambito della definizione fornita di affidabilità, assume rilevanza centrale la definizione del modello analitico rappresentativo del fenomeno del guasto.

Nella teoria dell'affidabilità si distinguono tre tipi fondamentali di guasti spontanei:

- **guasti infantili:** caratteristici del periodo iniziale della vita di un componente; nella gran parte dei casi sono il risultato dell'inadeguatezza delle tecniche di costruzione e di controllo qualità durante il processo di produzione; l'approccio preventivo efficace al controllo di tali guasti consiste in un maggior controllo di qualità del processo produttivo o nell'introduzione di una fase di rodaggio degli elementi prodotti al fine di scartare quelli viziati;
- **guasti per usura/fatica:** sintomatici del progressivo invecchiamento dei componenti; si possono prevenire attraverso l'introduzione di politiche di manutenzione programmata;
- **guasti casuali:** provocati da improvvise accumulazioni di sollecitazione, oltre la resistenza massima di progetto del componente, costituiscono la quota parte di inaffidabilità caratteristica intrinseca del progetto del componente; si verificano casualmente, ma la frequenza di guasto considerata su periodi di tempo sufficientemente lunghi è pressochè costante nella maggior parte dei casi reali.

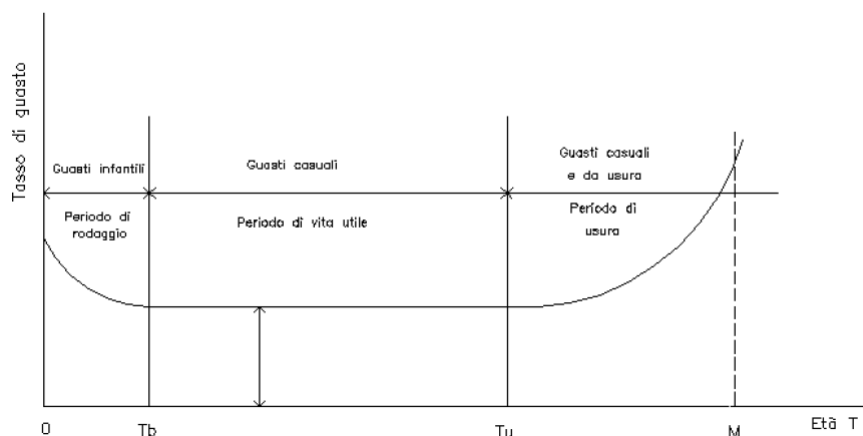


Figura 36: tipologie di guasto in funzione del tempo di funzionamento

Facendo riferimento alle configurazioni di sistema \mathcal{R} (affidabile) e \mathcal{S} (sicura), è possibile selezionare i guasti in relazione all'effetto sulla sicurezza definendo:

- **guasti critici**, quelli che determinano configurazioni S^* ;
- **guasti primari**, quelli che determinano configurazioni R^* ;
- **guasti secondari**, quelli che costituiscono solo un degrado della condizione di massima efficienza del sistema.

Il modello di guasto si ricava in generale in base ai rilievi statistici in esercizio o da risultati di prove funzionali in laboratorio, effettuate su una popolazione omogenea rappresentativa del sistema elementare considerato.

Un sistema complesso può essere dotato di apparecchiature che svolgono continuamente le funzioni alle quali sono preposte (*componenti a funzionamento continuo*) e di apparecchiature (anche le stesse) *on demand* (*componenti intervenivi*) il cui corretto funzionamento, limitatamente ad alcune loro funzioni, è richiesto in specifici istanti di tempo. Si pensi al guasto di un interruttore in condizioni di normale assetto o di comando di intervento.

Il grado di affidabilità di un componente, in relazione a tali modalità operative e/o di guasto on demand, dovrà essere opportunamente normalizzato:

- per i componenti on demand: facendo riferimento al numero di operazioni fallite rispetto al numero di operazioni correttamente svolte dall'apparecchiatura;
- per i componenti a funzionamento continuo: facendo riferimento al tempo medio di corretto funzionamento fino all'occorrenza del guasto.

Introducendo la trattazione relativa al caso di componenti a funzionamento continuo, i dati rilevati si presentano come una serie di tempi di guasto; da essi si può ricavare la distribuzione dei guasti occorsi in funzione del tempo, da assumersi come stima della distribuzione della densità di probabilità di guasto in funzione del tempo.

Un primo semplice modello affidabilistico prevede per un componente due soli possibili stati: funzionante e guasto. Introduciamo il concetto di tasso di guasto:

- N Numero di componenti in esame nel tempo di osservazione⁵;
- T Tempo di osservazione;
- N_G Numero di componenti guasti al termine del tempo di osservazione;

Il tasso di guasto osservato è pari al valore delle occorrenze di guasto normalizzato rispetto al campione in funzionamento:

$$\lambda_{oss} = \frac{N_G}{N \cdot T} \quad [2.1]$$

La stima di λ_{oss} tende al λ teorico al crescere del tempo di osservazione.

La grandezza MTBF (mean time between failures) rappresenta il tempo medio tra due guasti successivi del sistema/componente. Il valore osservato di tale parametro, nel caso in cui sia trascurabile il tempo di riparazione, è

$$MTBF = \frac{N \cdot T}{N_G} = \frac{1}{\lambda_{oss}} \quad [2.2]$$

La probabilità di sopravvivenza al tempo t o affidabilità al tempo t [$R(t)$] può definirsi come la probabilità che un ente svolga correttamente la sua funzione in tutto l'arco di tempo che va dall'istante di inizio funzionamento (0) all'istante t ovvero, nell'ipotesi di componenti identici, come percentuale degli enti funzionanti su una determinata popolazione.

⁵ Si consideri che all'occorrenza del guasto, allo scopo di mantenere il campione di consistenza costante, il componente guasto deve essere rimpiazzato con un nuovo componente funzionante. Analogamente i componenti devono essere opportunamente testati al fine di ridurre opportunamente l'incidenza di guasti infantili e devono essere oggetto di manutenzione programmata al fine di controllare opportunamente l'incidenza di guasti per fatica.

Una grandezza di particolare interesse è la disponibilità $A(t)$, cioè la *probabilità di funzionamento corretto* all'istante t .

Definendo t_0 l'istante di inizio di funzionamento del sistema/componente, sia:

- t : *variabile aleatoria tempo al guasto del sistema/componente*
- $f(t)$: *funzione densità di probabilità di guasto.*

La $f(t)$ quindi esprime la probabilità di guasto al tempo t .

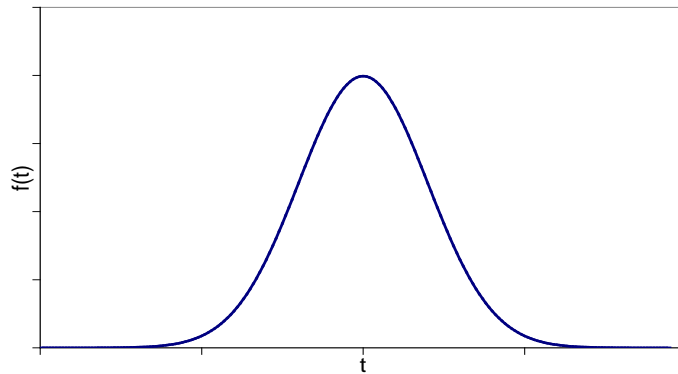


Figura 37: rappresentazione della funzione continua densità di probabilità di guasto

L'integrale della $f(t)$ esprime la probabilità che il guasto avvenga nell'intervallo di tempo $[0, t]$. Nella terminologia affidabilistica la funzione descritta è denominata *inaffidabilità* del componente al tempo t :

$$Q(t) = \int_{t_0}^t f(t) dt \quad [2.3]$$

Per contro, il complemento ad 1 dell'integrale della $f(t)$ rappresenta $R(t)$, affidabilità del componente al tempo t , avendo sfruttato la proprietà di $f(t)$ per la quale $\int_{t_0}^{\infty} f(t) dt = 1$

Vale allora la relazione:

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_{t_0}^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad [2.4]$$

Graficamente, rappresentando la funzione $f(t)$ e la generica retta $t=t^*$, l'area sottesa dalla curva a sinistra di t^* costituisce l'inaffidabilità del componente a $t=t^*$ e l'area sottesa dalla curva a destra di t^* la sua affidabilità.

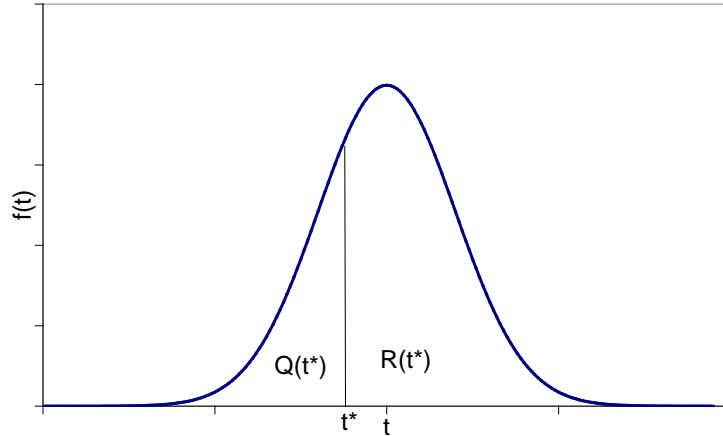


Figura 38: rappresentazione della relazione integrale tra $f(t)$, $Q(t)$ e $R(t)$.

Procedendo alla definizione sperimentale dell'affidabilità/inaffidabilità in coerenza con il procedimento di prova di laboratorio come definito nel paragrafo precedente, si ha:

$$R(t) = \frac{N_{tot} - N(t)}{N_{tot}} = 1 - \frac{N(t)}{N_{tot}} \quad [2.5]$$

$$Q(t) = \frac{N(t)}{N_{tot}} \quad [2.6]$$

e differenziando:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{1}{N_{tot}} \cdot \frac{dN(t)}{dt} = f(t) \quad [2.7]$$

Introducendo la definizione in forma semplificata esponenziale del tasso di guasto:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{1}{N_{tot} - N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt} = \frac{N_{tot}}{N_{tot}} \cdot \frac{1}{N_{tot} - N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt} = \\ &= \frac{N_{tot}}{N_{tot} - N(t)} \cdot \frac{1}{N_{tot}} \cdot \frac{dN(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} \cdot f(t) \end{aligned} \quad [2.8]$$

Questa equazione permette di affermare che $f(0) = \lambda(0)$ poichè $R(0) = 1$. Inoltre essa mostra che la funzione tasso di guasto è una funzione condizionale della funzione densità di guasto. Ciò significa che la funzione densità di guasto permette il calcolo della probabilità di guasto in un qualsiasi periodo di tempo mentre la funzione tasso di guasto consente il calcolo della probabilità di guasto nel periodo di tempo successivo all'istante t supposto il componente sopravvissuto al tempo t .

Essendo:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad [2.9]$$

si ha:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow \int_0^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t) = \int_0^t -\lambda(t) dt \quad [2.10]$$

e quindi:

$$\ln R(t) = \int_0^t -\lambda(t)dt \quad \Leftrightarrow \quad R(t) = e^{\int_0^t -\lambda(t)dt} \quad [2.11]$$

Nel caso particolare in cui λ è *costante e indipendente dal tempo*, l'equazione precedente si semplifica:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad [2.12]$$

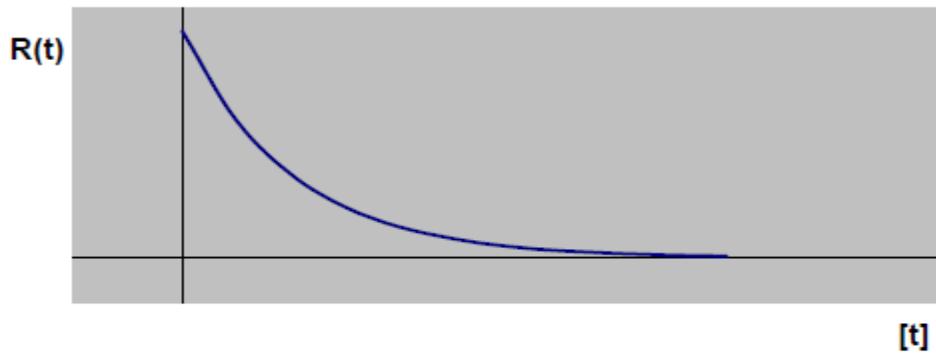


Figura 39: andamento della $R(t)$ nel modello esponenziale

Questo caso è noto come *modello esponenziale*

Se $R(t) = e^{-\lambda t}$, allora sarà anche:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad [2.13]$$

Ciò implica che se il componente è sopravvissuto fino a t , la probabilità di guasto nel successivo dt (λdt) non dipende da t ovvero *non dipende dalla storia del componente*.

Si consideri che l'ipotesi di costanza e indipendenza di λ da t costituisce un modello approssimato: si ricorda, in tal senso, che l'andamento caratteristico del tasso di guasto $\lambda(t)$ è quello già riportato e descritto in Figura 36.

Se il sistema funziona in modo che si possa provvedere alla riparazione o al ricambio dei componenti, occorre introdurre la distribuzione probabilistica dei tempi di riparazione (o durata dei guasti). In questo caso il parametro medio significativo è l' *MTTR, mean time to repair*, cioè il tempo medio che intercorre tra l'istante in cui il componente/sistema si guasta e l'istante in cui viene riportato in servizio.

Analogamente al tasso di guasto λ si possono definire il *tasso di riparazione* μ ed il suo inverso r (*tempo medio di riparazione*), essendo TR il tempo totale necessario ad effettuare le riparazioni:

$$\mu = \frac{N(t)}{TR} \quad [2.14]$$

$$r = \frac{TR}{N(t)} = \frac{1}{\mu} \quad [2.15]$$

La probabilità di un elemento riparabile di essere funzionante espressa attraverso le suddette grandezze viene allora chiamata *disponibilità*.

Per elementi a più di due stati occorre definire le funzioni che caratterizzano gli stati e le possibili transizioni tra gli stati. In generale, in questi casi di complessità di sistema, l'approccio analitico richiesto è ulteriormente strutturato.

2.1.3 Metodi di valutazione analitica dell'affidabilità di sistema

Lo scopo ultimo dell'analisi affidabilistica è quello di individuare la probabilità di corretto funzionamento di un sistema, cioè di un complesso di componenti, allo scopo di ottimizzarne le prestazioni.

L'ottenimento dell'affidabilità di un sistema complesso è ottenuto, a partire dalle caratteristiche dei componenti, attraverso metodi dell'affidabilità combinatoria. In questi metodi il valore dell'affidabilità del sistema viene ricavato dall'affidabilità degli elementi mediante l'applicazione di semplici modelli probabilistici, di calcolo combinatorio e di logica dei grafi per descrivere le combinazioni di guasto e le connessioni tra gli elementi. Tali metodi si verificano sufficientemente validi finché il sistema è relativamente semplice, a pochi elementi, con due stati possibili per elemento (*funzionante* e *non funzionante*) e si può trascurare la correlazione tra i guasti.

Gli schemi di combinazione semplice utilizzabili sono:

- *combinazione serie;*
- *combinazione parallelo.*

Se il verificarsi di un qualunque guasto dei componenti del sistema provoca il fuori servizio dello stesso, i detti componenti potranno essere considerati in serie affidabilistica. Se viceversa soltanto la contemporaneità dei guasti di tutti i componenti costituenti il sistema ne determina il fuori servizio, tali componenti potranno essere considerati in parallelo affidabilistico.

Si riportano nel seguito le espressioni matematiche che consentono di risolvere tali semplici sistemi:

Serie

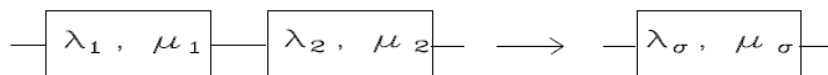


Figura 40: schema elementare di collegamento in serie

$$\lambda_\sigma = \lambda_1 + \lambda_2 \quad [2.16]$$

$$r_\sigma = \frac{1}{\mu_\sigma} = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad [2.17]$$

Parallelo

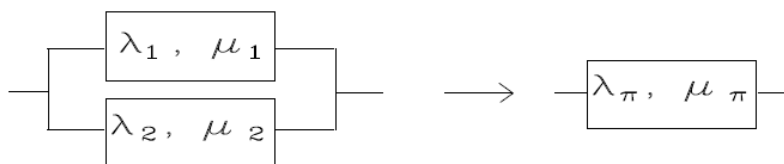


Figura 41: schema elementare di collegamento in parallelo

$$\mu_{\pi} = \mu_1 + \mu_2 \quad [2.18]$$

$$\lambda_{\pi} = \frac{1}{\mu_{\pi}} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2} \quad [2.19]$$

Al crescere della complessità del sistema la soluzione risulta meno immediata. In questi casi è utile riferirsi ai metodi risolutivi *cut-set* e *tie-set*.

Un tipico esempio di tali sistemi è quello riportato nella figura seguente, che rappresenta il diagramma funzionale di un sistema fisico dotato di adeguate ridondanze al fine di consentire il flusso ingresso-uscita (ad esempio acqua, energia elettrica, etc..).

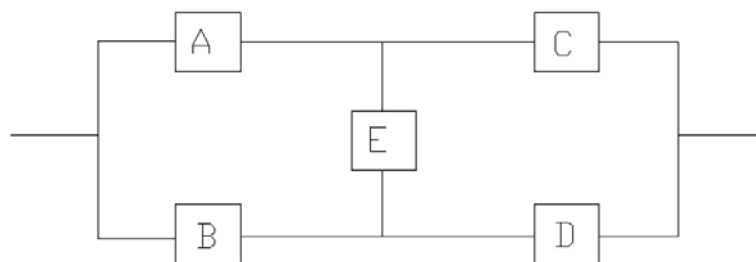


Figura 42: configurazione di sistema complesso, non riducibile a collegamento serie o parallelo (Bridge)

Immediatamente emerge l'impossibilità di ricondurre immediatamente il caso a complessi di sistemi elementari serie/parallelo. La maggior parte delle metodologie di analisi che andiamo a presentare si basano sulla trasformazione del funzionamento logico dei sistemi o della loro topologia in semplici strutture costituite da serie e/o paralleli di componenti, rami, percorsi.

Con riferimento alla configurazione bridge riportata alla precedente figura si osserva che il sistema funziona correttamente se almeno uno dei percorsi AC, BD, AED e BEC è funzionante. Dividendo il sistema considerato nei due sottosistemi SS1 e SS2, per i quali si è fatta l'ipotesi che il componente E sia rispettivamente funzionante e guasto, è possibile applicare le semplici leggi dei sistemi serie/parallelo ed il metodo delle probabilità condizionate per arrivare a determinare l'affidabilità del sistema complesso. In tale ottica il sistema è scomponibile nei due sistemi mutuamente esclusivi riportati, ciascuno costituito da schemi di collegamento semplice serie / parallelo.

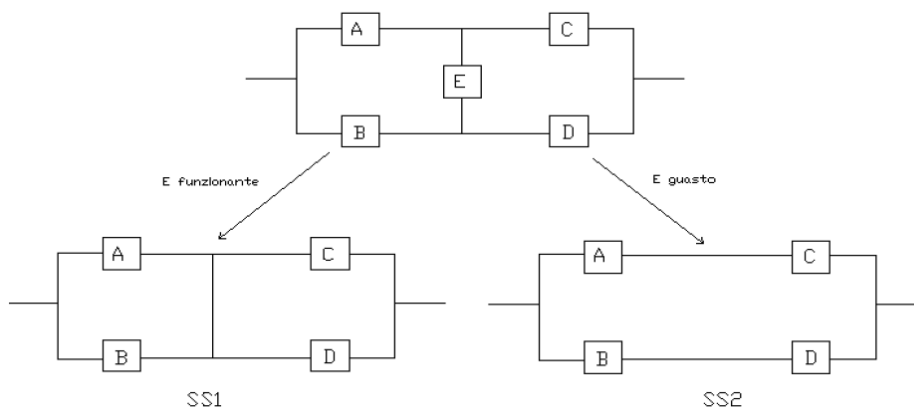


Figura 43: risoluzione dello schema bridge in schemi serie / parallelo

Nel caso in cui dopo una prima suddivisione i sottosistemi generati non risultino costituiti da semplici serie e paralleli si procede applicando iterativamente il metodo sino all'ottenimento di tale condizione.

Un metodo risolutivo particolarmente adatto all'implementazione di calcolo automatica è rappresentato dal metodo del *cut set*. La sua applicazione consiste nel focalizzare le diverse modalità di guasto per le quali un sistema può andare fuori servizio.

Un *cut set* minimo è un insieme di componenti il cui guasto determina il fuori servizio del sistema, e tale che il corretto funzionamento di uno qualsiasi degli elementi dell'insieme comporta il non guasto del sistema.

A titolo d'esempio si riportano i *cut set* minimi relativi al sistema già considerato precedentemente.

Configurazione bridge	
cut set minimi	componenti del cut set
1	AB
2	CD
3	AED
4	BEC

Tabella 5: *Cut set minimi della configurazione Bridge*

Dalle definizioni appena date emerge chiaramente che gli elementi di un *cut set* minimo sono connessi in parallelo. Inoltre, il sistema è fuori servizio se uno qualunque dei *cut set* minimi individuati presenta tutti i componenti guasti; pertanto ogni *cut set* minimo è collegato in serie con gli altri.

Nel caso specifico della configurazione bridge, l'applicazione di tale metodo conduce al diagramma di affidabilità riportato.

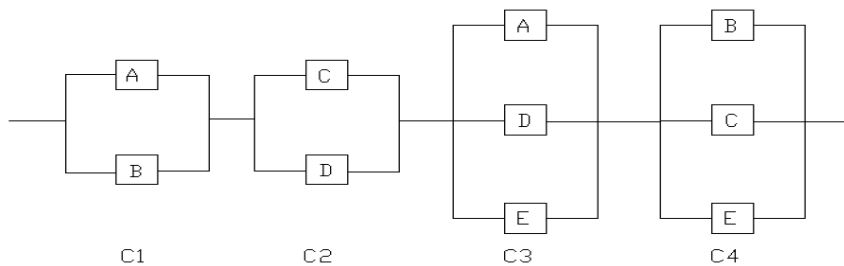


Figura 44: *schema di collegamento funzionale dei cut set minimi della configurazione Bridge*

Una modalità di semplificazione del sistema consiste nel trascurare i *cut set* di ordine superiore ad un valore prefissato. Tale tecnica si basa sull'ipotesi che i *cut set* minimi di ordine superiore siano anche quelli meno probabili. Questa ipotesi è accettabile quando le affidabilità dei singoli componenti sono dello stesso ordine di grandezza.

2.1.4 Metodi di prova e ottimizzazione dell'affidabilità: il progetto

Le caratteristiche di affidabilità degli elementi possono essere valutate non soltanto a posteriori mediante i rilievi statistici, ma anche in sede di studio e sviluppo dei prototipi mediante prove adatte. Di tali prove le più importanti sono le cosiddette "prove funzionali", concepite per simulare in modo accelerato, su modelli rappresentativi, l'effetto concomitante delle sollecitazioni di esercizio e determinare l'attitudine alla capacità

resistente nel tempo. Tali prove costituiscono un valido strumento per progettare elementi con le desiderate caratteristiche di affidabilità al minor costo.

Un problema di grande interesse è quello di definire il grado di affidabilità che si deve attribuire agli elementi di un sistema. In generale l'affidabilità di sistema è una prestazione che dipende dall'affidabilità della struttura di connessione dei suoi componenti. Per riflettere compiutamente sul caso, si consideri la formula di affidabilità composta dei sistemi serie e parallelo: a parità di costo delle affidabilità elementari, il sistema parallelo è ottimamente implementato quando si aumenta l'affidabilità del componente più affidabile, mentre il sistema serie quando si aumenta l'affidabilità del componente meno affidabile.

È chiaro che il costo di un elemento cresce col grado di affidabilità richiesto, e oltre un certo limite questo aumento diventa proibitivo senza che aumenti sensibilmente il beneficio sul sistema. I gradi di affidabilità degli elementi sono grandezze che devono essere determinate in relazione all'affidabilità ottima del sistema. Non è quindi corretto per un elemento del sistema stabilire a priori un certo grado di affidabilità senza pensare al sistema in cui è inserito e di cui concorre a determinare l'affidabilità.

Gli elementi del sistema devono essere tenuti in efficienza e essere riparati o sostituiti; è il problema della manutenzione che assorbe una importante parte del lavoro e una sensibile quota del bilancio. Tale problema ha due aspetti fondamentali: gli elementi del sistema devono essere concepiti, realizzati e valutati non solo per fornire determinate prestazioni al momento del collaudo, ma anche per mantenere tali prestazioni durante la vita utile con una spesa di manutenzione minima. Nella valutazione di un elemento si dovrebbe tener conto non soltanto del suo costo di installazione, ma anche del suo costo di esercizio (vita utile e manutenzione).

Le tecniche di progettazione di affidabilità consolidate si riferiscono, in genere, alla tassonomia introdotta dalla Norma IEC 61508, che esprime livelli codificati di prestazione in termini di PFD (Probability of Failure on Demand), PFH (Probability of Failure per Hour), SIL (Safety Integrity Level) (cfr tabella seguente), e in particolare propone i valori soglia con riferimento alla probabilità del guasto pericoloso.

Safety Integrity Level (SIL)	Average Probability of Failure on Demand (PFDavg) ⁶	Probability of Failure per Hour (PFH) ⁷
SIL 4	$10^{-5} \leq x < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq x < 10^{-8}$
SIL 3	$10^{-4} \leq x < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq x < 10^{-7}$
SIL 2	$10^{-3} \leq x < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq x < 10^{-6}$
SIL 1	$10^{-2} \leq x < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq x < 10^{-5}$

Tabella 6: IEC 61508 - livelli di affidabilità di progetto

Laddove la complessità del sistema è tale da sconsigliare un test reale, buone stime di affidabilità complessa possono essere ottenute con metodi di simulazione operativa. La simulazione del sistema è sostanzialmente legata al tipo di problema da studiare e al grado di approssimazione desiderato. Anzitutto si deve rappresentare la struttura del sistema: *topologia e connessioni tra elementi*. Struttura, automatismi e intervento umano sono fattori essenziali dell'affidabilità e strettamente legati tra loro; il modello del sistema deve quindi simulare adeguatamente struttura e logica di funzionamento.

I metodi di simulazione diretta tipo Montecarlo sono basati sulla possibilità di generare una serie di numeri casuali estratti da una distribuzione statistica voluta: tale possibilità consente quindi di simulare eventi

⁶ Probabilità di guasto a chiamata

⁷ Probabilità di guasto per ora di funzionamento

dipendenti da variabili aleatorie aventi distribuzioni statistiche note. Nell'impiego del metodo Montecarlo la determinazione del grado di precisione può essere fatta osservando la dispersione dei risultati e arrestando il calcolo quando il livello di confidenza del risultato è ritenuto sufficiente

2.2 Analisi del rischio

In generale abbiamo qualificato le condizioni di configurazione di un sistema come \mathfrak{R} e \mathfrak{R}^* (funzionamento corretto/malfunzionamento) e \mathfrak{S} e \mathfrak{S}^* (condizioni non pericolose e pericolose).

L'analisi delle configurazioni \mathfrak{S}^* , e quindi delle modalità di pericolo orientato a persone o cose, costituisce una modalità di gestione del sistema (sia in progetto che in esercizio) particolarmente importante ove siano presenti potenziali lesivi socialmente rilevanti: è il caso, certamente, delle infrastrutture di trasporto in generale e del trasporto collettivo in particolare. La stima della affidabilità di un sistema secondo un approccio affidabilistico non esaurisce in questi casi le necessità di analisi.

Negli ultimi anni per la sicurezza delle gallerie stradali, ferroviarie e metropolitane si è andata affermando, nelle Direttive e Decisioni Europee e ancor più nei documenti tecnici delle associazioni internazionali, un'innovativa tendenza alla progettazione integrata in cui la sicurezza viene inquadrata in una logica di sistema. Gli obiettivi prestazionali prevalgono sui criteri prescrittivi: in sostanza crescono fiducia ed aspettative nelle soluzioni ingegnerizzate e tecnologiche e, conseguentemente, crescono le responsabilità di progettisti, costruttori e gestori.

L'analisi del rischio del sistema si struttura quindi:

1. nella identificazione degli incidenti rilevanti;
2. nella valutazione delle catene complesse di guasti e malfunzionamenti che, variamente interagendo, costituiscono la modalità di genesi degli incidenti;
3. nella valutazione evolutiva degli incidenti, in considerazione delle condizioni al contorno e della eventuale presenza ed efficacia di sistemi di protezione, mitigazione e facilitazione, fino a scenari di fine emergenza.

L'analisi del rischio è completamente sviluppata quando per ciascun evento incidentale selezionato è stato completamente sviluppato il processo logico analitico generatore dell'incidente e il processo evolutivo successivo ad esso, arrivando a considerare quindi tutti gli scenari di fine emergenza realizzabili.

Si pensi, ad esempio, all'applicazione di analisi di rischio al caso stradale: definiti gli incidenti caratteristici (ad esempio incidente tipico con evoluzione complessa e coinvolgimento di materiale pericoloso e incendio originario⁸), l'analisi si sostanzierà, per ciascuno degli incidenti eletti come eventi inziatori, nella valutazione, logica e quantitativa, delle *modalità di accadimento* degli incidenti e della *possibile evoluzione* dell'incidente stesso (con riferimento all'incendio, ipotizzato un incendio generalizzato ad un veicolo, si analizzeranno i casi variabilissimi di potenza del focolaio, sua durata, presenza o meno di confinamento dei fumi, grado di esposizione, la presenza o meno di impianti di mitigazione passivi o attivi, distanza dal luogo sicuro delle persone esposte, tempo di intervento delle squadre di soccorso esterne...).

In funzione della modalità di evoluzione dello scenario variano in modo sostanziale i livelli di pericolosità da cui dipende la severità delle conseguenze (effetti).

Questo processo sequenziale di eventi viene illustrato graficamente considerando l'evento critico iniziatore come punto nodale tra le precondizioni (cause) e gli effetti (conseguenze): tale rappresentazione logico-

⁸ l'esempio è proposto in coerenza con il disposto normativo del D. Lgs. 264/2006.

strutturata della sequenza degli eventi è rappresentata nella figura che segue e definita nella letteratura anglosassone Bow-Tie Model.

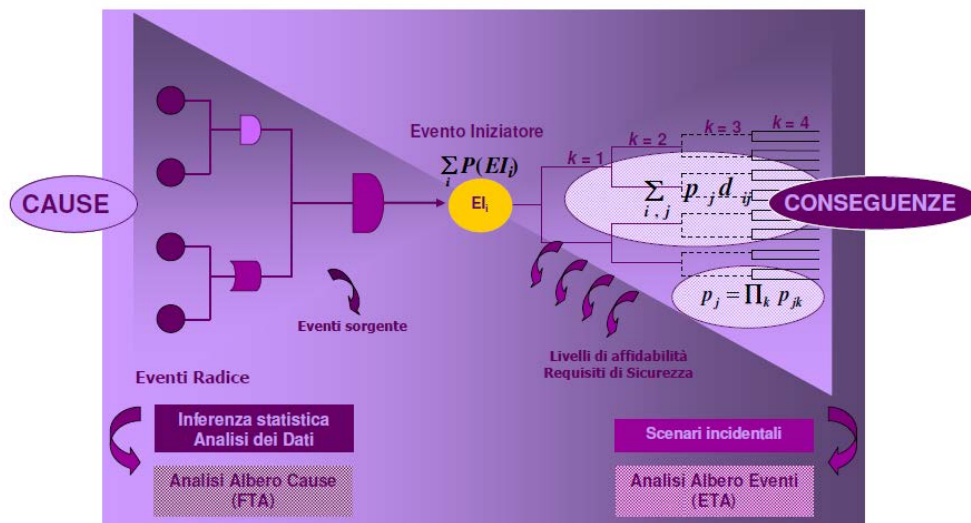


Figura 45: Bow-Tie Model: flusso logico-sequenziale del pericolo

L'Analisi di Rischio Quantitativa Probabilizzata (ARQP) integra l'analisi affidabilistico - prestazionale dei sistemi e dispositivi, a monte con i modelli probabilizzati degli eventi e delle situazioni pericolose e a valle con l'analisi probabilizzata delle conseguenze generate dagli eventi pericolosi stessi e dalla loro evoluzione negli specifici scenari di pericolo.

Le tecniche di *Risk Analysis* hanno l'ambizione di analizzare un gruppo di eventi rappresentativi di *tutte le configurazioni evolute di incidente* che possono recare danno a persone e cose.

2.2.1 L'identificazione degli incidenti rilevanti

L'analisi del sistema deve orientarsi alla valutazione degli scenari evolutivi di *guasto* verso condizione di *incidente*, attraverso tecniche ricognitive strutturate (Hazop⁹, FMEA¹⁰, FMECA¹¹); si seleziona così un Gruppo Completo di Eventi Incidentali (GCEI), *partizione completa*¹² della condizione di sistema complementare allo status sicuro (status insicuro).

L'insieme delle modalità incidentali selezionate deve quindi costituire il complemento logico al funzionamento del sistema in assenza di incidenti.

2.2.2 Dal guasto del componente all'incidente: Fault Tree Analysis

La valutazione delle catene più o meno complesse di eventi che, a partire dal guasto del singolo componente, evolvono verso la realizzazione di un incidente, è efficacemente studiata attraverso la tecnica Fault Tree Analysis (analisi ad albero dei guasti), generalizzabile, nel caso di sistemi caotici, nella tecnica ad Albero delle Cause. Utilizzando questa procedura si può ottenere, nel rispetto delle regole di composizione degli eventi aleatori, la quantificazione delle cause elementari e complesse che generano l'incidente, strutturate in un

⁹ HAZard and OPerability analysis

¹⁰ Failure modes and effects analysis

¹¹ Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis

¹² $\forall i, j \quad i \neq j \quad P(EI_i \cup EI_j) = P(EI_i) + P(EI_j) \Leftrightarrow P(EI_i \cap EI_j) = 0$

e $\bigcup_i EI_i = EI$

grafo di composizione delle probabilità elementari, fino a determinare la probabilità associata all'evento maggiore oggetto di studio.

Una procedura tipica di applicazione dell'analisi dell'albero dei guasti con approccio top-down consiste nelle seguenti fasi:

- acquisire una conoscenza completa ed approfondita del sistema oggetto dell'analisi, della sua struttura, del suo funzionamento e delle sue prestazioni;
- evidenziare le cause prime, a livello di sottosistema, generatrici dell'incidente e qualificarne le interazioni/combinazioni in termini di operatori logici;
- approfondire l'analisi al livello immediatamente inferiore, ricercando il complesso di cause generatrici delle cause prime e così via ripetendo l'approfondimento per i livelli successivi fino ad arrivare ad un livello di sviluppo dell'albero in cui l'analisi stessa non è più ulteriormente sviluppabile.

Questo processo di destrutturazione dell'incidente in cause via via più elementari conduce, nell'ultimo livello, ad individuare *cause radice*, costituite sempre da guasti elementari di componenti del sistema (e errori procedurali elementari se il sistema complesso vede la presenza rilevante del fattore umano).

L'analisi FTA prevede per i guasti un modello binario. I legami tra i guasti possono quindi essere espressi attraverso le funzioni logiche AND e OR. Se il verificarsi di uno qualunque dei guasti provoca l'evento considerato (elementi in serie) si userà la funzione logica OR. Se viceversa solo la presenza contemporanea di tutti i guasti provoca l'evento considerato (elementi in parallelo) si userà la funzione logica AND.

La probabilità di realizzazione dell'incidente sarà calcolata attraverso l'opportuna combinazione probabilistica delle cause radice (e quindi dalle inaffidabilità dei componenti rilevanti del sistema) nel sistema di operatori logici che costituiscono l'albero.

Quando la procedura è applicata ad un ambito complesso, l'analisi ad Albero delle Cause è tipicamente surrogata in una analisi del fenomeno statistico di interesse, così sostituendo, alla valutazione di dettaglio tipica dell'analisi di affidabilità di un sistema progettato, l'analisi statistica di dati di incidente corrispondente alla definizione di evento iniziatore. L'analisi si struttura in questo caso in una preliminare valutazione delle cause, con la conseguente qualificazione di precursori di incidenti, e deve essere condotta su campioni di dati completi e rappresentativi.

La rappresentatività statistica non può essere definita a priori, essendo strettamente dipendente dalla frequenza di accadimento verificata; né, d'altronde, sarà possibile in genere confidare sul miglior adattamento dell'analisi al crescere del campione, essendo in genere verificata una dipendenza dal tempo dei fenomeni oggetto di studio, e quindi la necessità di riferirsi alle tecniche statistiche di analisi delle serie storiche.

2.2.3 Tecniche di analisi delle serie storiche per la stima della frequenza attesa dell'evento iniziatore

Una serie storica costituisce una realizzazione campionaria finita di un processo stocastico. Analiticamente il processo stocastico: $Y_t(\omega)$, con $t \in T$ e $\omega \in \Omega$, è completamente descritto dalla distribuzione di probabilità di $\omega \in \Omega$ per ogni t .

La completa conoscenza del processo stocastico che genera la serie storica consentirebbe la corretta attribuzione della probabilità di accadimento degli eventi rilevanti nell'ottica dell'analisi di rischio.

Nei casi concreti di studio, stante il carattere spiccatamente evolutivo dei sistemi e la ridotta stabilità dei criteri classificatori delle banche dati, i dati disponibili non giustificano l'adozione di tecniche simulative

raffinate (processi ARMA o ARIMA). Queste condizioni oggettive rendono più funzionale utilizzare tecniche inferenziali regressive efficaci nella stima di indicatori centrati e consistenti.

Per il teorema di Wold ogni processo stocastico debolmente stazionario può essere scomposto in una componente deterministica e in una componente aleatoria (White Noise: successione di v.c. indipendenti, identicamente distribuite, di media nulla, varianza costante e incorrelate): $Y_t = f(t) + \varepsilon_t$.

La componente di base $f(t)$ è a sua volta data dalla combinazione di un trend, da componenti cicliche stagionali. Il valore corrente della funzione di trend costituisce, per definizione, l'indicatore centrato ed attuale della grandezza in studio e quindi il valore di tasso cercato.

Il grado di correlazione interna tra le realizzazioni del processo è espresso attraverso le autocovarianze:

$$\gamma_t = E[(y_t - \mu)(y_{t-k} - \mu)]$$

L'ipotesi di stazionarietà implica come proprietà l'indipendenza dal tempo e la sola dipendenza da k .

La funzione di autocorrelazione (ACF) è costituita dalla successione delle autocovarianze normalizzate e la sua rappresentazione è nota come correlogramma:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \frac{\gamma_k}{\sigma^2}$$

Stimatori efficaci, centrati e consistenti di media, varianza, covarianza e autocorrelazione del processo sono rispettivamente:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_N y_t, \quad \hat{\sigma}^2 = \hat{\gamma}_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{\mu})^2, \quad \hat{\gamma}_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (y_t - \hat{\mu})(y_{t+k} - \hat{\mu}), \quad \hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0}$$

2.2.4 Le medie mobili e la determinazione del campione omogeneo rappresentativo

L'applicazione di una mm semplice di ordine s ad una serie osservata contenente un'onda di periodo s , permette la perequazione dei movimenti stagionali e, praticamente, l'eliminazione della perturbazione. Parallelamente la componente erratica tende a compensarsi in virtù della proprietà statistica di White Noise.

L'analisi dei dati attraverso trasformazioni in medie mobili consente quindi di verificare preliminarmente l'esistenza di un trend e di determinare l'orizzonte temporale nel quale la componente erratica si autocompensa; tale intervallo temporale, considerato il periodo di sufficiente stabilità tecnologico-organizzativa, consente l'analisi di stratificazione considerando l'esperienza incidentale riferita all'intervallo selezionato costituente un campione omogeneo.

2.2.5 Frequenze attese sulla base di osservazioni limitate e per occorrenze mai verificate

Come visto, con riferimento alla stima delle frequenze attese relative a fenomeni osservati con una certa regolarità, il problema fondamentale che l'analista deve gestire è quello della omogeneità e completezza campionaria da un lato, e della analisi del trend dall'altro.

Non è tuttavia infrequente, sia in generale che nelle applicazioni di analisi di rischio alle strade in particolare, che sia necessario operare una stima sulla base di osservazioni scarse o nulle, relative ad un orizzonte di monitoraggio anche relativamente lungo. Sostanzialmente questo si verifica quando il tempo di ritorno caratteristico del fenomeno è dello stesso ordine di grandezza, o superiore all'orizzonte di monitoraggio disponibile.

In merito alle osservazioni scarse, va preliminarmente evidenziato che lo stimatore ricavabile da un campione di eventi selezionati omogenei di numerosità limitata è comunque, per n numero di osservazioni elevato, uno stimatore centrato rispetto al parametro ignoto. Quindi al netto della ragionevole attesa di inevitabili fenomeni di scostamento dalla media (e quindi, con l'aumentare del campione nel tempo, attendendosi fenomeni di regressione della media calcolata), è ragionevole assumere tale valore come stimatore del parametro incognito. Un approccio trasparente e responsabile nella redazione delle analisi consiglierebbe, in merito, di proporre valutazioni per intervalli di confidenza nei casi in cui la scarsità di dati sia particolarmente evidente, o comunque di evidenziare tale vulnerabilità nella restituzione dei risultati. Va d'altronde esplicitato che, coerentemente all'orientamento indicato nel Capitolo successivo, il campionamento per la raccolta dati necessari ad una analisi di rischio può estendersi a strutture caratterizzate da stretta analogia rispetto a quella d'interesse, applicando un allargamento della base campionaria per analogia, con approccio ampiamente utilizzato in molti settori dell'ingegneria dell'incertezza.

Il problema si propone d'altronde con stringente necessità quando il dato di occorrenza sul periodo di osservazione è nullo: in questi casi un approccio frequentista e per pura logica esterna (statistica) restituirebbe una frequenza attesa nulla, a cui corrisponderebbe una grave sottostima del rischio associato al fenomeno non osservato e purtuttavia possibile.

Per sanare tale carenza informativa è tuttavia possibile fare riferimento a metodi consolidati in statistica inferenziale e finalizzati a dimensionare, per stima con livello di accuratezza voluto, l'intervallo di confidenza caratteristico dell'indicatore cercato anche in assenza di concrete manifestazioni del fenomeno. Assumendo, infatti, che al fenomeno sia associata una distribuzione di occorrenze nel tempo di tipo Poisson, è possibile ricavare una stima dell'intervallo di confidenza, e in particolare del limite superiore dell'intervallo scelto ampio quanto voluto, valorizzando l'esperienza prolungata di 0 osservazioni.

Il tema è ampiamente dibattuto in molte scienze applicate, e sono diversi i modelli che possono essere assunti per ottenere una stima di merito, che in genere è orientata in senso conservativo (e quindi proponendo, quale parametro di calcolo, il valore superiore dell'intervallo di confidenza nel quale, con cut-off del 5% o del 2.5%, è atteso che cada il valore incognito di interesse). Tale conservatività non è, in effetti coerente, ai costrutti dell'analisi di rischio, e alla sua finalità strategica, orientata ad una stima del rischio con approccio di effettività piuttosto che ad una verifica del livello di sicurezza con approccio cautelativo. Tuttavia è in questi casi ragionevole esplorare tale possibilità di analisi e, anche attraverso il confronto con stime ottenute in sistemi analoghi o affini, orientare la scelta finale in modo consapevole.

Nel merito tecnico, la soluzione di Clopper e Pearson (1934) consente di qualificare l'estremo superiore di un intervallo di confidenza al 95° percentile col valore $3/n$, essendo n il numero di osservazioni effettuate. Nel caso delle applicazioni di interesse, considerato che la genesi di qualunque incidente è costituita dal veicolo, il processo generativo dell'incidente può vedersi come un esito possibile e alternativo al transito sicuro in occasione di ciascun transito veicolare nella tratta di interesse. Ne deriva, quindi, che il numero di osservazioni n corrisponde al numero di veicoli complessivamente transitati nel sistema in tutto il periodo di osservazione.

Soluzioni più raffinate, proposte nei lavori di Agresti e Coull (1998) o di Jovanovich e Levy (1997) possono essere egualmente applicate, tuttavia nella consapevolezza di ottenere indicatori sostanzialmente indirizzati a conservatività.

È infine possibile assumere stimatori meno cauti, nella consapevolezza, tuttavia, di più significativi difetti di sottostima della frequenza attesa: e in particolare sarà possibile, ove ragionevolmente supportati da considerazioni di logica interna, assumere l'ipotesi che al fenomeno a 0 occorrenze corrisponda una funzione di densità di probabilità rispetto alla quale la prolungata osservazione abbia determinato il raggiungimento di una quota cumulata di probabilità di occorrenza pari al 50%. Tale approccio, che come detto espone a

rischi di sottostima della frequenza attesa piuttosto evidente, è ad esempio utilizzato per l'adozione di parametri statistici di eventi considerati sostanzialmente impossibili sulla base dell'esperienza, e tuttavia per i quali non è disponibile una effettiva dimostrazione di impossibilità.

2.2.6 Scenari evoluti di incidente: Event Tree Analysis

Avvenuto l'incidente, le condizioni di lesività verso persone e beni esposti sono molto condizionate dalla qualificazione di dettaglio dell'incidente stesso e dell'ambiente in cui esso è occorso.

Considerando, in chiave termodinamica, un incidente come una trasformazione di energia potenziale (chimica, gravitazionale...) in energia meccanica e/o termica in modo incontrollato, è immediatamente comprensibile come il danno conseguente a questo processo libero sia, anch'esso, una grandezza aleatoria.

Scelto un qualunque scenario finale di incidente, questo sarà costituito dall'emergere di un esito specifico tra quelli possibili, costituiti da tutte le combinazioni possibili delle variabili descritte. Tale processo di partizione dello spazio delle possibilità deve costituire una metafora ordinata, numerabile e rappresentativa del processo reale, nel quale variabili generative e/o condizionanti intervengono, contemporaneamente e in forma tipicamente caotica, a determinare la concreta specifica conseguenza costituita da un reale scenario di incidente. La qualità fondamentale dell'analisi del rischio è quindi riscontrabile, nella porzione di analisi costituita dall'ETA, nella qualità della metafora descritta, e quindi nella completezza e rappresentatività del partitore adottato.

Per ciascuno scenario finale di incidente è valutabile, attraverso metodi simulativi opportuni (ad esempio, in caso di analisi di scenario di incendio, attraverso simulazioni termo-fluido-dinamiche e di esodo), il numero di vittime atteso.

L'ETA costituisce quindi la rappresentazione sequenziale ed interconnessa di tutti i percorsi alternativi di evoluzione degli scenari di pericolo innescati da un evento iniziatore; ciascuno di tali percorsi alternativi del flusso di pericolo conduce ad uno specifico e distinto scenario di danno di fine emergenza (Evento Conseguenza), caratterizzato da una probabilità di accadimento e da un livello di gravità delle conseguenze di danno; il complesso degli Eventi Conseguenza costituisce una partizione completa di dettaglio dell'evento iniziatore selezionato, ed è quindi definito Gruppo Completo degli Eventi Conseguenza (GCEC).

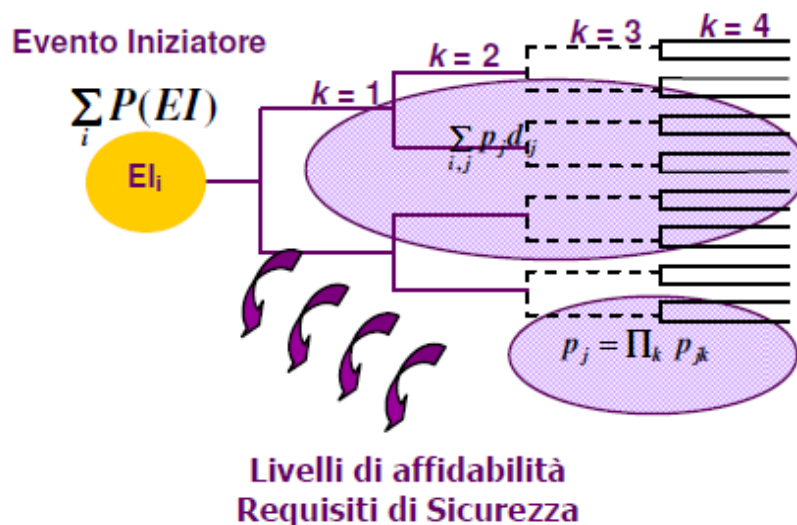


Figura 46: Albero degli eventi

I concetti di probabilità, incompatibilità ed indipendenza di eventi e le proprietà che ne discendono sono strumenti indispensabili alla caratterizzazione quantitativa probabilizzata del bow-tie, cioè del flusso logico sequenziale che descrive l'evoluzione del pericolo fino alla determinazione del gruppo completo di eventi conseguenza.

In particolare, si consideri che, nell'ambito della risoluzione quantitativa dell'albero degli eventi, sono verificati i concetti di incompatibilità tra eventi biforcazione e di dipendenza o indipendenza statistica tra eventi in successione.

2.2.7 La misura del rischio

L'analisi di rischio è costituita da un insieme di procedure utilizzate per misurare quantitativamente attraverso opportuni indicatori il livello di rischio associato ad una definita configurazione progettuale di sicurezza. L'applicazione descritta è finalizzata alla verifica dell'efficacia della configurazione progettuale fino all'ottenimento di un valore del rischio (quindi un danno atteso) compatibile con determinate soglie di validità generale.

Le tecniche presentate hanno lo scopo di sviluppare una raccolta completa degli scenari di incidente realizzabili. Lo scenario definito da ciascun evento di fine ramo è caratterizzato da un indicatore di probabilità di accadimento, ottenuto attraverso la produttoria delle probabilità delle biforcazioni dei livelli precedenti.

Allo scopo della quantificazione del rischio, assume particolare rilevanza l'analisi del danno associato a ciascuno scenario finale (Evento Conseguenza). In particolare, definito lo scenario finale in termini di configurazione di sistema, il danno conseguente ha la caratteristica di essere una variabile aleatoria (va)¹³, generalmente continua.

La procedura di valutazione del rischio si sostanzia nel calcolo della probabilità degli scenari di fine ramo (gruppo completo degli eventi conseguenza), ciascuno ottenuto dalla produttoria delle singole probabilità di nodo. Ciascuno scenario si caratterizza, inoltre, per uno specifico livello di danno associato, costituito ad esempio dal numero di vittime ad esso riferibile. Ciascun evento di fine ramo è così caratterizzato da una coppia di valori P_i e D_i .

Sulla base di questa analisi quantitativa sono definibili indicatori di rischio caratteristici quali:

- **rischio totale (RT):** definito come

$$RT = \sum_i P_i D_i$$

avendo definito le P_i e le D_i di fine ramo dell'albero degli eventi; il valore così ottenuto costituisce la media ponderata (con pesi costituiti dalle probabilità degli scenari di fine ramo) di tutti i danni realizzabili in caso di incidente. Per questo motivo il rischio totale è detto anche danno atteso, o valore atteso del danno (VAD).

¹³ Una v.a. continua è caratterizzata da una funzione di densità di probabilità $p(x)$ tale che, necessariamente $p(x) \geq 0$ per $\forall x$;

$$p(d_1 \leq D \leq d_2) = \int_{d_1}^{d_2} p(x) dx; \quad [2.21]$$

$$p(D \geq 0) = \int_0^{+\infty} p(x) dx = 1$$

- **rischio individuale (RI o IR):** ottenuto dividendo il valore atteso del danno (RT) per la totalità del valore esposto; nel caso delle gallerie stradali, considerata la probabilità annua di accadimento dell'incidente con riferimento ad una precisa struttura e uno specifico traffico, la normalizzazione del danno atteso, calcolato in numero di vittime, per ottenere il rischio individuale deve essere operata sul numero totale di utenti che usano quella tratta nell'anno di riferimento. In questa accezione, immediatamente comprensibile, il rischio individuale costituisce la probabilità di restare vittima in occasione di incidente per il generico utente del servizio con riferimento al transito nella intera galleria. Il rischio individuale è confrontato, nel caso di alcune norme¹⁴, con valori di accettabilità assoluta e inaccettabilità assoluta. La fascia di variabilità compresa tra questi due limiti è in genere definita ALARP¹⁵ e l'accettazione di valori di IR compresi in questo range richiede la esplicitazione dei motivi che rendono non conveniente il perseguimento di soluzioni progettuali/funzionali di maggiore sicurezza.
- **rischio sociale:** esprime la probabilità annua, per un prefissato valore di danno D^* , di avere incidenti con un numero di vittime pari o superiori a D^* ¹⁶:

$$RS = P(N \geq x) = 1 - FN(x) = \int_x^{\infty} f(x) dx$$

Il rischio sociale viene rappresentato su un piano bilogarithmico riportando, in ordinate la funzione retro cumulata del danno $F(D > D^*)$ (ottenuta integrando in modo discreto i valori di probabilità degli scenari di fine ramo per valori crescenti di danno e in ascissa i valori della variabile danno (N o D). L'area sottesa alla curva retro cumulata del danno coincide con il valore atteso del danno.

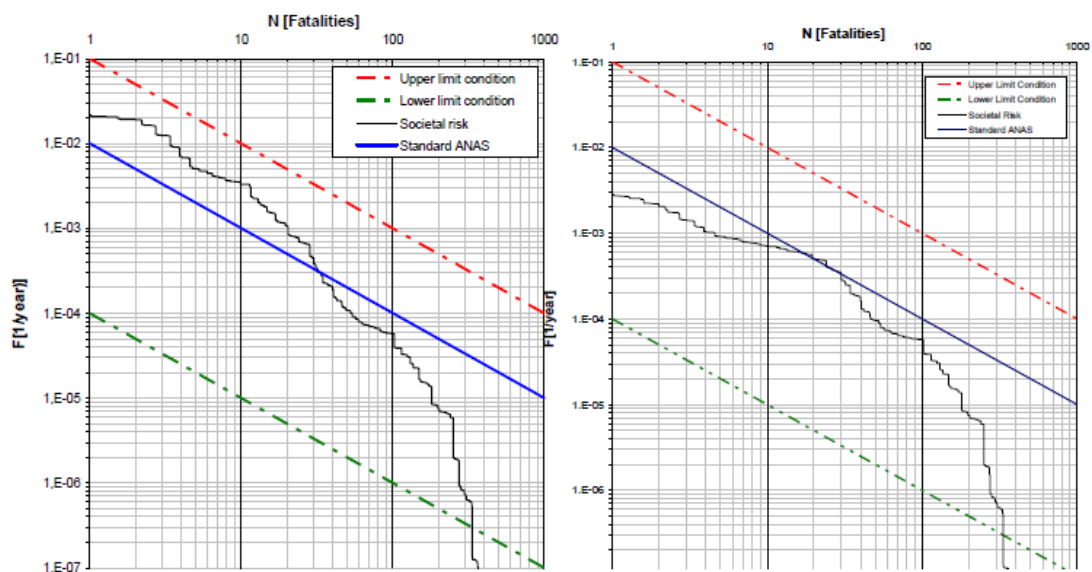


Figura 47: esempi di rappresentazione sul piano F-N di funzioni retrocumulate del danno e confronto con il criterio di verifica

2.2.8 La valutazione del rischio

Le misure di rischio così calcolate, in base a quanto esposto precedentemente, devono essere confrontate con dei valori limiti che costituiscono il livello di rischio tollerabile, ritenuto socialmente ed eticamente

¹⁴ E' il caso del DM 28/10/2005 Sicurezza in galleria ferroviaria

¹⁵ As Low As Reasonably Practicable

¹⁶ Il RS è valutato rappresentando in un piano $F(D \geq D^*)$, D la funzione retrocumulata del danno, ottenuta integrando in modo discreto i valori di probabilità ottenuti a fine ramo per valori di soglia crescenti di danno.

accettabile, al fine di giudicare l'accettabilità del livello di rischio stimato e la necessità di individuare misure per ridurlo.

L'accettabilità del rischio è il risultato di un bilanciamento fra i benefici derivanti da un'attività e i rischi sociali ad esso connessi.

Generalmente i criteri di accettabilità vengono espressi alternativamente o congiuntamente in termini di rischio sociale o rischio individuale. Il criterio di accettabilità basato sul rischio sociale viene espresso mediante delle linee di soglia rappresentate sul piano F-N. Per la costruzione della curva è necessario definire un punto, corrispondente all'intersezione della curva con l'asse delle y e il gradiente (ovvero la pendenza della curva).

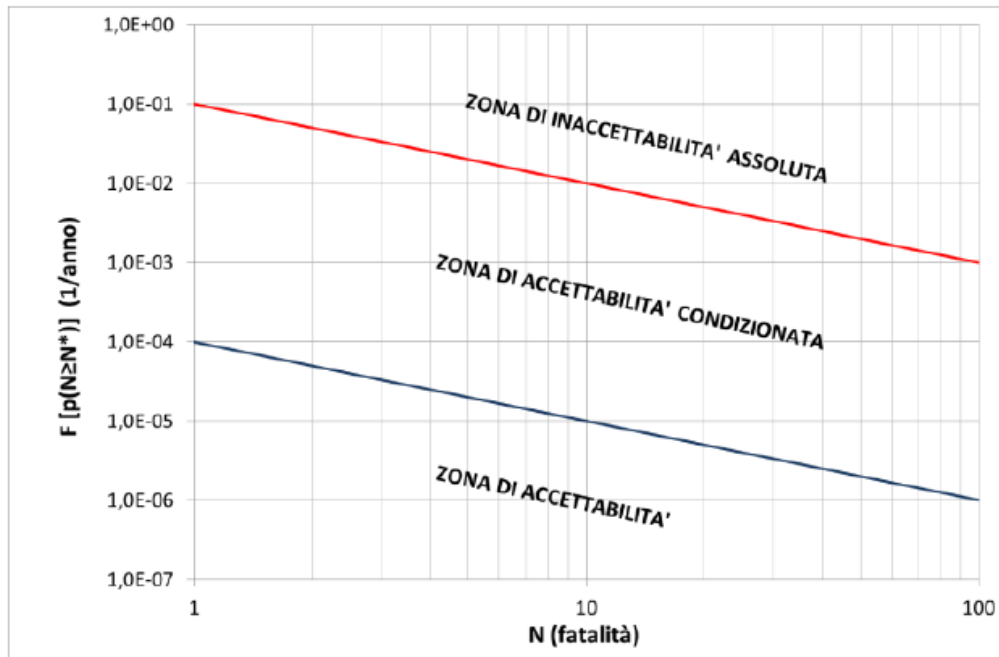


Figura 48: Criteri di accettabilità del rischio (Dlgs 264/06)

Quest'ultima esprime il livello di avversione al rischio: più è alto il valore della pendenza e maggiore è l'avversione pubblica a eventi con gran numero di vittime. In generale l'individuazione di un livello di accettabilità del rischio per un qualunque sistema risulta fondamentale per fornire ai progettisti un obiettivo di sicurezza a cui tendere nella progettazione dei sistemi. Per il sistema dei trasporti, la norma EN 50126 definisce tre criteri di accettabilità del rischio:

- Criterio ALARP (As Low As Reasonably Practicable: tanto basso quanto ragionevolmente praticabile): di origine anglosassone identico al ALARA (tanto basso quanto ragionevolmente ottenibile) utilizzato in campo nucleare, stabilisce che: il rischio sociale deve essere valutato per ogni attività antropica che possa provocare sinistri risultanti in un ampio numero di fatalità;
- Criteri MEM (Minimum Endogenous Mortality: Minima mortalità endogena) di origine tedesca e basato sul concetto di rischio individuale stabilisce che: il rischio connesso ad un nuovo sistema di trasporto non dovrebbe aumentare in modo significativo il tasso di mortalità endogena di un individuo;
- Criterio GAME (Globalement Au Moins Equivalent: globalmente almeno equivalente) di origine francese, questo non è direttamente connesso ai concetti di rischio sociale o individuale ma stabilisce che: 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;

Il criterio ALARP è quello adottato dal Dlgs 264/06, *Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea*. Il criterio definisce tre aree:

- area di non accettabilità: situazione in nessun caso accettabile;
- area di accettabilità: una situazione in cui il valore del rischio è da ritenersi accettabile e non sono necessari azioni per ridurlo;
- area centrale, detta appunto *ALARP*, in cui l'accettabilità del livello di rischio avviene mediante analisi costi-benefici.

2.2.9 Analisi costi – benefici (ACB)

L'analisi costi – benefici può essere sviluppata procedendo alla quantificazione di costo di implementazione / realizzazione di sottosistemi o funzioni specifiche (preventive o protettive) procedendo quindi a confronto con il beneficio ottenuto dall'implementazione, misurato in termini di riduzione del danno atteso come calcolato ad esito di una analisi di rischio quantitativa estesa.

Essendo il costo dell'implementazione misurabile in moneta convenzionale, l'incremento di sicurezza derivante dall'adozione della implementazione deve essere trasformato in valore economico equivalente. Per ottenere una misura economica equivalente è possibile introdurre un valore monetario convenzionale della vita umana. Con l'uso del VPF UK corrente il valore della vita umana in euro risulterebbe di poco superiore ai 2.000.000 di €. L'approccio di cultura francese propone un valore convenzionale di poco superiore a 1,5 mln di €. Il costo medio umano della vita persa in occasione di incidente stradale in Italia è oggetto di analisi da parte del Ministero delle Infrastrutture e Trasporti e stimato, per l'anno 2010¹⁷, pari a 1,504 mln di €.

Una analisi di rischio condotta a fini di progetto di adeguamento (e quindi con lo scopo di dimensionare l'opportuno sistema di sicurezza) verificherà quindi una serie di alternative implementate, e procederà alla restituzione, sul piano della convenienza C, B delle coppie di valore costi-benefici riferite a ciascuna implementazione. Sullo stesso piano è rappresentabile il criterio di accettabilità, costituito dalla bisettrice del piano di rappresentazione.

Una modifica del valore convenzionale della vita umana comporta, a pari collocazione del criterio, una traslazione verso l'alto (per aumento del valore della vita umana) o verso il basso (in caso di diminuzione del valore della vita umana) dell'indicatore (C, B) di ciascuna implementazione, modificando di conseguenza la verifica di accettabilità.

Dal punto di vista sistemico, la costruzione ottenuta per composizione vettoriale a pendenza decrescente restituisce, anche graficamente, il progetto ottenibile con l'applicazione di un criterio sicurezza dominante (massimo livello di sicurezza esprimibile dal sistema opportunamente implementato, senza alcuna considerazione dei costi).

E', con tale approccio, inoltre riconoscibile la composizione di progetto ottimo, quale risultante dalla selezione delle sole implementazioni che rispettano il criterio, nell'ipotesi di perfetta sovrapposizione degli effetti (condizione nella realtà quasi mai verificata).

¹⁷ MIT (2010). Studio di valutazione dei Costi Sociali dell'incidentalità stradale.

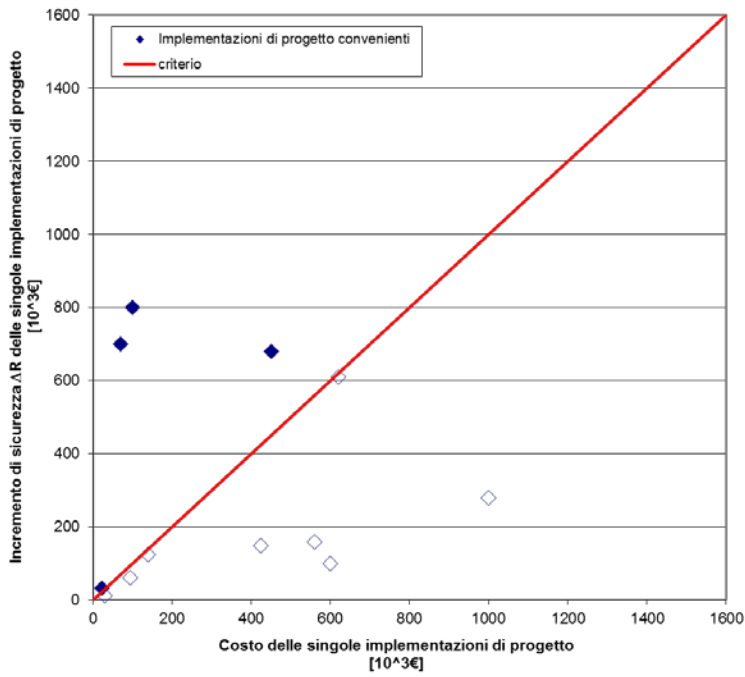


Figura 49: esempio di piano Costi – Benefici (CB) con rappresentazione del criterio di accettabilità

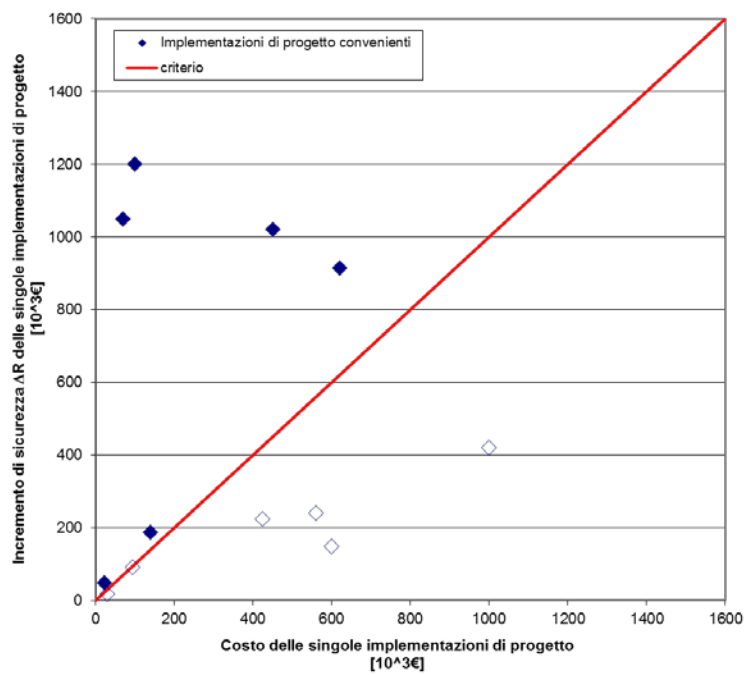


Figura 50: esempio di piano Costi – Benefici (CB) per una attribuzione di valore convenzionale di vita umana diverso dal precedente: effetto di traslazione in y delle soluzioni tecniche

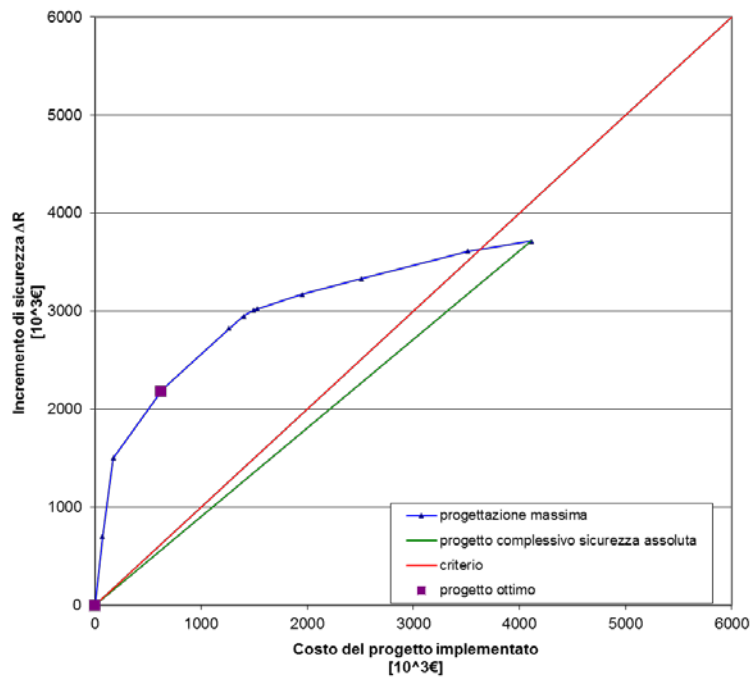


Figura 51: Rappresentazione ordinale delle soluzioni, in ordine decrescente di convenienza, e identificazione del punto di progettazione ottima e del progetto a massima sicurezza

2.2.10 Sommario grafico delle tecniche utilizzate nella QRA

Alla luce di quanto definito, il processo strutturato di valutazione del rischio può essere riassunto nello schema di seguito riportato.

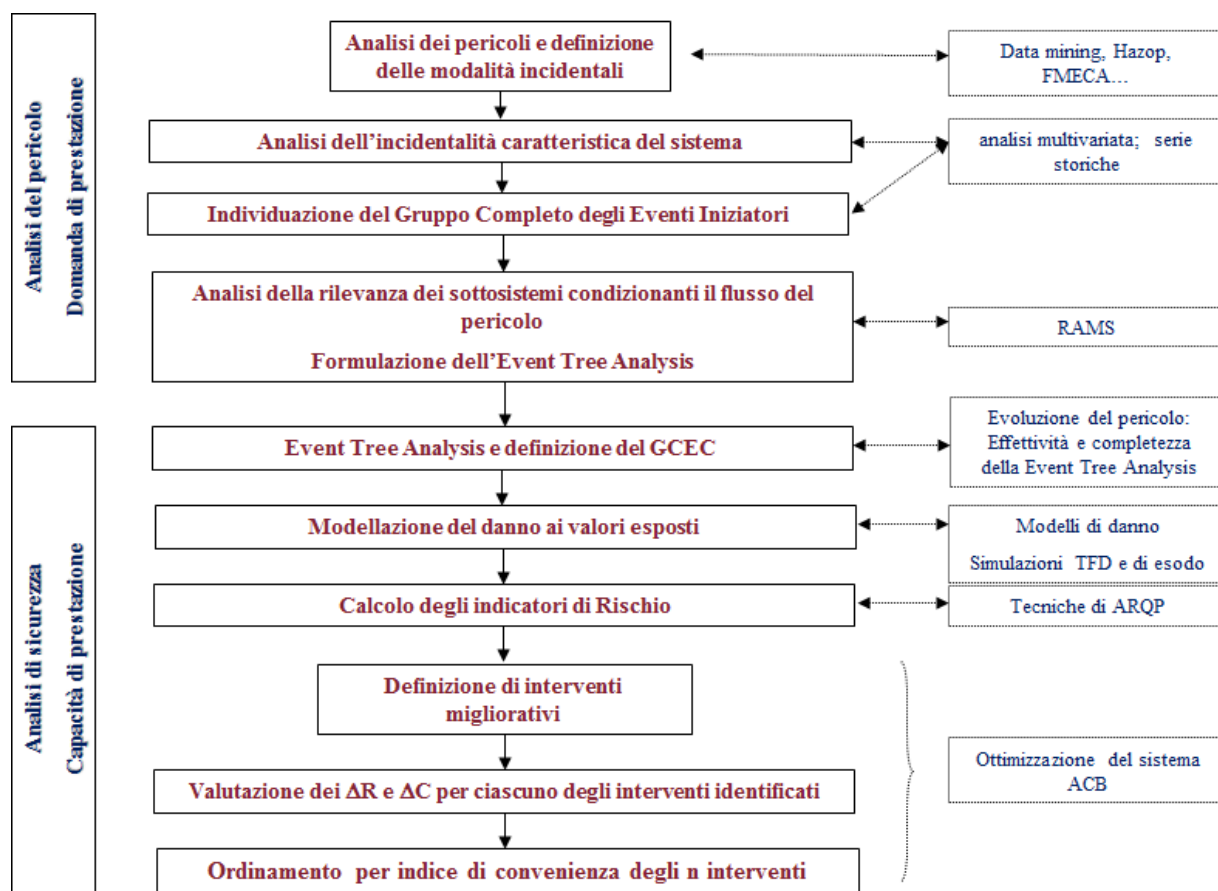


Figura 52: flow-chart del processo di analisi della QRA esperta proposta

2.3 Critica dei metodi di analisi di rischio

L'analisi di rischio quantitativa, in ragione delle incertezze di stima inevitabili, dovrebbe essere considerata come uno strumento, tra gli altri disponibili, di supporto decisionale, e non dovrebbe costituire l'unico metodo di valutazione (PIARC, 2013).

Va tuttavia evidenziato che l'approfondimento della relazione tra cause, incidenti e conseguenze che determina l'adozione di un metodo di *risk analysis* costituisce, anche con effetti dal punto di vista legale, una evidenza dell'approccio coscienzioso all'assunzione delle responsabilità attribuite dalle norme cogenti.

Dal punto di vista della attendibilità dei risultati è fin d'ora chiaro l'effetto di un errore di stima della $p(EI)$ in quanto fattore moltiplicativo condizionante, in modo direttamente proporzionale, tutti gli indicatori di rischio ottenibili dall'analisi. L'errore commesso nell'attribuzione della $p(EI)$ è direttamente proiettato sul risultato finale dell'analisi, sia con riferimento agli indicatori sintetici (valore atteso del danno, rischio individuale) che con riferimento all'indicatore di rischio sociale rappresentato sul piano F-N. In particolare un incremento percentuale di $p(EI)$ determina un identico incremento percentuale di R ed RI , e una traslazione coerentemente orientata lungo l'asse delle ordinate della funzione retrocumulata del danno sul piano F-N. L'effetto sugli indicatori di rischio dell'errore di stima della PDF(D) è invece molto meno facilmente riconoscibile.

La PDF(D) è ottenuta attraverso la costruzione di un grafo di partizione (l'albero degli eventi) che propone una scomposizione logica del sistema e della sua evoluzione in condizione di incidente. La determinazione di ciascuna coppia $\{p_i, d_i\}$ di fine ramo è ottenuta:

- Dalla probabilità p_i ottenuta dalla produttoria delle probabilità di ciascun nodo dell'ETA, a partire dall'evento incidentale e , percorrendo l'unico percorso disponibile, fino alla foglia i -esima;
- Dalla attribuzione del danno di associato allo scenario evoluto associato alla foglia i -esima, qualificato dalle modalità di disponibilità o indisponibilità, di efficienza e di efficacia dei componenti del sistema che determinano la modulazione del flusso del pericolo.

La stima della PDF(D) sarà quindi certamente condizionata:

- dall'effettività e completezza della struttura grafica dell'albero degli eventi, che determina la qualità rappresentativa del Gruppo Completo di Eventi di Scenari Evoluti di fine ramo, e cioè la qualità rappresentativa e di stima delle p_i ;
- dall'attendibilità della stima della singola realizzazione del danno per ciascuno degli eventi di fine ramo generati nell'ETA, e in particolare dalla precisione e dall'accuratezza della stima di ciascun d_i .

2.3.1 Effettività e completezza dell'ETA

Una componente determinante (e nella maggior parte dei casi misconosciuta) della accuratezza della stima del danno è costituita dalla qualità della formalizzazione dell'Albero degli Eventi stesso, la cui corretta strutturazione è l'unica garanzia di effettività nell'analisi dell'evoluzione incidentale.

Dal punto di vista probabilistico, uno sviluppo spinto della struttura dell'albero (e cioè una formulazione completa e dettagliata del livello di condizionamento del flusso del pericolo) consente di limitare opportunamente il livello di variabilità degli scenari di fine ramo, e quindi condiziona (positivamente) la precisione delle simulazioni di scenario. Soprattutto, però, è in questo modo ottenibile una ricostruzione effettiva della composizione degli scenari, e quindi migliorare il grado di verosimiglianza di tutta l'analisi: questo è tanto più vero quanto il caso indagato presenta singolarità nel fenomeno, e quindi tanto più è elevata la dispersione dei risultati. Dal punto di vista pratico, una ricostruzione attendibile richiede che per ciascun componente e ciascuna caratteristica del sistema sia individuato l'effetto rilevante sui valori esposti, qualificando la variabile o le variabili identificative del condizionamento del componente.

Oltre alla necessità di sviluppo massimo possibile dei livelli dell'albero per i motivi già dichiarati, è necessario procedere ad implementazione spinta anche delle configurazioni assumibili dal sistema all'interno di ciascun livello, riconoscendo plurime modalità di funzionamento / malfunzionamento dei sottosistemi rilevanti, e quindi introducendo modi di funzionamento a degradazione progressiva tanto più dettagliati quanto necessario alla completezza.

La variabile che rappresenta l'effetto rilevante del componente o della specifica caratteristica del sistema sarà in generale costituita da una v.a. continua; per rendere possibile lo sviluppo operativo dell'analisi si porrà quindi il problema della sintesi dell'effetto in un numero finito di modalità (per variabili categoriali o ordinali) o in una sintesi discreta per intervalli di condensazione (per variabili continue).

La scelta del numero di modalità o dei punti di condensazione della variabile deve essere operata ottenendo la migliore sintesi possibile nel rispetto della completezza. In alcuni casi sarà possibile sintetizzare la variabile in due sole modalità (variabile dummy o booleana), in altri casi sarà necessario qualificare plurime modalità. Per la condensazione delle variabili continue, il numero di punti di condensazione dovrebbe essere scelto considerando la regolarità della distribuzione della variabile da sintetizzare (aumentando i punti di condensazione al crescere dell'irregolarità).

La sintesi non dovrebbe mai essere eccessiva, e soprattutto è scorretto scegliere punti di condensazione centrati. La condensazione troppo centrata (e quindi la censura delle code della distribuzione) determina un errore tanto più grave quanto l'effetto sul danno rappresentato dalla variabile è iperlineare.

Una buona modalità di condensazione su v.a. continue consiste nella selezione dei decili della distribuzione quali punti di condensazione: tale approccio è coerente alla teoria di Vapnik sulla PDF campionaria.

2.3.2 Attendibilità della stima di d_i

Nel caso dell'analisi di rischio l'attendibilità della stima del d_i associato allo scenario di fine ramo è certamente legata a quella degli strumenti di simulazione computazionale (si pensi alla simulazione di incendio in ambiente confinato, o di esplosione, o diffusione di tossici). L'attendibilità della stima sarà quindi certamente funzione dell'attendibilità simulativa.

Il problema della precisione della simulazione è quindi quello meno preoccupante. La precisione della simulazione può essere infatti verificata procedendo a round simulativi ripetuti. Ad esito di n ripetizioni simulate potrà essere verificata l'ipotesi di normalità della distribuzione della variabile d_i . La conoscenza del fenomeno indagato indirizza l'analista nella previsione e nel controllo del risultato: sarà tanto meno precisa (cioè restituirà risultati tanto più dispersi) una simulazione di scenario caratterizzata da elevata turbolenza (cioè instabilità locale) del fenomeno fisico simulato, e da elevata e prolungata interazione tra gli oggetti simulati (agenti, pericolo, prestazioni dei sottosistemi di protezione...). Tanto più sarà elevata la dispersione del risultato di simulazione, quanto più sarà necessario incrementare n per avere una precisione sufficiente e sarà possibile, in relazione alla forma della distribuzione campionaria, gestire con la precisione voluta l'errore di stima dei momenti con test parametrici o non parametrici.

Il problema della accuratezza della simulazione è invece un tema dibattuto, e dipende dalla capacità di un simulatore di restituire un risultato verosimile del fenomeno reale simulato. I simulatori utilizzati in analisi di scenario presentano complessi solutori, costituiti dall'interazione di sub-solutori di fenomeni componenti.

È possibile ottenere una misura dell'accuratezza di un simulatore procedendo a *back-analysis* di eventi accaduti o di prove in scala reale. Una modalità di controllo sull'accuratezza del simulatore può essere ottenuta verificando le validazioni proposte dalla softwarehouse o dal gruppo di ricercatori sviluppatori; tuttavia anche in questo caso andrebbe sempre considerata l'attendibilità dell'inferenza costituita dalla generalizzazione del buon esito di un caso di validazione specifico.

Sia con riferimento alla precisione che all'accuratezza, è tuttavia evidente un progressivo miglioramento di precisione e accuratezza per effetto della sempre maggiore disponibilità di calcolo, della progressiva diffusione dei software e dell'accrescimento continuo del sapere condiviso nella comunità di ricerca.

Questa componente di fragilità dell'analisi di rischio è in genere molto nota agli analisti quanto evidente anche ai profani.

2.3.3 Dai difetti di attendibilità dell'analisi alla consistenza degli indicatori di rischio

È intuitivamente visibile come il processo di costruzione dell'analisi ad albero degli eventi possa essere interpretato, a livello qualitativo, come un processo ad accrescimento delle incertezze. È tuttavia importante evidenziare come le incertezze modellistiche e informative possano, e debbano, essere gestite con un approccio trasparente, consentendo quindi la verifica, a conferma o a confutazione, delle analisi proposte, e caratterizzando quindi gli studi secondo la caratteristica fondamentale della scientificità.

È invece importante analizzare la consistenza statistica e la stabilità degli indicatori di rischio ottenibili dall'analisi di rischio, allo scopo di orientare decisori, tecnici e gestori ad un consapevole uso di indicatori quantitativi e criteri eleggibili.

In considerazione della modalità di calcolo, RT può essere visto come il valore atteso della v.a. D , ottenuta dalla combinazione lineare delle v.a. d_i , tutte indipendenti (in quanto ottenute da processi di stima attraverso

simulazioni dedicate). In particolare, i fattori della combinazione lineare nelle variabili di sono costituiti dalle p_i . Tale osservazione è d'altronde perfettamente coerente alla definizione stessa di R, definito anche Valore Atteso del Danno (VAD).

Da ciò si ricava che:

$$R = \sum_{i=1}^n p_i \cdot d_i = E(D) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot E(d_i)$$

Ne deriva che l'effetto di mediazione determinato dalla composizione dei valori attesi del danno caratteristici dei vari scenari determina che l'errore standard di R, considerato come valore atteso della v.a. D, è inferiore a quello delle variabili aleatorie costituenti; ne consegue che R (o VAD) è un indicatore robusto, statisticamente consistente e centrato.

Le medesime considerazioni possono essere trasferite sull'indicatore di rischio individuale, in quanto semplice normalizzazione del rischio totale per il numero di esposti.

Un giudizio sulla consistenza statistica della funzione retrocumulata del danno è invece ottenibile, con approccio qualitativo, ove si consideri che la molteplicità degli scenari gestiti in una analisi di rischio è sempre e solo una raccolta numerabile, di elezione, rappresentativa dell'universo degli scenari effettivamente realizzabili. Mentre un indicatore normalizzato restituisce la sintesi di tutti i contributi al rischio (operando una sintesi per accrescimento, e quindi garantendo un buon effetto di compensazione nella gestione della numerosità degli scenari), l'adozione della distribuzione retrocumulata del rischio per N crescenti (in conformità con la definizione analitica dell'indicatore di rischio sociale) vede progressivamente diminuire il numero di scenari partecipanti al crescere di N, con l'effetto di una diminuzione dell'effetto di compensazione e, quindi, di una stima meno affidabile al crescere di N.

Un ulteriore indizio di (bassa) consistenza statistica dell'indicatore costituito dalla funzione retrocumulata del danno può essere ottenuto rappresentando le funzioni retrocumulate caratteristiche dello stesso sistema, ma ottenute operando una diversa aggregazione degli scenari di fine ramo.

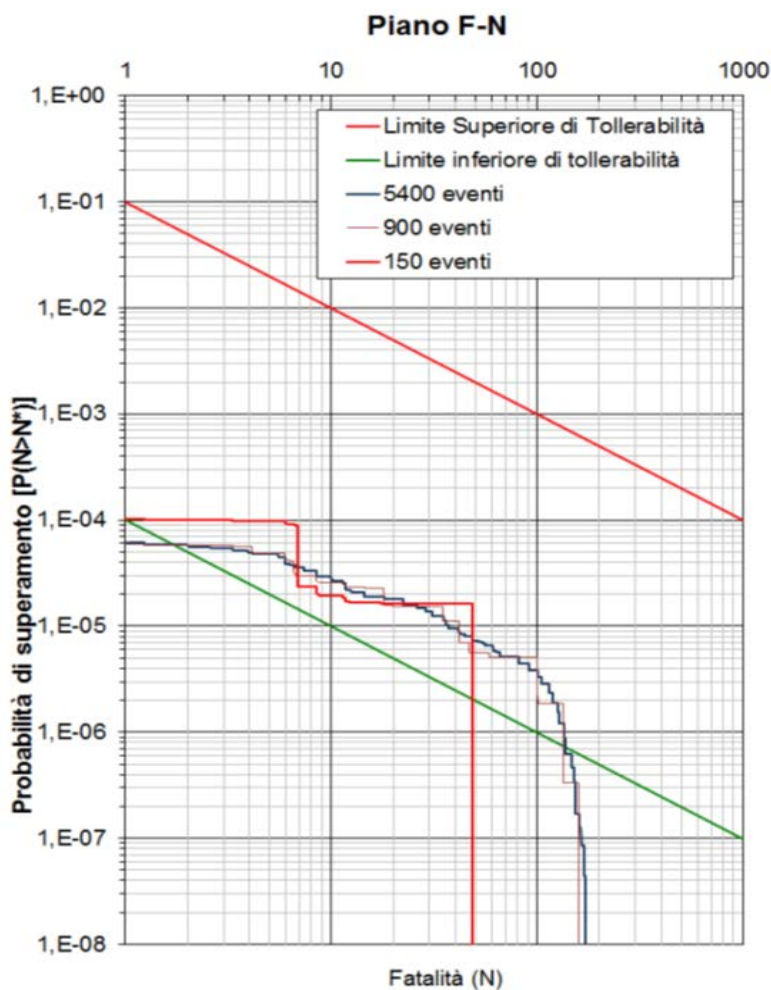


Figura 53: Rappresentazioni sul piano F-N di diverse retrocumulate rappresentative dello stesso sistema

La figura precedente riporta due casi relativi a retrocumulate del medesimo sistema tecnico, caratterizzate quindi da identico VAD (pari all'area sottesa dalle retrocumulate). La equivalenza delle aree non è immediatamente evidente a causa della rappresentazione su piano bilogaritmico. La figura esemplifica una caratteristica generale della funzione retrocumulata sul piano F-N: in particolare una strategia di gestione delle code di distribuzione statistica delle variabili causali del modello orientata ad eccessiva sintesi comporta una tendenziale sottostima della distribuzione F-N a N elevati e una sovrastima della stessa a N bassi.

Si noti, d'altronde, che la sintesi più o meno spinta della struttura di analisi non condiziona l'indicatore di rischio totale (R o VAD), e quindi nemmeno l'indicatore RI da questo derivato.

La caratteristica risulta perversa ove si consideri che, in controtendenza rispetto agli ambiti applicativi ordinari, l'adozione di modelli più grossolani comporta una sottostima dell'andamento della retrocumulata per i casi di plurifatalità e, d'altronde, una riduzione del margine di sicurezza apparente (distanza tra curva retrocumulata e criteri sul piano F-N) per N intermedi.

Inoltre, e con maggiore rilevanza sulla fragilità dell'indicatore di rischio sociale e dell'applicazione ad esso di un criterio di verifica, il limite è particolarmente grave dal punto di vista applicativo in quanto l'indicazione di un criterio sul piano F-N costituisce un indirizzo di *con-formazione* applicata ad una funzione la cui forma è risultata particolarmente vulnerabile ai difetti dell'analisi.

La bassa consistenza statistica della funzione retrocumulata del danno non impedisce tuttavia di acquisire maggiore informazione dalla sua rappresentazione. Dal punto di vista informativo, infatti, forma e

caratteristiche della retrocumulata rappresentata sul piano F-N possono fornire elementi di controllo sulla qualità dell'analisi di rischio.

In particolare, la scarsità dei punti di rappresentazione di una retrocumulata corrisponde in genere ad una bassa complessità di sviluppo dell'albero degli eventi (mancato rispetto del principio di completezza dell'analisi), con la conseguenza di una sintesi statistica sul valor medio di letalità corrispondente ad una intera classe di incidenti. È già stato sottolineato come tale approccio, sostanzialmente ininfluenza nella verifica del valore atteso del danno, determina una deformazione sistematica nell'andamento della funzione retrocumulata del danno, col conseguente effetto di sottostima crescente al crescere di N.

Ulteriori informazioni sono desumibili dal range di definizione della retrocumulata, e in particolare dal massimo numero di vittime possibili a seguito di incidente. In particolare, il valore massimale di vittime possibili dovrebbe tendere al massimo numero di esposti ipotizzabile per il sistema. Una significativa differenza tra i due valori potrebbe essere causata da incompletezza dell'analisi, o errore per eccesso di sintesi statistica nella determinazione dei punti di condensazione delle variabili analizzate nell'ETA.

Le normative nazionali dei settori citati hanno sempre più frequentemente imposto criteri di verifica sul piano F-N, in alcuni casi affiancando la verifica sul rischio sociale con quella sul rischio individuale. Sembra tuttavia che la tendenza più diffusa sia quella di privilegiare la verifica sul rischio sociale, attraverso l'utilizzo di limiti di accettabilità e l'utilizzo di criteri ALARP sul piano di rappresentazione bilogartimico F-N.

L'indicatore di rischio sociale consente di verificare la distribuzione del rischio per categorie di incidenti a gravità crescente, e la rappresentazione della distribuzione retrocumulata fornisce certamente indicazioni utili per una gestione razionale delle risorse per la prevenzione e la protezione dagli incidenti. Di contro, l'indicatore di rischio sociale non è un indicatore normalizzato sulla platea dei soggetti esposti al rischio, e come tale non dovrebbe essere utilizzato con lo scopo di ottenere una indicazione sul livello di accettabilità del pericolo oggetto di studio.

Lo sviluppo della Quantitative Risk Analysis nel periodo 1960-1970 ha portato a sviluppare gli antecedenti concettuali (con approccio etico – normativo) degli indicatori di rischio. Risale in particolare a quegli anni lo sviluppo e l'evoluzione del concetto di rischio sociale a partire dai concetti di rischio totale e di rischio individuale già disponibili e di uso diffuso (Ball and Floyd, 1998).

La prima applicazione di criteri di accettabilità sul piano F-N si deve a Farmer (1976), che ha usato la rappresentazione retrocumulata del rischio per illustrare l'effetto di contaminazione da radiazioni di Iodio 131 in Curie (Ci) proponendo un limite di inaccettabilità definito da una linea retta nel piano F-N log-log (e cioè un ramo di iperbole sul piano a metrica uniforme). Farmer è stato anche il primo a introdurre un criterio rischio avverso, proponendo per il criterio sul piano F – N una pendenza maggiore di 1 (e in particolare 1,5).

La sistematizzazione definitiva del rischio sociale rappresentato sul piano F-N e dei criteri di verifica su questo adottabili si deve allo stesso Farmer allo scopo di individuare livelli accettabili di rischio per le pratiche di valutazione del rischio e per il supporto tecnico al processo decisionale nella gestione di interi comparti. Negli anni '70 e '80 si propongono quindi rappresentazioni F-N orientate soprattutto al censimento del rischio e alla valutazione comparativa del rischio di incidenti industriali e eventi naturali (Lees, 1996).

L'evoluzione del metodo negli anni '80 e '90 vede i criteri F-N introdotti in modo sempre più frequente nelle norme di gestione della sicurezza di interi comparti, a scopo sostanzialmente ricognitivo e di indirizzo politico (Ball and Floyd, 1998).

Dalla fine degli anni '90 e a tutt'oggi, anche a seguito della diffusione dei metodi di QRA (supportati da programmi di simulazione e strutture di calcolo sempre più potenti), si è assistito alla diffusione del criterio sul piano F-N in un numero crescente di settori, con l'introduzione di criteri F-N per la verifica delle condizioni

di sicurezza relativamente a singole strutture – sistemi e non più solamente con riferimento ad interi comparti: si veda in tal senso Jonkman et al. (2003), Trbojevic (2005), Jonkman (2007), Porske (2008).

Il passaggio dall'utilizzo in chiave retrospettiva a quello in funzione di verifica sulla base di dati inferiti ha sollevato ampie critiche dalla comunità scientifica, e in particolare da quella statistica.

Già nel 1996 Evans e Verlander evidenziavano come l'adozione di criteri di inaccettabilità assoluta sull'indicatore di rischio sociale comportasse una allocazione non ottimale delle risorse, con l'effetto di una peggiore efficacia degli investimenti di sicurezza decisi invece con Analisi Costi Benefici. Dal punto di vista statistico Evans e Verlander dimostrano che l'adozione di un criterio di verifica sul piano F-N corrisponde all'adozione di un criterio Minimax sull'incertezza statistica, col grave effetto di una disutilità attesa alla luce dei criteri di efficienza degli investimenti.

La critica di Evans e Verlander è stata ripresa più volte e soggetta a critica in particolare da Horn e collaboratori (2008) senza tuttavia poter essere confutata.

A sostegno indiretto della critica di Evans e Verlander si registra la modesta affermazione del criterio di verifica sul piano F-N al di fuori del contesto tecnico – ingegneristico: si pensi all'area di ricerca sulla gestione del rischio economico (Abrahamsen e Aven, 2008).

L'ultimo aspetto meritevole di discussione riguarda la qualità statistica dell'indicatore di rischio sociale, al confronto con gli altri indicatori. Quanto presentato ha in effetti dimostrato come l'indicatore di rischio sociale, costituito dalla rappresentazione della funzione retrocumulata del danno sul piano F-N, sia particolarmente esposto ad essere instabile, e in particolare modifica in modo molto rilevante la propria forma in presenza di eventuali (comuni) errori di eccesso di sintesi e di completezza dell'analisi.

La tendenza, sempre più diffusa, di utilizzare criteri di verifica sul piano F-N per la valutazione del livello di sicurezza di singoli impianti determina un effetto di disutilità tanto più grave quanto più il criterio di verifica sul piano F-N è applicato in modo parcellizzato, e cioè applicato a singole strutture o sistemi oggetto di verifica.

Imporre condizioni aggiuntive sulla forma della distribuzione retrocumulata di probabilità di incidente (cioè sul piano F-N) significa invece imporre, nell'ottica della tutela del cittadino – utente, un condizionamento specifico ai modi di incidente e alla caratteristica incidentale plurifatalità del sistema, introducendo dei criteri di preferenza sui modi di aggregazione, per numero di vittime contemporanee, degli effetti di incidente. Una carenza di compliance sul piano F-N dichiara solo l'esistenza di aggregazioni di scenari di rischio cumulato caratterizzati da tempi di ritorno indesiderati in funzione del numero di vittime, imponendo quindi, nel caso, spese di messa in sicurezza orientate a modificare la forma della distribuzione retrocumulata, e solo indirettamente un sostanziale effetto riduttivo del rischio.

2.3.4 Valutazioni etiche circa l'indicatore di rischio sociale sul piano F-N

È d'altronde necessario riflettere anche sul significato etico dell'indicatore da utilizzare per la verifica di compliance. Il tema è stato affrontato da molti autori, ma per la chiarezza e completezza degli argomenti si ricorda soprattutto il colloquio tra Trbojevic e Guarascio.

La questione fondamentale evidenziata da Guarascio e coll. (2007) riguarda il costrutto etico degli indicatori: viene così in evidenza che l'indicatore di rischio individuale è l'unico che abbia un significato etico legato al diritto alla sicurezza del cittadino – utente; ne consegue che il solo indicatore di rischio sociale, non essendo normalizzato per gli esposti al danno, non ha capacità informativa sul livello di tutela del diritto alla sicurezza degli utenti di un servizio / sistema.

Questo fatto è particolarmente rilevante e immediatamente comprensibile ove si consideri che due sistemi potrebbero essere caratterizzati da identica retrocumulata (e quindi identico VAD, in quanto pari all'area sottesa dalla funzione retrocumulata del danno) ma esposti diversi, anche in modo significativo. Per paradosso si consideri un sistema T, utilizzato con probabilità 0,001 da un utente; in caso di utilizzo del sistema, si abbia la morte dell'utente. Si consideri d'altronde un sistema tecnico (che chiameremo galleria) con probabilità di incidente 0,001, utilizzato da 1000 utenti e con danno conseguente all'incidente pari a 1 vittima. I due sistemi (T e la galleria) presentano un profilo di funzione retrocumulata identica. È evidente che la diversa natura del rischio in capo al generico utente risulterebbe immediatamente ove si normalizzasse il valore atteso del danno: nel caso del sistema T, il rischio individuale risulterebbe 1000 volte superiore al sistema galleria.

D'altronde la comunità scientifica (e non solo: si consideri Hartford, 2009) condivide ampiamente la necessità di stabilire un limite di accettabilità che definisca il diritto alla sicurezza del cittadino – utente.

Una panoramica sull'aspetto etico dell'adozione dei vari indicatori e dei vari approcci al rischio è stata proposta da Vanem.

In Inghilterra e in Olanda sono in uso legislazioni che indicano soglie prescrittive di accettabilità del rischio individuale, mentre non sono in uso soglie prescrittive sul valore del rischio sociale, rappresentato dalla retrocumulata sul piano FN (V.M. Trbojevic, 2008).

In particolare, con riferimento alle installazioni chimiche ed industriali, è stabilito un criterio assoluto con valore legale per il rischio individuale pari a 10^{-4} in Inghilterra (rimanendo in capo ai proponenti o agli esperti l'obbligo di adottare un criterio ALARP) e pari a 10^{-6} in Olanda (senza ulteriori obblighi).

Il criterio sul rischio sociale, pure presente in alcune legislazioni dedicate nei due Paesi, non costituisce mai (in questi Paesi) un criterio di verifica con valore legale. Dal punto di vista qualitativo le soglie di verifica sul piano FN (senza valore legale) presentano pendenza pari ad -1 nel UK e pari a -2 in N.

Table 1
Relationship between IR, $F(I)$, N_{max} and β

Criterion	IR	$F(I)$	N_{max}	β
UK (R2P2)	1.00E-4	1.00E-2	715	1
UK (R2P2)	1.00E-5	1.00E-2	9763	1
The Netherlands	1.00E-6	1.00E-3	1644	2
Consistent	1.00E-5	1.34E-3	1000	1
Consistent	1.00E-5	7.36E-4	500	1
Consistent	1.00E-6	1.34E-4	1000	1
Consistent	1.00E-6	7.36E-5	500	1

Figura 54: Criteri di accettazione per IR e funzione retrocumulata del danno sul piano di Farmer

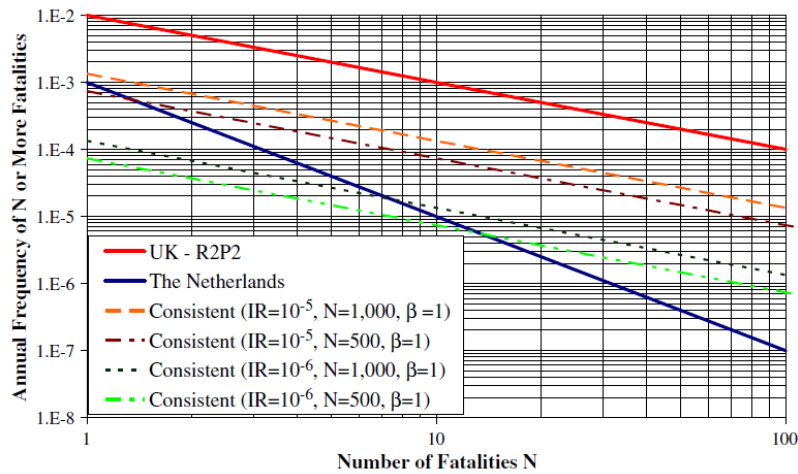


Fig. 1. Societal risk criteria.

Figura 55: Criteri di accettazione sul piano FN

La misura del rischio individuale è invece equa, e costituisce l'indicatore di riferimento normalizzato. L'indicatore sul piano FN non è invece normalizzato, ma si riferisce ad una condizione di esposizione specifica, o ad un'area di riferimento specifica. Per fenomeni pericolosi che hanno come bersaglio un contenuto numero di soggetti esposti in modo costante, una curva FN apparentemente rassicurante può in realtà mascherare valori di rischio individuale assolutamente intollerabile. L'adozione di indicatori sul piano FN è quindi completamente fuorviante per il risk assessment quando il fenomeno riguardi un gruppo di esposti riconoscibili. Ne consegue che l'adozione di un criterio di accettabilità sul piano FN.

La relazione tra IR e RS è in effetti mediata proprio dalla popolazione esposta, in quanto è ovviamente:

$$R = IR \times ESP_{tot}$$

Ma è anche

$$R = \sum_{i=1}^n (F_i - F_{i+1}) \times D_i$$

relazione che lega l'area sottesa dalla FN curve al rischio totale.

Quindi il numero degli esposti al rischio specifico costituisce il mediatore fra il rischio sociale (definito come la probabilità di eguagliare o superare specifiche soglie di danno in un orizzonte temporale definito) e il rischio individuale.

La rappresentazione nella figura seguente [Holicky, 2007] propone un confronto sinottico tra le varie strategie criteriali solitamente utilizzate per le verifiche di sicurezza sul rischio sociale nel settore trasportistico.

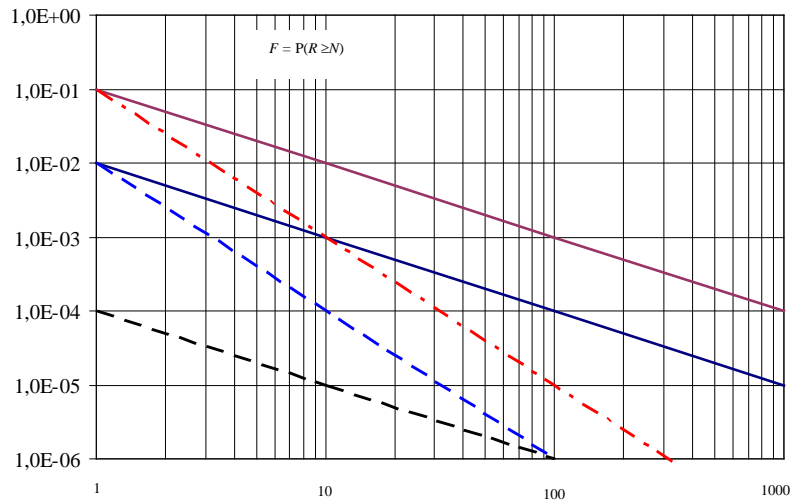


Figura 56: Criteri di verifica del RC utilizzati in letteratura

I criteri si compongono talvolta di una doppia verifica: una assoluta sull'accettabilità e una seconda assoluta sull'inaccettabilità.

La forma analitica dei criteri è del tipo $F \leq F_i = AN^{-K}$

In relazione al caso applicativo delle gallerie stradali, con riferimento ai soli Paesi che adottano un criterio, più o meno cogente, sul piano F-N, si presentano soluzioni significativamente diverse, riportate in sintesi nel grafico sotto.

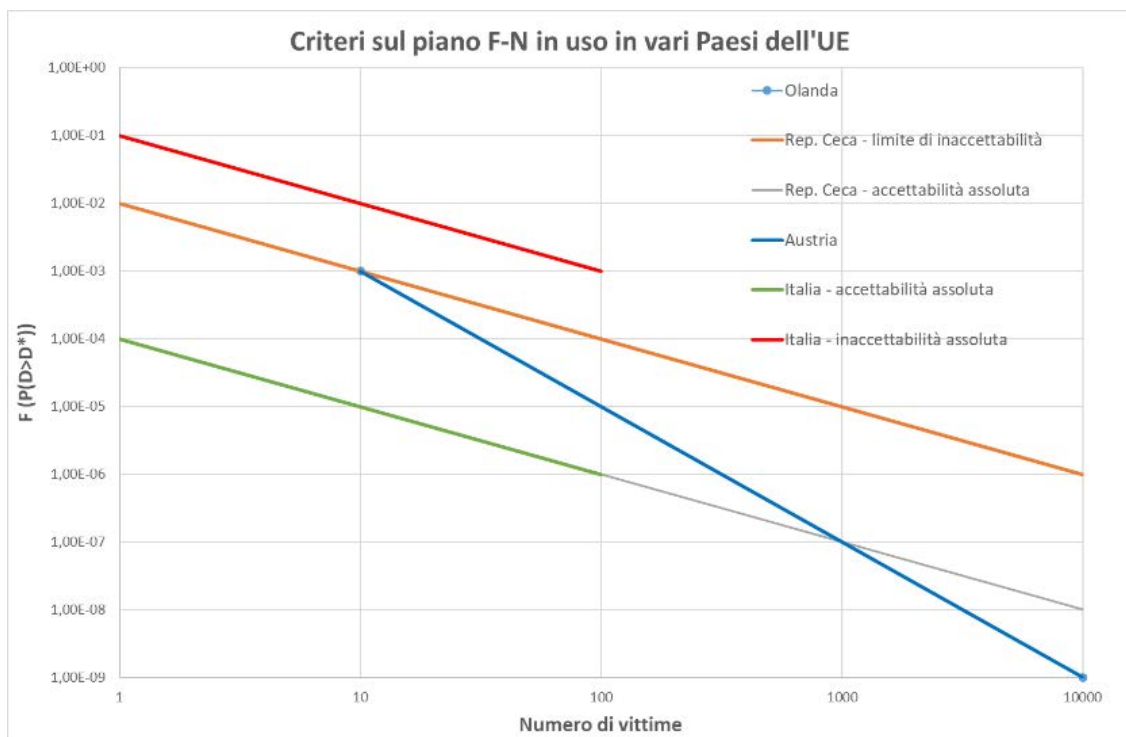


Figura 57: Criteri di verifica (non sempre cogenti) applicati al caso stradale nei vari Paesi Europei

La pendenza della retta soglia viene considerata un indice del grado di avversione al rischio collegato al danno di gravità elevata.

Il modello che nell'accezione sociale può essere ritenuto eticamente accettabile è un criterio di congruenza e stabilità rispetto alla condizione di rischio individuale costante ed indifferente nella dimensione del danno in termini di numero di vittime. In base a questo principio sembrerebbe evidente l'obbligo della scelta di un criterio che nel piano F-N sia rappresentato da una retta con pendenza -1. Questa scelta garantirebbe infatti l'applicazione della condizione di parità rispetto alla "dimensione dell'incidente", privilegiando il riconoscimento del diritto individuale ad un atteggiamento equo non condizionato dall'interesse delle autorità a mostrare alla pubblica opinione apparente avversione alle conseguenze di un incidente "catastrofico" rispetto a quelle di un incidente normalmente accettato.

Tali osservazioni dovrebbero comunque essere relativizzate in considerazione che la F-N di qualunque sistema ingegneristico avanzato mostra uno specifico *risk profile*, in quanto la natura degli incidenti a cui è esposto il sistema sono in generale riconducibili a criticità specifiche e riconoscibili, che rendono sostanzialmente inevitabile (salvo la radicale modifica del sistema) la forma della FN, effetto diretto della forma della funzione PDF delle modalità di fallimento del sistema e delle conseguenze da queste attese; un intervento modificativo della forma locale della FN significa, in altre parole, intervenire in modo privilegiato, laddove non esclusivo, su alcuni scenari di incidente con un approccio selettivo antitetico all'approccio costi – benefici, come evidenziato nel precedente paragrafo.

2.4 La stima del danno

2.4.1 L'incendio

La combustione è una reazione chimica di rapida ossidazione che provoca un forte sviluppo di calore (reazione esotermica). Le specie chimiche in reazione, in funzione del ruolo svolto nel fenomeno, vengono definite:

- *Combustibile*: materiale che è in grado di combinarsi chimicamente con l'ossigeno (o altra sostanza comburente) con emissione di energia termica;
- *Comburente*: sostanza che alimenta la combustione mediante ossidazione del combustibile (in genere è rappresentato dall'ossigeno contenuto nell'aria che respiriamo);
- *Innesco*: sorgente che rilascia un adeguato valore di energia termica che è in grado di dare avvio al processo di combustione (raggiungimento della temperatura di ignizione del combustibile).

La combustione è un fenomeno che avviene tipicamente in fase gassosa e pertanto, quando coinvolge combustibili in fase solida e liquida, deve essere preceduta da necessari passaggi di stato dei partecipanti. Tipicamente in fase liquida si ha evaporazione del combustibile e sua miscelazione con il comburente gassoso, mentre in fase solida si ha il fenomeno della pirolisi, cioè la sublimazione del materiale solido che, riscaldato, passa allo stato vapore.

Lo sviluppo nel tempo della reazione di incendio è in generale un fenomeno non lineare e le stime quantitative dei processi implicati sono spesso complesse.

In relazione alla sua collocazione in un volume definito o meno, un incendio può essere qualificato come:

- *incendio non confinato*: incendio all'aperto non limitato nell'apporto di comburente;

- **Incendio confinato:** incendio che si sviluppa in un ambiente chiuso, il cui sviluppo è condizionato dal limite di ventilazione e di disponibilità di comburente¹⁸.

Il fenomeno di incendio trasforma le specie infiammabili /combustibili e l'ossigeno del comburente in gas di combustione, particolato, energia e residuo carbonizzato. Dal punto di vista definitorio vengono qualificati come gas di combustione quei prodotti della combustione che rimangono allo stato gassoso anche quando raggiungono, raffreddandosi, la temperatura ambiente di riferimento (15°C). La produzione di tali gas dipende dal tipo di combustibile, dalla percentuale di ossigeno presente e dalla temperatura raggiunta nell'incendio.

Nella stragrande maggioranza dei casi, la mortalità per incendio è da attribuire all'inalazione di questi gas che producono danni biologici per anossia o per tossicità.

Tra i principali gas di combustione vanno menzionati:

Monossido di carbonio (CO): Il monossido di carbonio ha una densità lievemente inferiore a quella dell'aria ed è un gas inodore, incolore ed insapore che viene assorbito dall'uomo per via inalatoria (l'organismo umano, anche in presenza di elevate concentrazioni, non è in grado di avvertire la presenza di CO nell'ambiente), mentre sembra accertato che non vi sia assorbimento da parte della cute. L'azione tossica dell'ossido di carbonio è dovuta al fatto che esso altera la composizione del sangue; esso forma, infatti, con l'emoglobina un composto (la carbossiemoglobina - COHb) che impedisce la formazione dell'ossiemoglobina (ipossia anemica), fondamentale per l'ossigenazione dei tessuti del corpo umano.

Tale insufficienza di ossigeno comporta gravi conseguenze per l'organismo umano (gli organi che più risentono della presenza di CO sono quelli che richiedono maggiore fabbisogno di ossigeno come il cervello, il cuore ed i muscoli in movimento).

Nella tabella che segue sono descritti gli effetti fisiologici mediamente riscontrati sull'uomo al variare della concentrazione di CO presente nell'aria inalata.

Concentrazione di CO in aria [ppm]	Sintomo al variare del tempo di esposizione
100	Nessun sintomo per lunghi periodi di esposizione
150	Riduzione dell'acuità sensoriale
250	Emicrania, vertigini dopo 2-3 ore
400	Nausea dopo 1 ora, collasso dopo 2 ore e morte dopo 4 ore
500	Allucinazioni dopo 60-90 minuti
1000	Perdita di coscienza entro 1 ora e morte in meno di 2 ore
1500	Morte in circa 60 minuti
3500	Morte in circa 30 minuti
5000	Perdita di sensi dopo alcuni minuti seguita da morte entro 10 minuti
>8000	Morte immediata per soffocamento

Tabella 7: Effetti prodotti in media nel tempo in una persona al variare della concentrazione volumetrica presente nell'aria inalata di CO.

Anidride carbonica (CO₂): L'anidride carbonica è una sostanza gassosa inodore, più pesante dell'aria, ed è sempre presente durante un incendio di materiali contenenti carbonio. L'anidride carbonica è un gas asfissiante che non ha effetti tossici a basse concentrazioni (fino a valori di 18÷27 mg/m³ che corrispondono a 10000÷15000 ppm), ma viene comunque considerata dannosa perché fa aumentare notevolmente il ritmo

¹⁸ la minima concentrazione volumetrica di O₂ per sostenere il processo di combustione varia tra l'8% e il 12% (NFPA 555)

della respirazione e tale negativo effetto assume particolare rilievo nel corso di un incendio, quando nell'aria ci sono altri gas tossici che, conseguentemente, vengono inalati in maggiore quantità.

Una concentrazione in ambiente del 6% provoca nella persona una perdita di respiro seguita da mal di testa e vomito. La condizione di inabilitazione sopraggiunge per un tempo di esposizione di 2 minuti con una concentrazione di CO₂ nell'aria inalata del 10%.

Idrogeno solforato: Si sviluppa in tutti quegli incendi in cui bruciano materiali contenenti zolfo, come ad esempio la lana, le gomme, le pelli, la carne ed i capelli. L'idrogeno solforato ha odore caratteristico di uova marce, ma tale sensazione che si ha alle prime inalazioni scompare dopo poco tempo. Esposizioni ad aria contenente percentuali tra lo 0,04 e lo 0,07% per più di mezz'ora possono essere pericolose in quanto provocano vertigini e vomito. In percentuali maggiori diviene molto tossico ed attacca il sistema nervoso provocando dapprima affanno e successivamente il blocco della respirazione.

Anidride solforosa: Si può formare nella combustione di materiali contenenti lo zolfo quando questa avviene in eccesso d'aria. In genere se ne formano quantità relativamente modeste salvo che negli incendi di zolfo. Percentuali dell'ordine dello 0,05% sono da considerarsi pericolose anche per esposizioni di breve durata. E' un gas irritante delle mucose degli occhi e delle vie respiratorie.

Acido cianidrico: E' un gas altamente tossico, ma fortunatamente negli incendi ordinari si forma in piccole dosi. Quantità relativamente apprezzabili si trovano invece nelle combustioni incomplete (con poco ossigeno) di seta, lana, resine acriliche, uretaniche e poliammidiche. E' impiegato come fumigante per distruggere i parassiti. Ha odore caratteristico di mandorle amare ed una concentrazione dello 0,03% è già da considerare mortale.

Aldeide acrilica o acroleina: E' un gas altamente tossico ed irritante. Si forma durante l'incendio di prodotti derivati dal petrolio, di oli, grassi ed altri materiali comuni. Concentrazioni superiori a 10 ppm possono risultare mortali.

Fosgene: Gas altamente tossico, è presente nelle combustioni di materiali contenenti cloro, come ad esempio alcuni materiali plastici. La formazione di tale gas è da temere soprattutto se l'incendio si sviluppa in un ambiente chiuso.

Ammoniaca: Si forma nella combustione di materiali contenenti azoto (lana, seta, materiali acrilici, fenolici e resine melamminiche). L'ammoniaca è impiegata in alcuni impianti di refrigerazione e costituisce un notevole rischio di intossicazione in caso di fuga. Produce sensibili irritazioni agli occhi, al naso, alla gola ed ai polmoni. L'esposizione per mezz'ora all'aria contenente 0,25-0,65% di ammoniaca può causare seri danni all'organismo e addirittura la morte.

Perossido di azoto: Gas di colore rosso bruno altamente tossico. Esposizioni all'aria con percentuali dallo 0,02% allo 0,07% possono essere mortali in breve tempo. Esso si forma insieme ad altri vapori nitrosi nella combustione della nitrocellulosa, del nitrato di ammonio e di altri nitrati organici.

Acido cloridrico: E' un prodotto della combustione di tutti quei materiali contenenti cloro come la maggioranza delle materie plastiche. La concentrazione di 1,500 ppm è fatale in pochi minuti. La sua presenza viene facilmente avvertita a causa dell'odore pungente e del suo effetto irritante per le mucose. L'acido cloridrico ha inoltre la proprietà di corrodere i metalli.

Le fiamme sono costituite dall'emissione di luce conseguente alla combustione di gas sviluppatasi in un incendio.

In particolare, nell'incendio di combustibili gassosi è possibile valutare con buona affidabilità di stima la temperatura di combustione dal colore della fiamma.

Colore della fiamma	Temperatura (°C)
Rosso nascente	500
Rosso scuro	700
Rosso ciliegia	900
Giallo scuro	1100
Giallo chiaro	1200
Bianco	1300
Bianco abbagliante	1500

Tabella 8: Scala cromatica delle temperature nella combustione dei gas

I fumi sono formati da piccolissime particelle solide (aerosol), liquide (nebbie o vapori condensati) disperse nei gas prodotti durante la combustione.

Salvo casi particolari (ad es. la combustione del metano), la combustione è quasi sempre accompagnata dalla formazione di fumi; normalmente sono prodotti in quantità tali da impedire la visibilità ostacolando l'attività dei soccorritori e l'esodo delle persone.

È quindi il fumo il primo ostacolo che si deve evitare nei locali ove si sviluppa l'incendio.

Le particelle solide dei fumi sono costituite da sostanze incombuste: particelle di carbonio, catrami e ceneri. Queste, trascinate dai gas prodotti dalla combustione, formano il fumo di colore scuro. Le particelle liquide, invece, sono costituite essenzialmente da vapore d'acqua proveniente dall'umidità dei combustibili, ma soprattutto dalla combustione dell'idrogeno. Al di sotto dei 100°C, quando i fumi si raffreddano, il vapore d'acqua condensa dando luogo a fumo di colore bianco.

Negli incendi l'eccesso d'aria non è mai assicurato, quindi vi è una notevole possibilità che all'interno dei fumi siano presenti gas tossici. È noto l'effetto irritante del fumo sulle mucose degli occhi e sulle vie respiratorie che si va a sommare alla normale carenza di ossigeno al momento dell'incendio.

Il calore è la causa principale della propagazione degli incendi. Esso realizza l'aumento della temperatura di tutti i materiali e corpi esposti, provocandone il danneggiamento fino alla distruzione. Oltre certi limiti, il calore causa all'uomo disidratazione dei tessuti, difficoltà respiratorie e scottature.

Una temperatura dell'aria di 150°C è da ritenersi sopportabile solo per brevissimo tempo e sempre che l'aria sia sufficientemente secca.

Negli incendi, invece, sono presenti grandi quantità di vapore acqueo, così anche temperature di 50°C risultano estremamente dannose.

2.4.2 Dinamica dell'incendio

Con approccio qualitativo si possono individuare le principali fasi evolutive di un incendio confinato che coinvolge tutto il materiale combustibile presente:

Fase di ignizione: questa fase ha inizio nel momento in cui un materiale combustibile viene posto a contatto con una sorgente di calore anche modesta. Perché il materiale combustibile si accenda è necessario che esso sia in grado di sviluppare vapori infiammabili in tempi relativamente brevi. Se ciò non avviene accade che la sorgente termica si esaurisce prima che si verifichi l'accensione. In generale l'ossigeno disponibile è sovrabbondante per le modeste e limitate reazioni che si verificano inizialmente e quindi il progredire di questa fase è controllato dalla quantità di combustibile presente.

Fase di crescita o propagazione: in questo stadio, se non tempestivamente arginato, l'incendio coinvolge altri materiali combustibili e la dimensione del fuoco va via via aumentando con conseguente produzione di gas tossici e corrosivi. Indipendentemente dalle condizioni di ventilazione, si verifica un aumento del coinvolgimento all'incendio dei combustibili solidi e liquidi ed un aumento della temperatura e dell'energia di irraggiamento.

Fase di incendio generalizzato: in questa fase l'incendio si sviluppa con pieno vigore in quanto vengono coinvolte grandi quantità di combustibile; le temperature crescono rapidissimamente e si verifica una crescita esponenziale della velocità di combustione. Siamo ormai allo stadio chiamato **flashover** che rappresenta una fase di non ritorno perché solo prima che esso si verifichi è possibile pensare di controllare l'incendio; è inoltre una fase di instabilità del sistema da un punto di vista termo-fluidodinamico nella quale si passa bruscamente dalla fase di incendio localizzato a quella di incendio generalizzato.

La ISO TR 13387-2 "Fire Safety Engineering – Part 2: Design Fire Scenarios and Design Fires" indica che il flashover è una fase di transizione in corrispondenza della quale la temperatura dello strato di gas caldi a soffitto raggiunge il valore di 600°C e il flusso termico a livello del pavimento è pari a 20 kW/m².

Fase di estinzione e raffreddamento: quando l'incendio ha terminato di interessare tutto il materiale combustibile ha inizio la fase di decremento delle temperature all'interno dell'ambiente a causa della progressiva diminuzione dell'apporto termico residuo e della dissipazione di calore attraverso i fumi e di fenomeni di conduzione termica e si ha gradualmente l'estinzione dell'incendio.

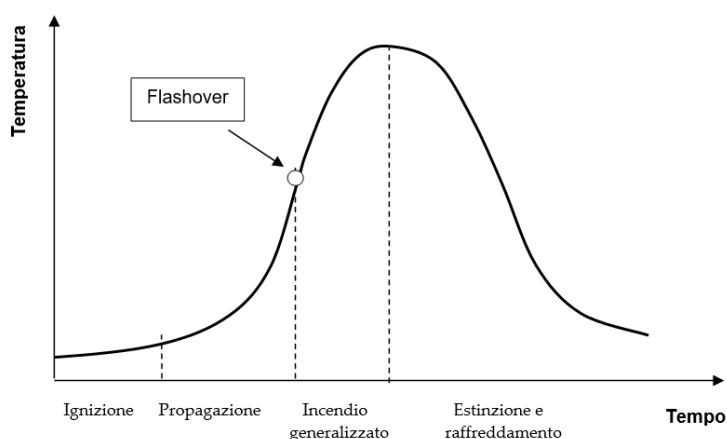


Figura 58: Dinamica dell'incendio.

2.4.3 Potenza termica generata dall'incendio

Il valore della potenza termica totale rilasciata nell'ambiente varia continuamente nel tempo durante l'evoluzione di un incendio.

Il modo migliore per rappresentare un incendio è la curva del rilascio di calore HRR (Heat Released Rate) che rappresenta il rateo (velocità) di energia fornita per unità di tempo.

L'HRR è la grandezza che influenza molte altre caratteristiche di un ambiente coinvolto nell'incendio, come la produzione dei fumi e gas e l'aumento di temperatura.

A sua volta però, l'HRR dipende da molte caratteristiche del combustibile come il rapporto tra massa e superficie, la posizione (orizzontale, verticale), la geometria, la modalità di deposito, ecc.

Ad ogni istante dell'incendio corrisponde un valore di potenza termica rilasciata, espressa in kW, data dal prodotto del potere calorifico del combustibile per la sua velocità della combustione.

$$HRR(t) = H \cdot m_c(t)$$

Dove:

- HRR (t) è espresso in kWh
- H è il potere calorifico in kJ/kg;
- m_c è la velocità di combustione espressa in kg/s.

L'analisi della dinamica della combustione è fondamentale per la scelta degli scenari di incendio; un incendio con un picco di potenza relativamente basso ma con rapido sviluppo, può risultare più critico, per la sicurezza delle persone, di un altro che presenti un picco più alto ma con sviluppo lento.

Gli effetti provocati da un incendio sono principalmente influenzati dal valore della potenza termica totale rilasciata, è quindi fondamentale procedere a una stima accurata della sua variazione nel tempo.

Per effettuare un'analisi delle condizioni di incendio è necessario quindi individuare, nello scenario previsto, la probabile variazione nel tempo della potenza termica rilasciata che indica, appunto, la reale entità di combustibile coinvolto nello sviluppo dell'incendio.

In definitiva, va quindi sottolineato che se lo scopo della creazione e dello studio di uno scenario di incendio è la salvaguardia della vita umana, occorre studiare la fase di incendio precedente al flashover, in quanto, successivamente, nell'ambiente si creano condizioni in grado di provocare all'organismo umano seri e irreparabili danni, anche per brevissimi periodi di esposizione ai prodotti della combustione. All'opposto studi mirati alla verifica delle condizioni strutturali di un compartimento soggetto a incendio richiedono uno studio orientato all'analisi della fase di incendio successiva al verificarsi del flashover.

Numerosi modelli analitici sono disponibili in letteratura per la descrizione della funzione HRR(t) ma il modello che meglio rappresenta l'incendio dei comuni materiali combustibili contenuti all'interno delle costruzioni è qualitativamente quello rappresentato in seguito.

Il grafico illustra il tipico andamento nel tempo della potenza termica totale rilasciata nell'ambiente in un incendio avente sviluppo controllato dalla superficie di ventilazione.

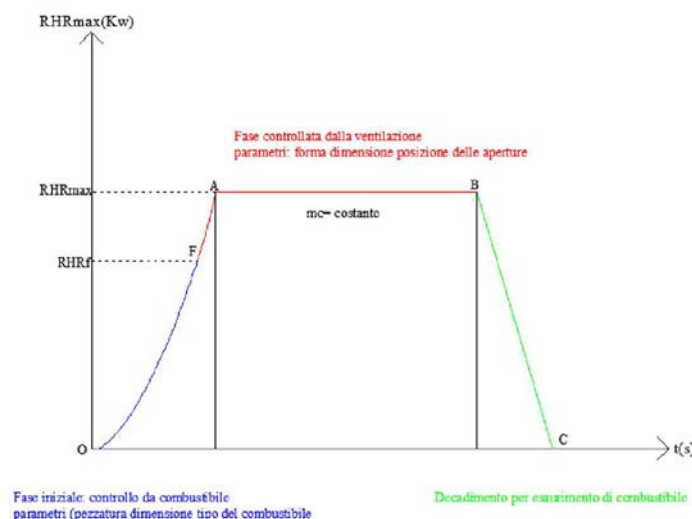


Figura 59: Curva HRR in funzione del tempo t.

Si possono individuare vari tratti:

- **Tratto OF:** rappresenta la fase iniziale dell'incendio caratterizzata da una crescita quadratica della potenza termica sviluppata. L'andamento della curva segue la seguente legge:

$$HRR(t) = \alpha t^2$$

dove:

α = coefficiente di crescita del fuoco in [kJ/s³]; ricavabile dalla seguente espressione:

$$\alpha = 1000 / t_g^2$$

t_g = tempo necessario affinché HRR cresca fino al valore di 100 kW

t = tempo in secondi (s)

Gli incendi vengono classificati in funzione della velocità di crescita, che per definizione può essere:

Tipo di crescita dell'incendio	Tempo caratteristico (t_g)	Coefficiente di crescita (α)
Crescita lenta (Slow)	600 s	$2,77 \times 10^{-3} \text{ kJ/s}^3$
Crescita media (Medium)	300 s	$11,11 \times 10^{-3} \text{ kJ/s}^3$
Crescita veloce (Fast)	150 s	$44,44 \times 10^{-3} \text{ kJ/s}^3$
Crescita ultraveloce (Ultra-fast)	75 s	$177,77 \times 10^{-3} \text{ kJ/s}^3$

Tabella 9: Tempo di crescita dell'incendio.

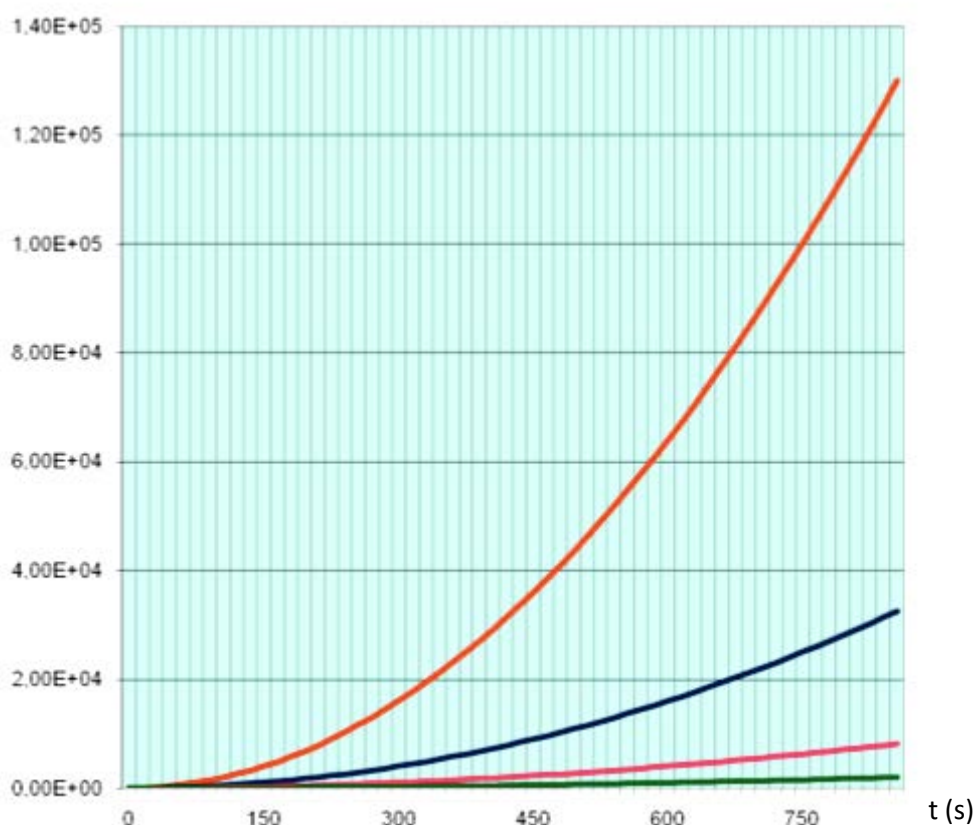


Figura 60: Curve HRR di sviluppo di incendio

- **Tratto FA:** il passaggio da HRR_f a HRR_{max} è quasi a gradino e si può approssimare in $t_A - t_F = 60$ sec;
- **Tratto AB:** in questa fase la curva presenta un andamento costante poiché il valore della velocità di combustione si mantiene costante nel tempo e pari al valore massimo possibile che può essere

raggiunto nel locale in relazione a forma, dimensioni e posizionamento delle aperture di ventilazione presenti;

- **Tratto BC:** in questa fase la curva presenta un andamento di decadimento lineare, dovuto all'esaurimento del combustibile presente.

2.4.4 La modellazione termo-fluidodinamica dell'incendio

La grande e crescente disponibilità di calcolo e velocità ha consentito, negli ultimi venti anni, lo sviluppo della tecnica simulativa e analitica per la modellazione degli incendi.

I due possibili approcci matematici alla modellazione d'incendio sono quello probabilistico e quello deterministico.

I **modelli probabilistici** trattano lo sviluppo di un incendio come una serie di eventi successivi. I modelli che si basano su questo tipo di approccio sono detti a "strati di transizione" in quanto il passaggio da un evento all'altro è stabilito da regole matematiche; a ciascun punto di passaggio, viene assegnata una probabilità basata su analisi di dati sperimentali, di risultati ottenuti con programmi di calcolo e di informazioni tratte da incendi storici. Il modello probabilistico è utile per valutare la probabilità che si verifichi un incendio in un prefissato ambiente, ma fornisce poche informazioni sulla produzione e distribuzione dei vari prodotti della combustione, come ad esempio la concentrazione di elementi tossici, l'andamento della temperatura ed il movimento del fumo.

I **modelli deterministici** forniscono invece un approccio più rigoroso basato su leggi fisiche e chimiche legate all'incendio mediante espressioni matematiche. I modelli d'incendio deterministici sono generalmente suddivisi in modelli a zona e modelli di campo.

Essi possono essere considerati, ai sensi del D.M. 09/03/2007 Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, dei modelli di incendio numerici avanzati.

Modelli a zone

I modelli a zone o modelli a parametri concentrati risolvono in modo esatto un set di equazioni approssimate di conservazione della quantità di moto, dell'energia termica e della massa, algebriche (stato stazionario) o differenziali (stato transitorio).

Si ipotizza che il dominio di calcolo sia diviso in due o più volumi a perfetta miscelazione, nei quali si assume che le proprietà (pressione, temperatura, concentrazione delle specie) siano omogenee.

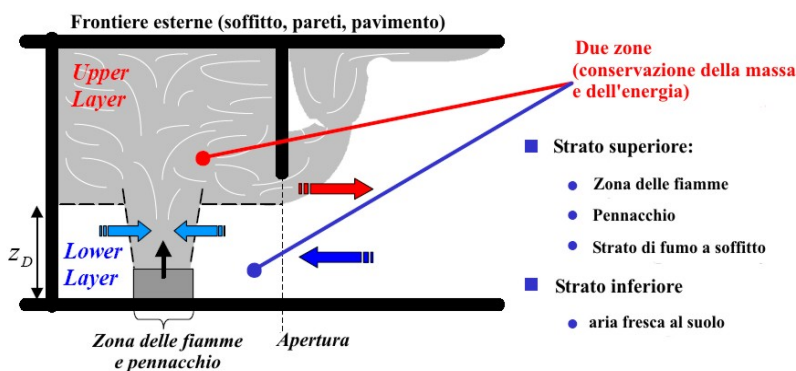


Figura 61: schema di rappresentazione della logica di interpretazione fisica dei modelli a zone

L'output standard di tali modelli è costituito dal valore delle proprietà intensive allo stato stazionario e/o dai loro profili temporali; inoltre, la loro applicazione è limitata alla modellazione di incendi in ambiente confinato di geometria semplice.

In incendi di questo tipo, all'interno del compartimento possono identificarsi tre zone:

- uno strato caldo superiore (*upper layer*);
- uno strato freddo inferiore (*lower layer*);
- una zona detta "plume", in cui si ha la combustione e il risucchio dell'aria (*air entrainment*) dallo strato inferiore a quello caldo superiore.

In altre parole l'incendio si comporta come una pompa che aspira aria dallo strato inferiore freddo e la pompa verso lo strato superiore caldo insieme ai prodotti della combustione.

Uno dei modelli a zone più utilizzato è il CFAST, Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, rilasciato liberamente dal NIST (National Institute of Standards and Technology).

Con questo modello, il compartimento viene suddiviso in due volumi perfettamente miscelati, uno superiore a temperatura maggiore (*hot layer*), caratterizzato dagli effetti convettivi di fumi e gas caldi prodotti dalla combustione, uno inferiore a temperatura minore (*cold layer*), separato da una interfaccia neutra puramente ideale, la cui posizione varia con l'evoluzione dell'incendio.

I due volumi scambiano tra loro e con l'ambiente esterno massa ed energia. In particolare, formule semiempiriche approssimate consentono il calcolo del flusso di energia trasportato per via conduttiva e radiante. La sorgente combustibile è, infine, modellata come una pompa puntiforme di massa ed entalpia.

La reazione di combustione è ipotizzata infinitamente veloce rispetto al ricambio d'aria. In tali ipotesi l'incendio è controllato dalla ventilazione tramite un parametro definito "fattore di ventilazione".

Il set completo delle equazioni di bilancio risolte da CFAST è di seguito riportato:

- Equazione differenziale della massa nel piano i-esimo.
- Equazione differenziale della pressione.
- Equazione differenziale dell'energia nel piano i-esimo.
- Equazione differenziale del volume nel piano i-esimo.
- Equazione differenziale della densità nel piano i-esimo.
- Equazione differenziale della temperatura nel piano i-esimo.

Il software richiede in input informazioni sulla geometria del compartimento (dimensioni, superficie di ventilazione), sulle proprietà di trasporto dei materiali costituenti le pareti al fine di stimare la portata termica attraverso esse dispersa, sulla posizione e geometria del focolaio iniziale che, ricordiamo, viene considerato puntiforme, sulla curva HRR nel tempo.

Il modello fornisce in output ciò che segue:

- temperatura (media) in ciascuno dei due strati;
- posizione dell'interfaccia tra le zone;
- concentrazione di ossigeno (O_2);
- concentrazione di monossido di carbonio (CO);
- concentrazione di anidride carbonica (CO_2);
- un indice di visibilità;
- portate di massa ed energia scambiate con l'ambiente esterno e/o con altri compartimenti.

Il software CFAST ha una capacità di modellazione limitata ai soli incendi confinati in compartimenti dalla geometria alquanto semplice; esso risulta, in ogni caso, molto importante perché i risultati sono stati validati tramite confronto con dati sperimentali.

Modelli di campo

Il modello di campo è il secondo tipo di modello deterministico e oggi rappresenta lo strumento di punta dell'ingegneria della sicurezza antincendio.

In questo studio ci si soffermerà proprio sull'applicazione e l'utilizzo di questa tipologia di modello.

Nelle valutazioni eseguite con i modelli di campo, l'ambiente da esaminare, detto anche "dominio di calcolo", viene diviso in un gran numero di volumi elementari.

Il modello, per prevedere lo sviluppo dell'incendio, risolve le equazioni fondamentali dell'energia, della massa, della quantità di moto (si tratta di equazioni non lineari, parzialmente differenziali, tridimensionali e funzioni del tempo, note come equazioni di Navier-Stokes) all'interno di ciascuno di tali volumi (denominati *mesh*), tenendo conto delle variazioni che intervengono in ciascuno di essi per effetto di cambiamenti che si hanno in quelli limitrofi, agendo in modo iterativo.

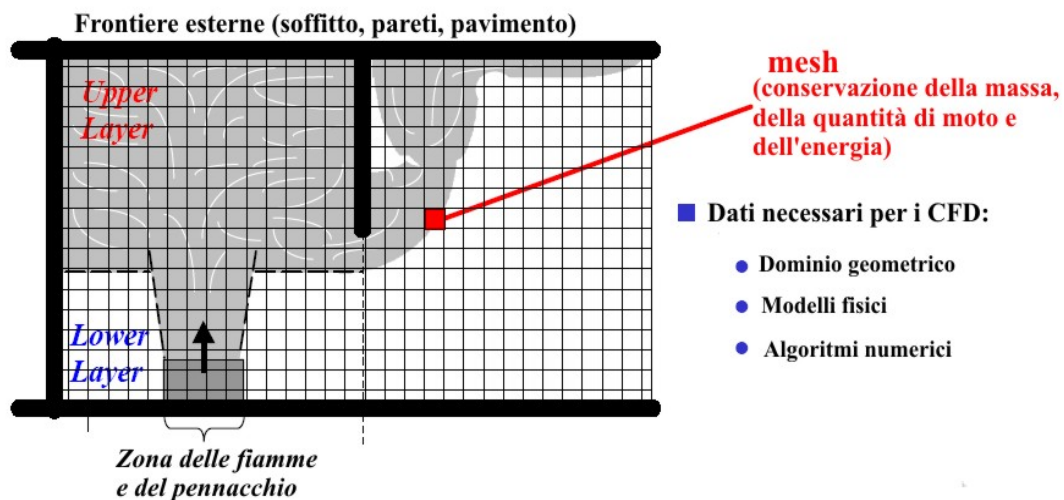


Figura 62: Rappresentazione del modello di campo.

I modelli di campo implementati in software di fluidodinamica computazionale (CFD - Computational Fluid Dynamics) costituiscono la più raffinata possibilità di simulazione di incendio attualmente disponibile.

La fluidodinamica computazionale è la tecnica che permette lo studio dei problemi di fluidodinamica mediante l'utilizzo del computer.

Attraverso questa è possibile, infatti, pervenire al calcolo dei campi vettoriali di velocità e scalari di temperatura e concentrazione tramite l'integrazione numerica delle equazioni differenziali rappresentative dei bilanci accoppiati di quantità di moto, energia e materia.

I principali pregi della fluidodinamica computazionale risiedono nella sua estrema flessibilità che permette di trattare geometrie complesse, con la possibilità di descriverle dettagliatamente, tramite la costruzione di griglie molto particolareggiate, oltre che di imporre tipologie di condizioni al contorno molto diversificate; in aggiunta, è possibile simulare i fenomeni turbolenti connessi con la propagazione e dispersione dei prodotti da combustione.

I modelli di campo, rispetto ai modelli a zona, permettono di rappresentare meglio l'ambiente nel quale si sviluppa l'incendio, poiché, con l'impiego di celle tridimensionali, possono essere descritte geometrie differenti da quelle assimilabili al parallelepipedo.

Il limite più evidente di questo strumento di calcolo è, però, il suo onere computazionale che è sicuramente ben maggiore di quello richiesto dai modelli di incendio a zone; sono, infatti, necessari lunghi tempi di elaborazione anche in presenza di ambienti di dimensioni limitate.

Esistono numerosi software, di tipo commerciale, che risolvono le equazioni della fluidodinamica; tra i più noti FDS (Fire Dynamic Simulator), sviluppato dalla Fire Research Division - Building and Fire Research Laboratory (BFRL) del National Institute of Standards and Technology (NIST).

FDS fornisce accettabili livelli di affidabilità dei risultati, verificati in una grande quantità di applicazioni di ricerca e di progetto, tanto da farne il riferimento mondiale tra i solutori computazionali di incendio.

L'input software è costituito da una discretizzazione del dominio di calcolo in celle elementari, ottenendo una griglia di calcolo (mesh) sulla quale applicare metodi di risoluzione iterativi per la risoluzione per approssimazione successiva delle equazioni di Navier-Stokes.

La modellazione di uno scenario fluidodinamico mediante un codice CFD procede attraverso le fasi di:

- definizione del dominio di calcolo (dominio fisico di riferimento) nel quale si sviluppa il fenomeno oggetto di studio e sua discretizzazione opportuna;
- definizione del modello fisico e di quello numerico;
- definizione delle condizioni al contorno, specificando le proprietà termo-chimiche ai confini del dominio di calcolo;
- risoluzione delle equazioni in maniera iterativa, fino al raggiungimento di un predefinito grado di accuratezza controllato con verifiche continue sui resti risultanti dalla soluzione approssimata delle equazioni esatte;
- resa grafica dei risultati ottenuti, con rappresentazione di campi, variabili nel tempo, delle specie chimiche o delle grandezze fisiche di interesse;
- analisi dei risultati ottenuti.

Ad esempio, nel caso di applicazione della CFD alle simulazioni di incendio, i principali dati specifici richiesti in input sono la geometria del dominio di integrazione, la tipologia dei materiali costituenti la frontiera e i parametri caratteristici della curva HRR (Heat Release Rate: velocità del rilascio termico) nel tempo, le caratteristiche dei materiali combustibili, quelle delle pareti interne al dominio di calcolo e della frontiera dello stesso, per la valutazione della trasmissione del calore.

In genere il set di equazioni risolte da un programma CFD, dedicato allo studio dell'incendio, è il seguente:

- Continuità: l'equazione di continuità rappresenta il bilancio di massa dell'aria.
- Impulso: le tre equazioni d'impulso rappresentano il bilancio delle forze nell'aria, nelle tre direzioni degli assi cartesiani. Le forze in gioco sono gli attriti, le spinte di Archimede e le forze di pressione. L'insieme delle equazioni di continuità e di impulso viene indicato come equazioni di Navier-Stokes.
- Energia: l'equazione dell'energia rappresenta il bilancio dell'energia termica. Nella zona di incendio viene prodotta una grande quantità di calore. L'energia viene scambiata nell'aria per convezione e per irraggiamento; ciò avviene anche fra l'aria e le strutture solide.
- Grandezze turbolente: queste equazioni (tipicamente due) rappresentano il bilancio delle grandezze turbolente. In un incendio si ha lo spostamento di grandi volumi d'aria che producono vortici grandi e piccoli (turbolenze). La turbolenza provoca forti miscelamenti.
- Fumo: l'equazione per il fumo rappresenta il bilancio del fumo. Oltre al calore, nella zona di incendio, viene prodotto del fumo che viene poi trasportato in altre zone.

- Energia nei solidi: quando si vuole studiare l'impatto termico sugli elementi solidi si deve risolvere anche l'equazione dell'energia nei solidi che rappresenta il bilancio dell'energia termica all'interno degli stessi. Il trasporto di calore avviene, in questo caso, puramente per conduzione.

2.4.5 I codici di calcolo computazionali

La struttura dei codici commerciali CFD si articola generalmente in tre parti fondamentali deputate ad eseguire ciascuna delle tre fasi della simulazione.

- pre-processore;
- solutore;
- post-processore.

Di esse, il *pre-processore* consente, utilizzando un CAD vettoriale, la descrizione geometrica del dominio di integrazione, la sua discretizzazione spaziale tramite la generazione di un'opportuna griglia, la specificazione della tipologia delle sue frontiere e la descrizione, in termini di proprietà termochimiche, degli oggetti presenti all'interno del dominio e le condizioni al contorno.

Il dominio così generato è trasferito al *solutore* mediante la traduzione dei comandi grafici in comandi comprensibili al solutore stesso, il quale permette di effettuare i calcoli necessari per la risoluzione del problema. Esso poi integra numericamente le equazioni accoppiate di trasporto, approssimando numericamente le variabili di flusso incognite, discretizzando nel tempo e nello spazio le equazioni in argomento e risolvendo, infine, il risultante sistema di equazioni algebriche.

I risultati prodotti dal solutore generalmente vengono riportati in file di testo e possono essere visualizzati e/o elaborati grazie ad un *post-processore*, che consente di visualizzare la geometria del dominio di integrazione e la sua griglia, di rappresentare graficamente i campi vettoriali e scalari, nel caso di simulazioni in transitorio, permettere di eseguire animazioni filmate che illustrino l'evoluzione dinamica delle grandezze di interesse.

2.4.6 FDS 5: modellazione e simulazione dell'incendio

Per effettuare le simulazioni di incendio e di esodo, in questo studio sono stati utilizzati due applicativi software: FDS (per la modellazione dell'incendio) ed EVAC (modulo dedicato al calcolo delle simulazioni relative alle evacuazioni) ed il post-processore Smokeview.

Il solutore utilizzato in questo lavoro è il software FDS (Fire Dynamics Simulator - Simulatore Dinamico degli effetti del Fuoco), sviluppato dai ricercatori del NIST - National Institute of Standards and Technology (www.nist.gov).

FDS è distribuito gratuitamente dal NIST, nella forma del pubblico dominio ed è scaricabile all'indirizzo <http://www.fire.nist.gov/fds/>.

Il software si basa su un modello computazionale di campo; in particolare è un CFD (Computational Fluid Dynamics), cioè un codice computazionale fluidodinamico della corrente del flusso fluido, causato da un incendio.

Congiuntamente a FDS viene distribuito un altro programma denominato Smokeview (letteralmente "visualizzazione di fumo"), usato per ottenere la visualizzazione dei risultati di una simulazione effettuata con FDS.

La prima versione ufficiale di FDS, rilasciata nel 2000, era indirizzata alle simulazioni di grande scala del movimento del fumo da incendio, condizioni ideali per incendi ventilati e per le progettazioni in cui il tasso di rilascio del calore dell'incendio (HRR) non era calcolato dal modello, ma veniva specificato dal progettista o richiesto dalle autorità preposte al controllo del progetto.

Negli anni successivi sono stati introdotti numerosi miglioramenti che hanno portato alla diffusione di nuove versioni del codice di calcolo: versione 2 (2001); versione 3 (2002) e versione 4 (2004).

Successivamente, durante le indagini del NIST sul crollo del World Trade Center e sull'incendio del locale notturno a Rhode Island, è diventata evidente la necessità di modificare FDS per renderlo un efficace strumento per la ricostruzione dell'origine dell'incendio.

Nel 2005 è stata quindi diffusa la nuova versione 5, che ha apportato una revisione importante del modello di calcolo, aumentandone la flessibilità e le funzionalità.

Il codice FDS risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes, adattate per flusso a bassa velocità, con una particolare attenzione sul trasporto del fumo e del calore provocati da incendio.

Queste equazioni sono risolte numericamente dividendo lo spazio fisico dove è simulato l'incendio (dominio da modellizzare) in volumi di controllo o celle.

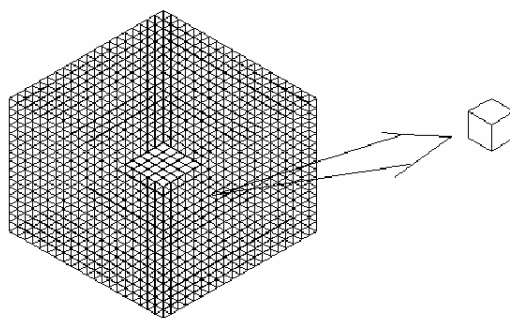


Figura 63: Dominio di calcolo in FDS.

Le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia e delle specie chimiche sono discretizzate in equazioni algebriche che poi sono risolte per ogni cella di controllo fornendo il valore delle variabili di campo (temperature, pressioni, velocità, densità, ecc.).

All'interno di ogni cella la velocità del gas, la temperatura ed altri parametri chimico-fisici, sono assunti uniformi e variabili solo nel tempo.

L'accuratezza con cui la dinamica dell'incendio può essere simulata dipende dal numero di celle che possono essere incorporate nella simulazione. Questo numero è limitato solo dalla potenza di calcolo disponibile. Attualmente i normali singoli processori possono elaborare scenari con circa un milione di celle.

Occorre tener presente che i fenomeni simulati hanno grandezze spaziali diverse; infatti, i fenomeni di combustione avvengono in spazi dell'ordine di un millimetro, mentre la diffusione turbolenta dei gas ha scale tipiche comprese tra un centimetro e diverse decine di centimetri, invece la scala degli edifici dove avviene l'incendio è dell'ordine di metri. Pertanto, sorge il problema di arrivare ad una definizione della grandezza di una cella che tenga conto di queste diverse scale presenti, con la consapevolezza che si potranno catturare alcuni aspetti del fenomeno e non vederne altri.

Il Fire Dynamic Simulator può essere usato per modellare i seguenti fenomeni:

- trasporto a bassa velocità di calore e prodotti della combustione di un incendio;
- trasferimento termico per irraggiamento e convezione tra gas e superfici solide;

- propagazione delle fiamme e crescita dell'incendio;
- attivazione di sprinkler, rivelatori di calore e rivelatori di fumo;
- soppressione dell'incendio mediante water spray.

Il codice è diviso in *sezioni* ciascuna delle quali modella i diversi fenomeni fisici e proprietà dei materiali, quali:

il modello idrodinamico: FDS risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes sviluppata per la soluzione di moti a bassa velocità generati da gradienti termici, con una particolare attenzione ai fenomeni di trasporto di fumo e calore tipici degli incendi. La turbolenza viene trattata utilizzando la teoria di Smagorinsky tramite il metodo LES (Large Eddy Simulation). Se le celle della mesh di calcolo sono sufficientemente fitte, è possibile eseguire una simulazione anche in modalità DNS (Direct Numerical Simulation), ossia una simulazione numerica diretta, procedendo quindi alla soluzione diretta delle equazioni di Navier-Stokes senza alcun modello di turbolenza. LES è la modalità predefinita di default utilizzata da FDS.

Il modello di combustione: per la maggior parte delle applicazioni, FDS assume una reazione di combustione a singolo stadio; le specie chimiche coinvolte nella reazione vengono calcolate in base ad un modello a frazione di miscela (mixture fraction). La frazione di miscela è una quantità scalare che permette di determinare le frazioni di massa dei costituenti la fase fluida in ciascun punto del dominio di calcolo. La frazione di miscela (Z) è una funzione dello spazio e del tempo che indica la frazione di massa del fluido presente legata al flusso di combustibile. $Z=1$ rappresenterà la condizione di combustibile puro; $Z=0$ corrisponderà invece alle condizioni di aria pura. Il modello a frazione di miscela implementato all'interno del software prevede l'impiego di due o tre parametri. Da tali parametri è possibile ricavare le frazioni di massa dei reagenti e dei prodotti della combustione in base a relazioni note come *relazioni di stato*. Nel caso di frazione di miscela a due parametri, i due termini in questione saranno dati dalla frazione di massa del combustibile che non ha ancora partecipato alla combustione e dalla frazione di massa dei prodotti della combustione. È però possibile modellare anche reazioni a due stadi (come a reazione che rappresenta l'ossidazione del combustibile in monossido di carbonio e la successiva ossidazione di questo in anidride carbonica). In questo caso, il modello a frazione di miscela utilizza tre parametri: il primo rappresenta il combustibile che non ha reagito, il secondo la frazione di combustibile che ha completato il primo stadio della reazione (formazione del monossido di carbonio) e il terzo la frazione di massa del combustibile che ha ultimato l'ultimo stadio della reazione (l'eventuale ossidazione del monossido di carbonio in anidride carbonica).

Il modello del trasporto per irraggiamento: il calcolo del flusso termico per irraggiamento è incluso nel modello attraverso la soluzione dell'equazione del trasporto del calore, data l'ipotesi di gas come corpo grigio.

La **geometria dello scenario** preso in considerazione: il sistema di equazioni alle derivate parziali che regola la fluidodinamica richiede, fatta eccezione per casi molto semplici, che il dominio di calcolo, cioè la porzione di spazio che si intende simulare, sia suddiviso in elementi più piccoli, chiamati celle o mesh. L'insieme di tali celle prende il nome di griglia di calcolo. FDS utilizza una griglia di calcolo di tipo cartesiano e la modellazione degli oggetti deve essere coerente con la sottostante griglia di calcolo.

Le **condizioni al contorno**.

Una simulazione con il codice computazionale fluidodinamico (CFD) richiede ore di calcolo chiamate "tempo computazionale".

Uno dei fattori più importanti che influenza il tempo computazionale è la dimensione di griglia della maglia (mesh) utilizzata per discretizzare il dominio, tale per cui più essa sarà piccola, maggiore sarà il tempo richiesto per l'elaborazione dei dati, in quanto più elevata è l'accuratezza richiesta.

Il Fire Dynamic Simulator ha inoltre un ulteriore vincolo rappresentato dalla dimensione della griglia che influisce fortemente sulla visualizzazione della geometria, in quanto adatta le coordinate degli oggetti (obstructions) alle dimensioni di griglia stessa.

In caso di maglie (mesh) molto larghe si ottiene una non buona definizione degli oggetti. C'è poi da aggiungere che anche l'affidabilità della previsione degli eventi fluidodinamici è influenzata dalla grandezza della griglia.

2.4.7 Condizioni di esodo in emergenza

Il comportamento individuale che si può riscontrare in situazioni di emergenza, raramente si traduce in un comportamento collettivo somma dei singoli comportamenti individuali. In particolari situazioni (disastri, sommosse, cortei) la folla, legata ad un preciso ambito spazio temporale, diventa una sorta di "organismo autonomo" dotato di un comportamento peculiare rispetto agli individui che lo compongono.

Di frequente i singoli individui assumono nella folla atteggiamenti imprevedibili influenzati dal comportamento altrui.

Non è possibile, però, individuare una regola generale che sovrintenda al comportamento della folla sia perché sono diversi i motivi che hanno indotto l'affollamento degli individui sia per la diversità dei caratteri sociali, religiosi, politici.

Ai fini della definizione di un modello comportamentale rappresentativo della condotta dei singoli impegnati nell'autosalvamento è preliminarmente necessario rappresentare i fattori psicologici coinvolti nella gestione emotiva di situazioni di emergenza.

Nella popolazione generale (escludendo quindi la quota clinica, affetta cioè da disturbi che potrebbero compromettere una reazione funzionale ed adattiva alla sollecitazione di specifici *stressors*) si assiste ad una attivazione generalizzata dello stato neuropsicofisiologico, che si caratterizza nello stato di ansia e di paura.

E' bene ricordare che questi due termini, spesso usati nel linguaggio comune in modo interscambiabile, si riferiscono in realtà a due distinte componenti del processo di risposta ad una condizione di pericolo percepito.

L'ansia si riferisce all'ambito emotivo di reazione ad una minaccia, mentre la paura concerne il livello di elaborazione cognitiva della minaccia stessa.

I due livelli retroagiscono reciprocamente costituendo il quadro complessivo della gestione dell'emergenza.

Se in condizioni naturali la paura ha costituito e costituisce la difesa portante, filogeneticamente selezionata ed ereditata, ai fini della sopravvivenza intraspecifica, alcune varianti di questo meccanismo reattivo di tutela rappresentano d'altro canto variabili disadattive e disfunzionali. Questo è il caso, ad esempio, delle reazioni di panico.

Si potrebbe dire, in sostanza, che il panico rappresenta il versante insano della paura.

D'altra parte, bisogna considerare che questo processo di degenerazione della paura in panico non è strettamente correlato alla gravità dell'evento esterno, ma si ingenera da un lato in relazione alle pressioni del contesto fisico e interpersonale (reazione degli altri individui, condizioni di affollamento, rumore...) e dall'altro in rapporto alle capacità di coping e quindi alla messa a punto di strategie di risposta adeguate.

In situazioni di pericolo, sia esso presunto che reale, e in presenza di molte persone, il panico può manifestarsi tramite:

- la partecipazione delle persone all'ansia generale;
- la fuga in cui predomina l'autodifesa con atti di esclusione anche violenta degli altri individui.

Le reazioni emotive che si accompagnano al panico (timore, oppressione, manifestazioni isteriche e reazioni psicosomatiche) comportano una generale perdita di alcune capacità fondamentali per la sopravvivenza, quali l'attenzione, la capacità del corpo di rispondere ai comandi del cervello e la facoltà di ragionamento. Le cause scatenanti sono ravvisabili in:

- ansia diffusa conseguente al disastro;
- mancanza di un'informazione autorevole;
- veloce e progressiva chiusura delle vie di fuga;
- fattore di precipitazione.

Fra queste riveste particolare importanza la presenza di vie di fuga: nello scatenarsi del panico è determinante la convinzione di un possibile intrappolamento che si manifesta quando viene avvertita l'imminente chiusura di una via d'uscita. Il risultato è che tutti si accalcano istintivamente ed in modo disordinato alle uscite di sicurezza, impedendo ad altri individui, meno capaci fisicamente, di portarsi in salvo.

Anche il verificarsi di un fattore di precipitazione può essere motivo di comportamento collettivo di panico. Questo avviene dopo che si è creato uno stato di ansietà diffusa, quando, senza un motivo apparente, avviene un movimento precipitoso in assenza di informazioni autorevoli.

La percezione di una scarsa controllabilità di un evento, il grado di imprevedibilità e una bassa self-efficacy percepita, un locus of control esterno e altri aspetti concernenti gli stili attribuzionali del soggetto, concorrono ad aumentare la probabilità che si verifichino fenomeni ansiosi e attacchi di panico.

Considerando lo scenario di emergenza atteso, oggetto di studio, date le condizioni ambientali caratteristiche altamente sfavorevoli di un incendio in galleria (calore, fumo, agenti tossici e rumore), considerando il breve tempo di latenza per la valutazione cognitiva come presa d'atto del repentino mutamento della condizione ambientale e quindi per l'approntamento di strategie reattive,

è prevedibile un iniziale declino delle prestazioni di efficacia anche nella popolazione non affetta da disturbi d'ansia. Questa prima fase si caratterizza nella discesa dal treno e nell'allontanamento iniziale del gruppo compatto.

Al raggiungimento di una distanza minima stimabile in 50-100 metri dal treno esodato le condizioni ambientali tendono a normalizzarsi, la distanza fisica interpersonale aumenta (diminuendo quindi l'aggressività latente) e si realizza il primo essenziale rinforzo positivo sull'autoefficacia percepita.

A questo punto il singolo passeggero è in grado di esprimere le proprie capacità psicofisiche di autotutela.

Ai fattori individuali si affianca l'influenza dei fattori sociologici rilevati anche attraverso gli studi sulla psicologia delle masse. Il fenomeno più consistente è quello della diffusione della responsabilità, per effetto del quale si assiste ad una deresponsabilizzazione del singolo in virtù di una dispersione della sfera della responsabilità individuale con una propensione a un discontrollo degli impulsi.

Dalla panoramica presentata risulta critica soprattutto la prima fase dell'esodo, sia per le ovvie condizioni critiche prossimali, sia per gli aspetti psicologici evidenziati. Soprattutto in questa prima fase è prevedibile in alcuni soggetti un irrigidimento della motricità, contrastato tuttavia dalle condizioni di flusso degli esodanti, e soprattutto l'evidenziarsi di episodi di panico paralizzanti per il singolo e di ostacolo per i soggetti prossimi. In assenza di direzione e coordinamento tale tendenza può portare a fenomeni di schiacciamento e di violenza diretta fra i passeggeri.

Al fine di scongiurare tali evoluzioni e contenere reazioni dannose, risulta utile progettare e realizzare un piano di evacuazione che contribuisca a controllare comportamenti irrazionali creando uno stimolo alla fiducia di superare un eventuale condizione di pericolo e che induca un sufficiente autocontrollo.

La previsione impiantistica della ripetizione audio in galleria, la formazione e l'addestramento alla gestione dell'emergenza del personale di bordo in tal senso responsabile, la predisposizione di cartellonistica indicativa del comportamento elementare da tenere (direzione da seguire, distanza da percorrere...) minimizza il rischio che si determini uno scenario drammatico come quello descritto.

Sulla base delle valutazioni presentate, e introducendo opportune quote di soggetti clinici rappresentativi affetti da disturbi d'ansia e altre patologie psichiche inabilitanti, si è tarato il modello di simulazione dell'esodo introducendo effetti di disturbo e di ritardo dovuti al realizzarsi di episodi di trascinarsi e condizionamento negativo sui soggetti prossimali, la cui influenza è stata stimata in 5 secondi medi, con tendenza amplificativa al ridursi della distanza interpersonale.

2.4.8 EVAC: modellazione e simulazione dell'esodo

Una difficoltà intrinsecamente associata alle simulazioni di evacuazione è sempre stata quella del disaccoppiamento fra i dati relativi all'incendio e quelli relativi all'esodo degli occupanti l'edificio, anche se alcuni software hanno previsto sin da subito una certa interazione.

I ricercatori Timo Korhonen e Simo Hostikka del **VTT** (Technical Research Centre of Finland) per lo sviluppo del loro software di simulazione di evacuazione hanno utilizzato le potenzialità di FDS nel calcolo dei flussi, realizzando **FDS+EVAC**, un software che permette il calcolo degli effetti dell'incendio anche in termini di evacuazione delle persone da un edificio.

Il risultato è stato molto apprezzato dagli utenti di tutto il mondo, tant'è che il modulo relativo al calcolo dell'evacuazione è entrato a far parte a pieno titolo del pacchetto FDS.

Oggi dunque, si può impiegare il codice EVAC versione 2.0, distribuito nella forma Open Source pre-accorpato al codice FDS.

FDS+EVAC permette la simulazione simultanea dei processi dell'evacuazione e del fuoco. Può anche essere usato per simulare soltanto il processo dell'evacuazione di esseri umani senza considerare gli effetti del fuoco; per esempio, per programmare un'esercitazione antincendio di esodo e verificarne praticamente i risultati.

Allo stato attuale dello sviluppo il software è idoneo per eseguire calcoli nelle costruzioni con pavimenti orizzontali. Si suppone che i differenti livelli delle costruzioni siano separati l'uno dall'altro, e che siano connessi fra di loro tramite scale, scale mobili, da porte su oggetti solidi che mettono in comunicazione più piani.

FDS+EVAC non supporta gli ascensori durante il processo di evacuazione. Le scale o i piani inclinati possono anche essere utilizzati per connettere i pavimenti a quote differenti.

FDS+EVAC computa la posizione, la velocità e la dose dei gas tossici assorbiti di ogni agente all'interno del dominio computazionale in ogni punto della discretizzazione dell'ambiente di simulazione nel tempo.

Il movimento degli agenti può essere visualizzato dopo la simulazione usando il programma Smokeview, appositamente dotato dei comandi da utilizzare per la visualizzazione dei parametri relativi all'evacuazione.

I risultati di calcolo relativi agli agenti è salvato in file di testo di tipo XXXXX.csv, utilizzabili con programmi di foglio elettronico.

Anche se FDS+EVAC può risolvere molti scenari di incendio e di evacuazione, ci sono delle limitazioni imposte dalle metodologie di calcolo adottate.

Alcuni dei maggiori limiti del modello sono:

- **Geometria:** il risparmio, in termini di tempo di calcolo, ottenuto da FDS è dovuto alla semplicità della mesh rappresentativa del dominio di calcolo di forma rettilinea. Ciò può essere una limitazione in alcune situazioni dove determinate caratteristiche geometriche non si conformano alla maglia rettangolare. Le maglie numeriche usate dalla procedura umana del movimento di FDS+EVAC sono bidimensionali ma hanno le stesse caratteristiche delle maglie di calcolo relative all'incendio, pertanto alla sezione relativa all'evacuazione si applicano le medesime limitazioni dovute alla maglia della sezione relativa all'incendio.

Non è necessario che le singole mesh siano di dimensioni piccole come quelle dedicate all'incendio. La dimensione ottimale della cella della maglia è di circa 0,25 m ma possono essere utilizzate anche mesh più grandi senza creare alcun problema.

Il formato delle celle di griglia determina la possibilità di modellare correttamente la geometria dell'ambiente di simulazione, per esempio: le larghezze delle porte devono essere multiple delle dimensioni delle celle della griglia di calcolo.

- **Capacità della maglia:** il numero degli agenti (rappresentativi delle persone) disposti su una stessa maglia di evacuazione è limitato a 10.000, in caso di superamento di detto limite il programma si arresta e genera un messaggio di errore.

Solitamente una maglia principale dell'evacuazione è utilizzata per rappresentare un intero piano di una costruzione; possono coesistere diverse maglie principali di evacuazione.

La densità di affollamento iniziale degli agenti relativamente a un pavimento non può essere maggiore di 4 persone per metro quadro.

- **Riduzione della visibilità:** la concentrazione del fumo calcolata da FDS è usata per rallentare il movimento umano usando i risultati della sperimentazione di Frantzich, Nilsson e Jin. Il modello standard per le scale non comprende l'opzione che prevede che gli esseri umani tornino indietro quando la concentrazione del fumo diventa troppo alta.
- **Incapacità:** le persone vengono rese incapaci in funzione del FED calcolato secondo la teoria di Purser; la differenza di comportamento fra gli esseri umani, in funzione del FED calcolato non è considerata nella versione attuale del programma. Occorre inoltre considerare che FDS effettua molto bene i calcoli relativi al trasporto del fumo e alla previsione del livello di O₂, mentre risulta molto meno preciso sulla previsione della concentrazione di CO. Nel modello della frazione della miscela utilizzato di default da FDS, la quantità di CO prodotto è decisa dall'input dell'utente. Inoltre l'effetto dell'HCN non è modellato.
- **Selezione dell'itinerario di uscita:** la procedura di selezione delle porte di uscita è ancora relativamente semplice. Infatti, non comprende alcun genere di procedura che tiene conto delle interazioni sociali, come, per esempio, il comportamento del gruppo. L'utente ha il controllo totale sulle porte che i differenti gruppi umani utilizzeranno. Nelle applicazioni pratiche, questa possibilità offerta dal programma, può essere considerata positivamente; la considerazione diventa negativa se l'utente non ha particolare perizia nella determinazione delle condizioni relative alle proprietà da assegnare alle persone e delle condizioni al contorno.
- **Rilevazione e tempi di reazione:** il periodo di tempo di premovimento degli esseri umani durante le fasi di evacuazione è deciso dall'utente mediante l'imposizione dei tempi di rilevazione e di reazione.

La concentrazione locale del fumo può essere utilizzata per innescare il movimento simulando la rilevazione dell'incendio. Il sistema di rivelazione dell'incendio di FDS, mediante l'utilizzo di device, come rivelatori di fumo o di calore, non può essere utilizzata dalla logica di controllo per innescare il movimento degli agenti.

- **Ascensori:** non è previsto nel modello attuale l'utilizzo di ascensori e montacarichi. Inoltre esiste una limitazione del numero degli esseri umani per ogni singola maglia di evacuazione. La versione attuale di FDS+EVAC supporta il calcolo parallelo soltanto nelle simulazioni relative all'incendio, le maglie dell'evacuazione sono trattate sempre come un calcolo su un singolo PC e con un singolo processore.

2.4.9 Il modello umano del movimento in EVAC

Per simulare realisticamente il fenomeno, il modello di simulazione EVAC considera le vere forze fisiche che si generano tra la folla in condizioni di congestione.

Tali forze includono le forze di contatto tra i corpi, le forze d'attrito tra i vari soggetti e tra questi e i muri laterali o gli ostacoli.

La modellazione di queste forze richiede che il dominio matematico dell'evacuazione sia continuo nello spazio.

Dunque, in FDS+EVAC, ogni persona partecipante all'esodo è definita come un "agent", ossia come un essere autonomo caratterizzato da proprietà personali e proprie strategie di fuga, ed è seguita da una propria equazione di moto.

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \xi_i(t)$$

Dove:

- $x_i(t)$ è la posizione dell'agente i al tempo t ;
- $f_i(t)$ è la forza esercitata sull'agente dalle condizioni al contorno e dunque dall'ambiente;
- m_i è la massa
- $\xi_i(t)$ è una piccola forza di fluttuazione random.

Gli esseri umani modellati come agenti che si muovono in un dominio 2D rappresentato dai pavimenti degli edifici.

Il formato di ogni agente è rappresentato tramite tre cerchi disposti in modo da formare un'ellisse che rappresenta in modo approssimato la figura del corpo umano, come mostrato dall'immagine che segue.

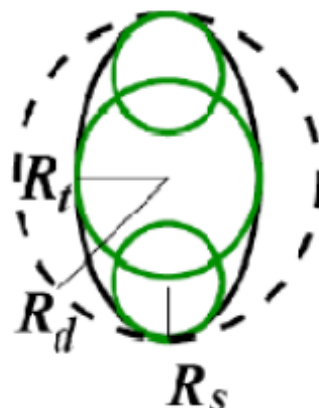


Figura 64: Rappresentazione del formato di ogni agente.

Le dimensioni del corpo e le velocità di movimento senza impedimento degli agenti che rappresentano gli esseri umani sono indicate nella seguente tabella.

Tipo di agente	Rd [m]	Rt/Rd [-]	Rs/Rd [-]	ds/Rd [-]	Velocità [m/s]
Adulti	0,255 ± 0,035	0,5882	0,3725	0,6275	1,25 ± 0,30
Uomini	0,270 ± 0,020	0,5926	0,3704	0,6296	1,35 ± 0,20
Donne	0,240 ± 0,020	0,5833	0,3750	0,6250	1,15 ± 0,20
Bambini	0,210 ± 0,015	0,5714	0,3333	0,6667	0,90 ± 0,30
Anziani	0,250 ± 0,020	0,6000	0,3600	0,6400	0,80 ± 0,30

Tabella 10: Dimensioni del corpo e velocità di movimento.

Per simulare realisticamente il fenomeno, il modello di simulazione EVAC considera le vere forze fisiche che si generano tra la folle in queste situazioni.

In particolare, queste forze sono:

- forze di contatto tra i corpi;
- forze d'attrito tra i vari agenti;
- forze che si esercitano tra gli agenti ed i muri;
- forze sociali;
- forze psicologiche, esercitate dall'ambiente e dagli altri agenti.

La modellazione di queste forze richiede che il dominio matematico relativo all'evacuazione sia continuo nello spazio.

Il modello a base dell'algoritmo di movimento implementato da EVAC è il *modello di forza sociale* presentato da Helbing e Molnar, con i cambiamenti introdotti da Langston per includere una migliore descrizione della forma del corpo umano e considerare i gradi di libertà della rotazione del singolo agente.

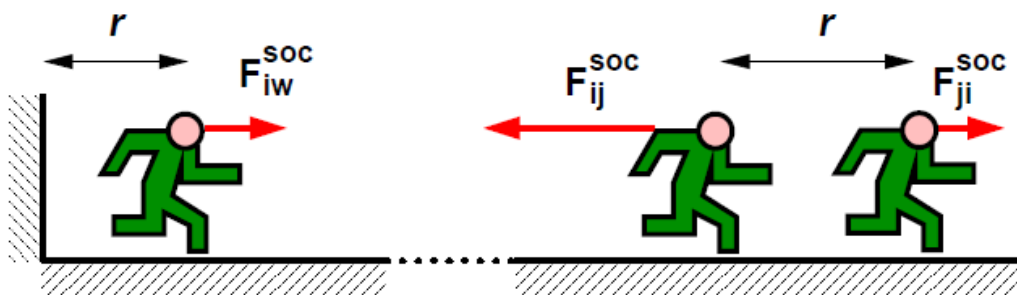


Figura 65: Il concetto di forza sociale secondo Helbing.

Focalizzando maggiormente l'attenzione sui comportamenti e sulle reazioni umane nelle situazioni di emergenza, le statistiche sulle analisi di eventi disastrosi dovuti a incendi, spesso rilevano che il numero delle vittime è notevole, soprattutto perché la maggioranza delle persone coinvolte non ha attuato una strategia di sopravvivenza adeguata, oppure non lo ha fatto in un tempo ottimale. Infatti, in una fase di immediata emergenza, il tempo disponibile per produrre una risposta di qualsiasi tipo è spesso limitato, e sono pochi coloro in grado di attuare un comportamento protettivo ed efficace. Se da una parte è noto che alcune variabili strutturali (e non modificabili) quali genere, età ed abilità fisiche, sono maggiormente associate alla possibilità di sopravvivenza (il numero di sopravvissuti è inferiore fra le donne, gli anziani, i bambini, i disabili), resta tuttavia decisivo in tale situazioni il fattore psicologico (potenzialmente modificabile), intendendo, ad esempio, con questo, le modalità di pensiero, le reazioni emotive, le abilità comportamentali. Un aspetto fondamentale per aumentare la quota di sopravvissuti in condizioni di emergenza è quello di fornire informazioni, sia prima, che durante la situazione di crisi (prove di evacuazione, planimetria con le vie d'esodo segnalate).

Da alcuni studi sono emersi una pluralità di fattori che regolano l'efficacia di una evacuazione. Se ne possono distinguere quattro:

- fattori configurazionali: sono quelli riguardanti la struttura architettonica dell'edificio (o del mezzo – aereo, nave, ecc.), quali il numero delle uscite di emergenza, la loro ripartizione, il percorso per giungerci, ecc...;
- fattori ambientali: includono i probabili effetti debilitanti sulle persone da parte di calore, gas tossici, fiamme e l'influenza di questi fattori sulla velocità di sgombero e di individuazione delle uscite (ad es. la ridotta visibilità);
- fattori procedurali: rappresentano le conoscenze apprese dalle persone attraverso la segnaletica d'emergenza e le informazioni fornite dal personale preposto. In questo caso, la chiarezza del messaggio e la presenza di una leadership che impartisca direttive è fondamentale per la sopravvivenza degli attori;
- fattori comportamentali: corrispondono alle diverse condotte tenute dalle persone in emergenza (le loro risposte iniziali, le loro decisioni, le interazioni sociali, le relazioni fra i membri del gruppo).

I quattro fattori interagiscono tra loro regolando l'efficacia di un'evacuazione.

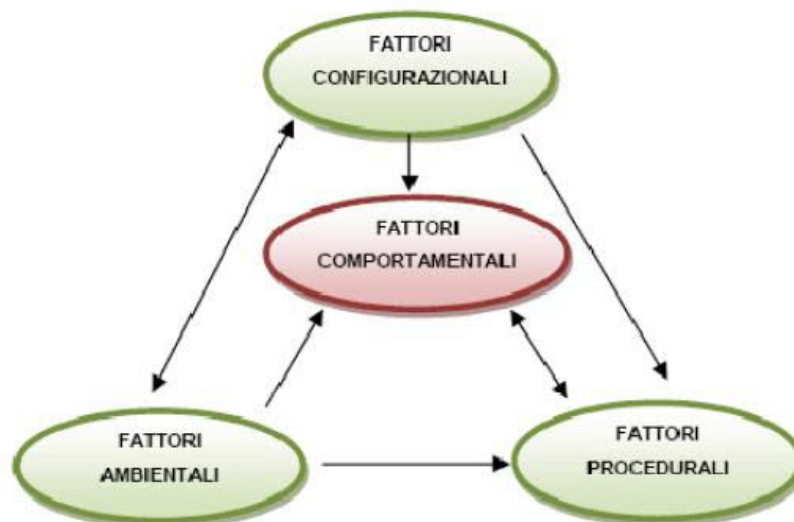


Figura 66: Interazioni tra fattori.

I fattori configurazionali e ambientali sono tra loro interconnessi ed entrambi influenzano sia le procedure che i comportamenti umani. Anche i fattori procedurali e quelli comportamentali sono tra loro in interazione: una procedura può guidare l'esecuzione di una sequenza di azioni, ma anche alcuni comportamenti di un individuo potrebbero dare indicazioni sulle procedure da selezionare ed eventualmente da modificare.

La collocazione centrale dei fattori comportamentali rispecchia la loro importanza e rilevanza: infatti, anche in condizioni ottimali, quali un congruo numero di uscite di emergenza, ben evidenziate, senza problemi di visibilità, un comportamento erraneo di un individuo o di un piccolo gruppo può rendere vano anche le migliori progettazioni architettoniche. I fattori comportamentali sono spesso trascurati ma decisivi. Spesso si pensa che in condizioni di emergenza il comportamento umano predominante sia quello individualistico. Testimonianze di superstiti, "case study" e ricerche su campo in simulazioni hanno evidenziato la forte eterogeneità delle risposte individuali.

Secondo Leach (2004) nelle situazioni di pericolo, la risposta degli individui può essere classificata in tre grandi gruppi:

- Il primo gruppo, che comprende il 10-15% di persone coinvolte in disastri, rimane relativamente calmo. Queste persone sono capaci di organizzare i pensieri rapidamente, mantenere intatta la consapevolezza delle situazioni e le capacità di giudizio e ragionamento, sono capaci di valutare la situazione, fare un piano di azione e metterlo in pratica;
- il secondo gruppo, composto da circa il 75% di persone, comprende coloro che rispondono in maniera sconcertata e confusa, mostrando un ragionamento compromesso e un rallentamento del pensiero. Il loro comportamento è guidato da processi quasi automatici;
- il terzo e ultimo gruppo (10-15%) tende a mostrare un alto grado di comportamenti controproducenti che aumentano il rischio di morte, come quello del pianto incontrollato, di confusione globale, urla e ansia paralizzante.

È in queste due ultime categorie di comportamenti che si riscontrano il maggior numero di vittime.

Le reazioni e i comportamenti nelle situazioni di pericolo possono essere le più disparate, se ne riporta a seguire un campione rappresentativo, che comprende stati emotivi, cognitivi e fisiologici:

- comportamenti ansiosi: le persone sono in preda all'ansia, urlano, piangono e diventano incapaci anche di azioni semplici come aprire una porta;
- comportamenti di fuga disorganizzata: le persone tendono a correre, fuggendo in qualsiasi direzione, anche se non è quella giusta;
- comportamenti di coesione sociale: le persone si riuniscono fra loro e si "sentono un gruppo" (es. "sulla stessa barca");
- attaccamento ai beni familiari: le persone prima di evacuare cercano di recuperare gli oggetti personali che hanno un valore economico ed affettivo;
- comportamenti altruistici: le persone tendono ad aiutare altre persone in difficoltà, esponendosi loro stessi ad un pericolo vitale;
- comportamenti di "congelamento": alcune persone rimangono cognitivamente paralizzate e incapaci a muoversi;
- comportamenti di panico: si tratta di comportamenti distruttivi, irrazionali e asociali quali il lottare con altre persone;
- disorientamento situazionale: le persone percepiscono uno stato di incredulità e di astrazione della situazione;
- disorientamento fisiologico: nella situazione di scarsa visibilità (es., causata dal fumo scaturito dall'incendio) le persone faticano a trovare le vie d'uscita e si intossicano con i gas ispirati.

I modelli teorici classici hanno messo in evidenza che, di fronte alla minaccia di vita, gli esseri umani (e gli animali) affrontano la situazione attraverso due tipi di azioni: il fronteggiamento o l'evitamento, un binomio definito *combatti o fuggi* (*fight or flight*).

Tra i professionisti che operano in scenari a rischio (ad esempio militari, vigili del fuoco), le esercitazioni e le simulazioni sono importanti in quanto consentono di produrre schemi comportamentali automatici per prevenire la paralisi cognitiva.

Altre teorizzazioni in ambito psicologico hanno tentato di spiegare i comportamenti *ipoattivi*, ritardi e rallentamenti delle persone e dei gruppi durante una situazione di pericolo. Da una parte le persone tenderebbero a considerare i segnali di pericolo dati da un'iniziale situazione di emergenza come una normale variabile della routine quotidiana. È il cosiddetto *normalcy bias* (distorsione di normalità): gli indicatori o avvertimenti iniziali di un pericolo sono trascurati o assimilati ad esperienze normali; in questa fase iniziale, le persone interpretano erroneamente i segni di pericolo e rispondono continuando le attività routinarie.

Dall'altra, ambiguità e pluralità di messaggi spesso ritardano sul comportamento di evacuazione. Risultati sperimentali hanno dimostrato che informazioni ambigue o eccessive circa un rischio o pericolo favoriscono

la suggestionabilità nella folla, in tal modo si accorcia il tempo per realizzare nuove opinioni, ma si dilata quello per prendere decisioni. In un gruppo di persone ci sono maggiori variazioni e una maggioranza di opinioni e quindi di strategie possibilmente attuabili. I gruppi variano nella quantità di risorse attivabili da essi: maggiori sono le risorse attuabili dal gruppo, maggiore sarà il tempo necessario per decidere quali utilizzare.

Fino a poco tempo fa una folla in fuga veniva considerata come un liquido in uscita da un contenitore, che sfruttava ugualmente tutte le aperture per evadere. Quindi maggiore è il numero delle uscite più velocemente il “contenitore” veniva vuotato.

Ma questo modello “idraulico” non funziona, bisogna includere conoscenze che derivano dallo studio dei comportamenti umani in psicologia e nelle scienze sociali.

La folla è fatta di persone che non si comportano nello stesso modo. La folla non è un fluido ma è fatta di persone che pensano, interagiscono, prendono decisioni, hanno preferenze di movimento, cadono e ostacolano altri. Le persone possono avere comportamenti gregari o individualistici nella ricerca di un’uscita.

Gli studi sui comportamenti collettivi nelle situazioni di evacuazione hanno messo in evidenza che le persone si muovono o tentano di muoversi più velocemente del normale, iniziano a spingersi e l’interazione diventa solo fisica, in tal modo il passaggio per il collo di bottiglia diventa scoordinato e alle uscite si formano strutture ad arco. Per tale ragione si può verificare un effetto chiamato *faster is slower*: più le persone si dirigono velocemente verso l’uscita, più vanno lente perché tendono ad accalcarsi ed a spingersi, a volte perfino a calpestarsi. In aggiunta, la fuga può essere maggiormente rallentata dalle persone che cadono o che si feriscono (che diventano a tutti gli effetti nuovi ostacoli). In alcuni casi, l’interazione fisica può causare una pressione pericolosa capace di sfondare barriere o muri. Come si può vedere nella figura successiva, nell’evacuazione da una stanza con due uscite e una minaccia alle spalle (fuoco) vi può essere una tendenza a comportamenti gregari e a fare ciò che fanno gli altri: in tal modo le uscite alternative possono essere trascurate o non usate in modo efficiente.

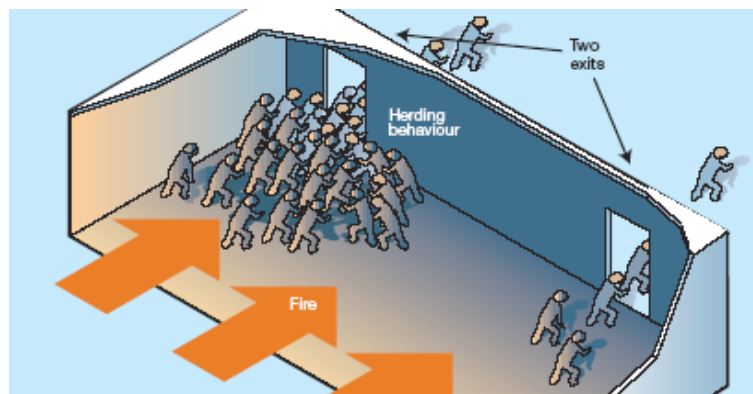


Figura 67: Esempio di comportamenti gregari in caso di incendio.

In conclusione, le persone non sono isolate ma intraprendono azioni auto protettive o altruistiche inserite in un contesto socio-ambientale che incoraggia o scoraggia una determinata sequenza comportamentale. L’espressione inglese *milling* (girovagare come un mulino) indica l’interazione sociale nelle prime fasi di allarme. Gli individui verificano e cercano una conferma con le altre persone (amici, colleghi, familiari) della gravità del messaggio o dell’avvertimento che hanno ricevuto; solo quando la rete sociale conferma la validità dell’avviso, iniziano a eseguire azioni protettive.

Secondo gli studi del NIST (National Institute of Standards and Technology) che ha ricostruito il comportamento di evacuazione dalle Twin Towers l’11 settembre 2001, è stato stimato che il 70% delle persone nel WTC che sopravvissero a quel disastro, prima di fuggire, parlarono fra loro sul da farsi e sul cosa

stesse succedendo. In questa prospettiva, occorre tenere presente vari fattori in un gruppo di persone coinvolte in un incidente: il tipo di caratteristiche dei membri (quali l'età, agilità, genere, presenza di disabili o feriti), la densità del gruppo (caratteristiche delle persone come la loro corporatura, che quelle architettoniche della stanza in cui ci si trova), le relazioni tra i membri del gruppo (la concezione di status, di ruolo, di leadership e altri puramente culturali come il linguaggio, le tradizioni, le norme) e il contesto il cui avviene l'emergenza.

Le persone e i gruppi non sono in preda a pura istintualità o al contrario governate da perfetta razionalità, che non sono sole e non sono neanche una massa uniforme. Non bisogna quindi dimenticare che gli individui coinvolti in situazioni di emergenza di qualsiasi tipo, possono essere protagonisti efficaci, possono diventare cooperativi e mostrare capacità di leadership spontanea e si possono attivare sentimenti di solidarietà sociale ed azioni di mutua assistenza come esito di un processo intenzionale di altruismo ad altre persone.

2.4.10 Interazione tra uomo (EVAC) e fuoco (FDS)

Il simulatore FDS+EVAC permette delle simulazioni contemporanee dell'evacuazione e dell'incendio.

Usando FDS come piattaforma di calcolo, EVAC ha facile accesso a tutte le proprietà dell'incendio (temperatura dei gas; densità dei fumi e dei gas; livelli di radiazione termica) ad ogni punto nella griglia di calcolo e queste possono essere usate per modellare il comportamento degli esseri umani nella fase di evacuazione.

Infatti, il fuoco può influenzare le condizioni di esodo rendendo inabili gli occupanti e in alcuni casi bloccare i percorsi d'uscita principali; contemporaneamente gli evacuanti possono influenzare il fuoco, aprendo porte e finestre e attuando vari dispositivi di protezione.

La versione di EVAC attualmente distribuita permette di considerare, esclusivamente l'effetto del fumo sul movimento e l'influenza dei principali gas tossici sull'organismo umano, attraverso il calcolo della FED (*Fractional Effective Dose*) o dose frazionaria debilitante: per ogni valore del tempo di esposizione, restituisce il rapporto tra il valore della dose accumulata e il relativo valore critico di soglia, che conduce all'inabilità.

Il software consente poi di implementare agevolmente differenti comportamenti per diverse categorie di occupanti.

Questo è possibile intervenendo sulla velocità indisturbata di esodo e sulla direzione.

In definitiva, nel modello di calcolo EVAC, ogni evacuante osserva la posizione degli altri individui e seleziona il proprio percorso d'uscita, valutando quello apparentemente più veloce; la selezione dell'uscita è modellata come un problema di ottimizzazione, per il quale ogni evacuante tenta di selezionare l'uscita che minimizza il tempo di evacuazione.

Tossicità dei prodotti della combustione

Gli effetti tossici dei prodotti della combustione gassosi sono trattati usando il concetto di Purser di FED (*Fractional Effective Dose*).

La FED è utilizzata per determinare il tempo in cui gli esseri umani sono incapaci di effettuare le operazioni di evacuazione in modo autonomo.

Il calcolo delle dosi frazionali è inoltre finalizzato a confrontare, per ogni parametro di rischio, il valore ottenuto, rappresentativo della dose frazionale inabilitante complessivamente assunta dal generico passeggero durante l'esodo, con il valore di soglia fornito dalla norma ISO 13571 *Life threat of fires - Guidance on the estimation of time available for escape using fire data* (a seguito della normalizzazione rispetto al valore di soglia i valori ottenuti sono compresi tra 0 ed 1).

Il valore 1 corrisponde al raggiungimento della condizione di impossibilità di autosoccorso (soglia di letalità), mentre il valore 0,3 indica il valore di soglia di lesività, giunto al quale l'individuo subisce una riduzione delle capacità motorie.

La versione attuale di FDS+EVAC usa soltanto le concentrazioni dei gas narcotici O₂, CO₂ e CO per calcolare il valore della FED tramite la seguente formula:

$$FED_{tot} = FED_{CO} \times HV_{CO_2} + FED_{O_2}$$

L'equazione non contiene l'effetto della CO₂ bensì questa provochi iperventilazione, poiché si suppone che l'anidride carbonica abbia un livello talmente basso da non generare effetti narcotici.

L'anidride carbonica non ha effetti tossici a concentrazioni fino al 5% ma stimola la respirazione che aumenta il tasso con cui gli altri prodotti della combustione sono assorbiti.

La componente relativa al monossido di carbonio (CO), tale da rendere incapace una persona, è calcolata con la seguente formula:

$$FED_{CO} = 4,607 \times 10^{-7} (C_{CO})^{1,036} t$$

Dove:

- t è tempo in secondi
- CCO è la concentrazione di monossido di carbonio (in parti per milione).

La frazione di dose relativa all'ossigeno (O₂) necessaria a rendere incapace una persona esposta per ipossia è calcolata con la seguente formula:

$$FED_{O_2} = t/60 \exp [8,13 - 0,54(20,9 - C_{O_2})]$$

dove:

- t è tempo in secondi
- CO₂ è la concentrazione di ossigeno (in ppm.)

La componente relativa all'anidride carbonica, in grado di generare l'iperventilazione, è calcolata con la formula seguente:

$$HV_{CO_2} = \exp(0,1930 C_{CO_2} + 2,0004)/7,1$$

dove CCO₂ è la concentrazione in percentuale dell'anidride carbonica.

Un agente è considerato reso incapace o inabilitato, quando il valore della FED supera l'unità.

Un agente inabile è modellato come un agente, che non avverte alcuna forza sociale dagli altri agenti e dalle pareti e la cui velocità di movimento è impostata a zero.

La forma di un agente inabilitato non viene però modificata; ossia questo resta comunque in piedi e questo rappresenta un limite del modello che dovrebbe essere modificato nelle versioni successive.

Va sottolineato che l'algoritmo relativo all'evacuazione di FDS+EVAC è di tipo stocastico, usa cioè numeri casuali per generare le posizioni iniziali e le proprietà degli esseri umani e aggiunge inoltre una piccola forza casuale all'equazione di movimento di ogni essere umano. Di conseguenza non si ottengono gli stessi risultati per una stessa simulazione se la si calcola più volte; per questo motivo, occorrerebbe calcolare almeno una dozzina di simulazioni di evacuazione per avere una variazione significativa dei risultati. Per accelerare i tempi di calcolo è consigliabile effettuare molti calcoli di evacuazione per una sola simulazione di incendio.

Nell'attuale versione di FDS+EVAC l'effetto e l'influenza tossica del fumo sono utilizzati nella procedura che determina le velocità di movimento degli agenti.

La procedura di selezione delle uscite degli agenti usa la densità di fumo per calcolare la visibilità delle porte di uscita e per categorizzare le stesse nei gruppi di preferenza, utilizzati per la determinazione dei criteri di scelta.

Un'altra importante caratteristica del modello è la possibilità di implementare con facilità differenti comportamenti per diverse categorie di agenti.

Il codice permette di intervenire sulla velocità di esodo libero e sulla direzionalità dello stesso, in modo da simulare diverse situazioni.

Ad esempio, nel comportamento di un anziano (*elderly*), la direzione del moto può essere impostata puntando agli altri evacuanti piuttosto che puntando direttamente alle uscite.

Nel modello di calcolo EVAC, ogni agente osserva la posizione degli altri individui e seleziona il proprio percorso d'uscita valutando quello apparentemente più veloce. La selezione dell'uscita è modellata come un problema di ottimizzazione, per il quale ogni agente tenta di selezionare l'uscita che minimizza il proprio tempo di evacuazione.

2.4.11 Tempi di evacuazione

Nel valutare le conseguenze di un incendio per la vita umana, occorre verificare che il tempo a disposizione per la fuga sia maggiore rispetto al tempo richiesto per la fuga stessa.

L'approccio ingegneristico-prestazionale valuta le condizioni di sicurezza dell'esodo basandosi sulla stima di due tempi fondamentali:

- Δt ASET (ASET: Available Safe Egress Time – Tempo sicuro di uscita): intervallo di tempo che intercorre fra l'istante di innesco dell'incendio e il momento in cui le condizioni ambientali sono tali da non permettere alle persone occupanti l'edificio di porsi in salvo; è dunque il tempo disponibile per raggiungere un luogo sicuro.
- Δt RSET (RSET: Required Safe Egress Time – Tempo di raggiungimento di un luogo sicuro): intervallo di tempo che intercorre fra l'istante di innesco dell'incendio e il momento in cui le persone occupanti l'edificio raggiungono un luogo sicuro; è dunque il tempo impiegato per mettersi in salvo.

In un progetto antincendio realizzato seguendo i criteri del metodo prestazionale, la sicurezza delle persone viene raggiunta quando:

$$\Delta t_{ASET} \geq \Delta t_{RSET}$$

La differenza fra Δt_{ASET} e Δt_{RSET} viene definita come coefficiente di sicurezza (Margin of Safety).

Di seguito viene riportato uno schema dove vengono messi in relazione i tempi di cui sopra:

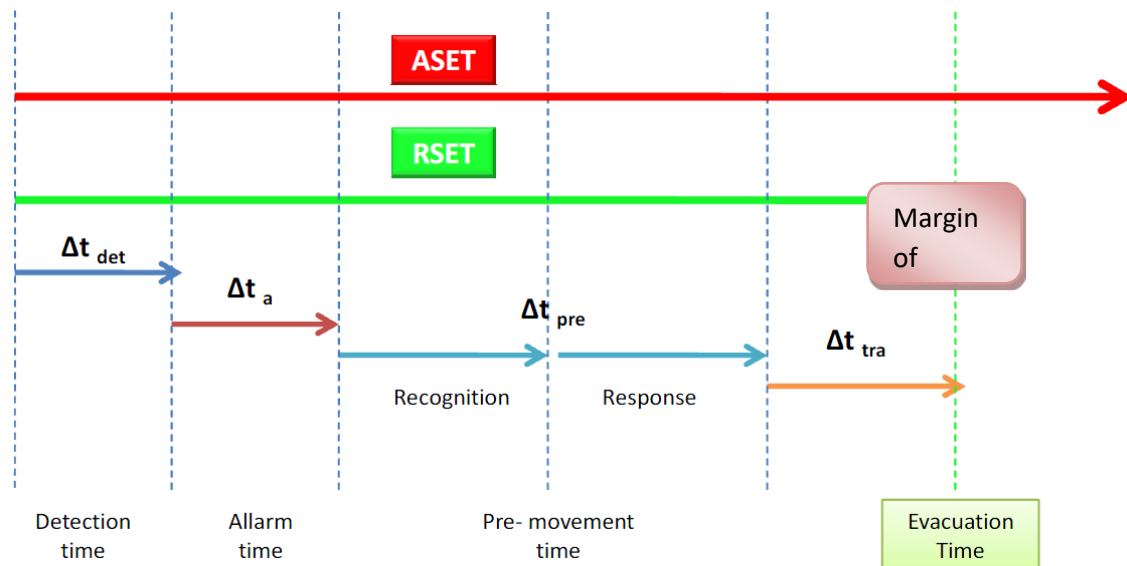


Figura 68: Tempi di evacuazione secondo la norma ISO 13571

Valutazione del tempo Δt_{ASET}

Il tempo Δt_{ASET} è misurato dall'istante di innesco dell'incendio fino al momento in cui le condizioni ambientali sono tali da non permettere alle persone occupanti l'edificio di mettersi in salvo.

Per una stima del tempo Δt_{ASET} è necessaria la conoscenza in funzione del tempo di alcuni parametri legati all'incendio.

La stima può essere condotta seguendo il metodo proposto dalla norma ISO 13571:2012 che si basa sulla stima dei tempi calcolati per raggiungere le condizioni ambientali limite, che tengano conto dei seguenti parametri legati all'incendio:

- esposizione ai gas tossici;
- esposizione ai gas irritanti;
- esposizione al calore;
- grado di visibilità.

La normativa stabilisce a priori, per ognuno di questi parametri, delle soglie di accettabilità e attraverso il calcolo vengono stimati i tempi necessari per raggiungerne i valori limite; il Δt_{ASET} per uno specifico scenario di incendio corrisponde al minore di questi tempi.

Questa metodologia richiede l'uso di potenti ed attendibili software di simulazione ed è sicuramente la più onerosa in termini di tempo da dedicare alla modellazione ed all'elaborazione dei risultati.

Valutazione del tempo Δt_{RSET}

Il tempo Δt_{RSET} è calcolato dall'istante di innesco dell'incendio all'istante di fine evacuazione che si verifica quando tutte le persone raggiungono un luogo sicuro.

Il tempo richiesto per fuggire in sicurezza dipende da più intervalli di tempo, fortemente influenzati dal comportamento e dalle caratteristiche fisiche e sensoriali degli occupanti, oltre che dalle caratteristiche delle vie di esodo.

Il tempo Δt_{RSET} è dato, infatti, dalla somma di più tempi come si può visualizzare dalla formula seguente:

$$\Delta t_{RSET} = \Delta t_{DET} + \Delta t_A + \Delta t_{PRE} + \Delta t_{TRAV}$$

Dove:

- Δt DET: tempo di rivelazione (detection time), esso dipende dal sistema di rivelazione antincendio presente nell'edificio; nel caso di sistemi automatici si può stimare effettuando una prima simulazione del fuoco per calcolare il tempo di attivazione dei rivelatori mentre in assenza di dispositivi automatici dipenderà dal tempo che un occupante della struttura impiega per accorgersi del principio di incendio.
- Δt A: tempo di allarme (alarm time), è l'intervallo di tempo che intercorre fra l'istante di rivelazione dell'incendio e quello in cui sia stato generato un avvertimento che attiva l'evacuazione.
- Δt PRE: tempo di premovimento (pre-movement time), esso è dato dalla somma del tempo di ricognizione (recognition time) e del tempo di risposta (response time). Il tempo di ricognizione e il tempo di risposta tengono conto del tempo necessario agli occupanti di interpretare le informazioni ricevute, per intraprendere le azioni necessarie per mettersi in salvo e compiere altre azioni prima di iniziare l'evacuazione, come ad esempio la raccolta degli oggetti personali o di valore. Il tempo di premovimento può essere determinato in base a valori forniti in letteratura tecnica.
- Δt TRAV: tempo di percorrenza (travel time), è il tempo impiegato dagli agenti per evacuare l'edificio, calcolato dall'istante in cui finisce il tempo di premovimento. Il tempo di percorrenza tiene conto dell'evacuazione di tutti gli agenti in pericolo e sommato al tempo di premovimento determina tempo di evacuazione (Δt EVAC).

Il tempo di evacuazione è dato dalla somma del tempo di percezione del pericolo, del tempo di percorrenza e del tempo perduto per effettuare le code.

Il tempo di percorrenza è valutato dividendo la distanza da percorrere per la velocità di percorrenza, mentre il tempo valutato per la coda è una funzione della posizione e delle azioni degli altri evacuanti.

Nella realtà di un'evacuazione, si presume che un individuo cambi il percorso inizialmente scelto soltanto in presenza di un'alternativa che appare chiaramente migliore.

Questo comportamento è simulato dall'algorithm attraverso un parametro che viene sottratto al tempo stimato per l'imbocco dell'uscita scelta.

A parte quanto già citato, esistono altri fattori che influenzano il processo di decisione degli evacuanti. Questi sono fattori legati al fuoco, alla familiarità delle uscite considerate ed alla visibilità delle singole uscite.

Le uscite sono divise in sette differenti gruppi in modo che ognuna di esse appartenga ad un determinato gruppo.

I gruppi sono dati da un ordine di preferenza.

La familiarità di ogni uscita per ogni tipo di agente rappresentativo delle persone da evacuare può essere determinata nel file di input.

È anche possibile dare una probabilità per la familiarità di un'uscita.

La visibilità di un'uscita per ogni agente è determinata dal prendere in considerazione l'effetto di oscuramento del fumo e gli ostacoli. Il possibile effetto intasamento di altri agenti non è considerato nell'attuale versione del programma. Sono definite delle condizioni di disturbo dell'evacuante come la temperatura e il fumo non letali. Se si presentano condizioni letali su un percorso d'uscita, l'uscita non ha preferenza.

L'algorithm di selezione delle uscite ha quindi due fasi distinte:

- classificazione delle uscite in gruppi con assegnata una preferenza mostrato dalla tabella seguente;

- scelta dell'uscita che minimizza il tempo di evacuazione fra tutte le uscite predeterminate.

Scale di preferenza	Visibile	Familiare	Presenza di condizioni di disturbo
1	Si	Si	No
2	No	Si	No
3	Si	No	No
4	Si	Si	Si
5	No	Si	Si
6	Si	No	Si
No preferenza	No	No	No
No preferenza	No	No	Si

Tabella 11: Ordine di preferenza dell'algoritmo di selezione delle uscite di EVAC

Le ultime due righe della tabella non hanno preferenza perché un evacuante non può essere a conoscenza di un'uscita non familiare ed invisibile e quindi, non è possibile selezionare queste uscite.

Altro aspetto molto importante da considerare quando si costruisce un modello di evacuazione è la tendenza della folla a costituire dei gruppi che tendono ad agire insieme durante le fasi di esodo.

Secondo la letteratura socio-psicologica, una folla è, infatti, composta da piccoli gruppi, come famiglie, amici, colleghi che tendono ad operare insieme e questo comportamento deve essere tenuto in considerazione.

Un metodo per la modellizzazione di questo aspetto è quello che segue le equazioni del moto di Helbing.

Nel modello, le azioni di un gruppo sono suddivise in due fasi:

- la fase di raccolta dei membri del gruppo gli uni verso gli altri;
- la fase di uscita del gruppo che si sposta lungo il percorso dell'uscita selezionato.

Queste due fasi sono modellate alterando la direzione preferita del campo di moto nell'equazione di moto di Helbing.

Nella fase di raccolta gli agenti cercano di muoversi verso il centro del gruppo. Quando le distanze dal centro di ogni agente sono sotto un valore di soglia, il gruppo è considerato completo. Solo quando il gruppo è completo, inizia a muoversi verso l'uscita. Ciò significa che ogni membro del gruppo seguirà lo stesso campo di flusso e, inoltre, tenterà anche di restare unito a questo.

Questo fenomeno è modellato regolando la velocità di moto, con l'aggiunta di una forza supplementare, che punta verso il centro del gruppo denominata *forza di gruppo*. La dimensione di questa forza descrive l'attitudine dei membri del gruppo a restare uniti.

A gruppi diversi possono corrispondere valori diversi di questa "attitudine alla coesione". Ad esempio, per un gruppo composto da una madre e un bambino dovrebbe avere una forza di gruppo più grande gruppo di quella del gruppo composto da compagni di lavoro.

2.5 Incidente coinvolgenti merci pericolose (ADR)

La condizione di confinamento che caratterizza l'ambiente di galleria determina, ben oltre la normale pericolosità, un accresciuto rischio per gli esposti in caso di dispersione di merci pericolose.

Il metodo più diffuso per la determinazione di tale quota parte del rischio, in galleria come nelle tratte esterne, è stato per molti anni il software DG RAM compilato dal gruppo di lavoro PIARC e OCSE.

Il metodo, ancora riferimento preferenziale per l'analisi della componente di rischio dovuta ad ADR (si veda in proposito il capitolo sulle norme, e i paragrafi sulle disposizioni in vigore in vari Paesi europei) struttura l'analisi di 13 scenari di riferimento e considera alcuni parametri aggiuntivi per la qualificazione, attraverso modelli fisici semplificati, degli effetti di danno conseguente agli scenari incidentali.

Nonostante il software presenti indubbi vantaggi applicativi, tuttavia ne sono stati evidenziati al pari molti limiti, con l'effetto che oggi il settore manca di uno standard affidabile e riconosciuto.

In questo quadro, risultano particolarmente interessanti i risultati ottenuti nell'ambito del progetto Destination, (*Destination dangerous transport to new preventive instruments*), finanziato nell'ambito del Tavolo Ambiente del Programma Operativo di Cooperazione Transfrontaliera Italia-Svizzera 2007-2013 e coinvolgente la Regione Piemonte (capofila), la Regione Lombardia, la Valle d'Aosta, la Provincia Autonoma di Bolzano e il Canton Ticino (CH).

Il progetto è iniziato nel 2010 con l'obiettivo di quantificare il rischio associato al trasporto di merci pericolose su strada considerando sia le vulnerabilità antropiche che ambientali.

Nell'ambito del Progetto è stato definito un metodo di analisi di rischio, che considera i parametri:

- incidentalità stradale media annuale per tratto stradale;
- traffico veicolare giornaliero;
- velocità media di percorrenza della tratta;
- numero di corsie;
- probabilità che un incidente coinvolga un mezzo ADR basata sui flussi di traffico stimati per ogni sostanza.

La stima del danno consegue alla stima degli scenari incidentali considerati.

Lo strumento è in grado di effettuare elaborazioni standard, elaborazioni personalizzate e simulazioni, che prevedono la stima e la visualizzazione del rischio sulla rete stradale. L'analisi si riferisce a condizioni meteo standard.

L'elaborazione standard prevede la restituzione e visualizzazione del valore dell'indicatore di Rischio Sociale e di quello di Rischio ambientale.

$$R_{Dest} = \sum_i R_i = \sum_i \left(P_{is,i} \times \sum_j \left(P_{ADR,ij} \times \sum_k \left(P_{sc,ijk} \times \sum_m \left(F_{p,m} \times E_{ikm} \times S_{km} \times (1 - C_{ff,ikm}) \right) \right) \right) \right)$$

L'elaborazione viene effettuata considerando la formula di rischio:

I 4 pedici (i, j, k, m) rappresentano le principali dipendenze funzionali dei parametri da:

- arco stradale (i);
- sostanza ADR trasportata (j);
- scenario incidentali cui si associa una certa soglia e una conseguente area di danno (k);
- tipologia e suscettibilità del bersaglio esposto (m).

R_{dest} : rischio totale stimato dal solutore Destination [N/Y];

R_i : rischio totale riferito all'arco i -esimo [N/Y];

$P_{is,j}$: pericolosità della strada riferita all'arco i -esimo [N/veic.Km];

$P_{ADR,ij}$: probabilità di un incidente stradale coinvolgente la j -esima sostanza ADR sull'arco i [N_{ADR,ij}/veic.Km];

$P_{sc,ijk}$: probabilità del k -esimo scenario incidentale con soglia e area di danno note che coinvolge la sostanza j -esima riferito all'arco i -esimo [f_{sc}N_{ADR,ij}/veic.Km]

La lesività verso i bersagli è considerata con approccio Probit e l'introduzione di fattori correttivi di presenza e suscettibilità.

$F_{p,m}$: fattore di presenza dell' *m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto [-]

E_{ikm} : *m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto al *k-esimo* scenario incidentale con soglia e area di danno note riferito all'arco *i-esimo* [-];

S_{km} : suscettibilità dell'*m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto al *k-esimo* scenario incidentale con area e soglia di danno note [-];

$C_{ff,ikm}$: capacità di far fronte relativa all'*m-esimo* bersaglio potenzialmente esposto al *k-esimo* scenario incidentale con area e soglia di danno note [-];

L'elaborazione personalizzata permette di calcolare il rischio amplificando o riducendo i valori o introdurre alcuni fattori correttivi, rispetto all'elaborazione standard, che considerano effetti quali ad esempio le condizioni meteo, la differenza tra giorno/notte, la stagionalità e flussi di traffico che incidono su specifici parametri della formula.

Il parametro P_{is} (pericolosità intrinseca della strada) è un parametro funzione solo dell'arco stradale e può essere considerato quindi un attributo della strada.

Condivide l'unità di misura dell'incidentalità stradale e ne è funzione correlata.

$$P_{is} = Inc \times p_{terr}$$

con:

Inc: incidentalità stradale (incidenti/km/anno);

p_{terr} : fattore di aggravio per pericolosità territoriale.

Il fattore di aggravio per pericolosità territoriale valuta il potenziale incremento di incidentalità stradale dovuto all'effetto domino di pericoli naturali (frane, valanghe, esondazioni). L'aggravio viene valutato in termini empirici con un coefficiente che varia dal 3% al 10% che tiene conto della tipologia della sorgente, della frequenza/caratteristica dell'evento e della sua intersezione con il tracciato stradale.

Tipologia della sorgente e frequenza/caratteristica dell'evento		Valore da assegnare al parametro p_{terr}	
PAI AdB Po [2]	PZP/GZP BZ [3]	in presenza di classificazione di pericolosità	in assenza di classificazione di pericolosità
Dissesti PAI – Esondazioni • pericolo molto elevato (Ee) • pericolo elevato (Eb) • pericolo moderato (Em)	PZP - Pericoli idraulici (IS,DF,Ex) • H4 • H3 • H2	1,10 1,05 1,03	1,05
Dissesti PAI – Valanghe • peric. elevato/molto elevato (Ve) • pericolo moderato (Vm)	PZP – Valanghe (Ax) • H3/H4	1,10 1,03	1,10
Dissesti PAI – Conoidi • area non protetta (Ca) • area parzialmente protetta (Cp) • area protetta (Cn)	PZP - Frane (Lx) • H4 • H3 • H2	1,10 1,05 1,03	1,05
Dissesti PAI – Frane • frana attiva (Fa) • frana quiescente (Fq) • frana stabilizzata (Fs)	PZP – Frane (Lx) • H4 • H3 • H2	1,10 1,05 1,03	1,05
Fasce PAI – Fasce fluviali • fascia A (naturale deflusso piena) • fascia B (T=200 anni) • fascia C (T=500 anni)	PZP - Pericoli idraulici (IN) • T=30 anni • T=100 anni • T=200-300 anni	1,10 1,05 1,03	1,05

Tabella 12 - Valori del parametro p_{terr} in funzione dei pericoli territoriali

Il Parametro P_{ADR} (probabilità che un incidente stradale coinvolga il TMP) è un parametro funzione dell'arco stradale e della sostanza trasportata.

Può essere considerato un attributo della strada, corrispondente ad un vettore di dimensioni pari al numero di sostanze ADR che si intende gestire all'interno del SIIG. In assenza di dati più precisi è ragionevole assumere che P_{ADR} corrisponda alla quota di traffico del TMP rispetto al traffico generale (cioè il rapporto veicoli ADR incidentati / veicoli circolanti incidentali è assunto pari al rapporto veicoli ADR / veicoli circolanti).

ID sostanza	Classe ADR	Numero Kermler	Numero ONU	Sostanza	Ripartizione percentuale ipotizzata	Valori numerici dei singoli elementi del vettore P _{ADR}
1	2	23	1049	Idrogeno compresso	1,0%	0,00004
2	2	25	1072	Ossigeno compresso	0,5%	0,00002
3	2	20	1066	Azoto compresso	0,5%	0,00002
4	2	268	1005	Ammoniaca anidra	1,0%	0,00004
5	2	23	1075	Gas di petrolio liquefatto	15,0%	0,00058
6	2	263	1040	Ossido di etilene (+ azoto)	1,0%	0,00004
7	2	225	1073	Ossigeno liquido refrigerato	0,5%	0,00002
8	2	22	1977	Azoto liquido refrigerato	0,5%	0,00002
9	3	30	1202	Gasolio	42,0%	0,00162
10	3	33	1203	Benzina	14,0%	0,00054
11	3	336	1230	Metanolo	4,0%	0,00015
12	6.1	63	2023	Epicloridrina	2,0%	0,00008
				PARZIALE SOSTANZE MODELLO	82,0%	0,00319
				Materie corrosive (merci pericolose "C")	10,0%	0,00039
				Altre merci pericolose "non-A", "non-F", "non-T", "non-N"	8,0%	0,00031
				TOTALE	100,0%	0,00389

Tabella 13 - Valori numerici da assegnare ai singoli elementi del vettore P_{ADR}

Il parametro P_{ADR} è una misura dell'incidenza del TMP sul traffico generale.

Tipologia/pericolosità sostanza	Scenario incidentale tipo associato	ID scenario
INFIAMMABILITA'		
Gas estremamente infiammabile	Jet fire di gas estremamente infiammabile	A
Gas liquefatto infiammabile	Flash fire/VCE di vapori di gas liquefatto infiammabile	B
Gas liquefatto estremamente infiammabile	Flash fire/VCE di vapori di gas liquefatto estremamente infiammabile	C
	Jet fire di vapori di gas liquefatto estremamente infiammabile	D
	Fire ball	E
Liquido infiammabile	Pool fire di liquido infiammabile	F
	Flash fire/VCE di vapori di liquido infiammabile	G
Liquido estremamente infiammabile	Pool fire di liquido estremamente infiammabile	H
	Flash fire/VCE di vapori di liquido estremamente infiammabile	I
COMBURENZA		
Gas comburente (eventualmente liquefatto)	Dispersione di gas comburente	J
ASFISSIA		
Gas asfissiante (eventualmente liquefatto)	Dispersione di gas asfissiante	K
TOSSICITÀ		
Gas liquefatto tossico	Dispersione di vapori di gas liquefatto tossico	L
Liquido tossico	Dispersione di vapori di liquido tossico	M
PERICOLOSITA' PER L'AMBIENTE		
Liquido pericoloso per l'ambiente	Rilascio sul suolo e nelle acque	N

Tabella 14 - Elenco dei 14 scenari incidentali tipo di interesse per il progetto Destination

Il parametro P_{sc} è un parametro funzione dell'arco stradale, della sostanza trasportata e di uno specifico scenario incidentale cui si associa una certa soglia e una conseguente area di danno.

Il parametro P_{sc} è una matrice tridimensionale avente un numero di righe pari al numero di sostanze ADR che si intende modellizzare, un numero di colonne pari al numero di scenari incidentali tipo che si intende considerare all'interno del SIIG, mentre la terza dimensione riporta due fondamentali informazioni:

- la probabilità associata al singolo scenario incidentale tipo che coinvolge la singola sostanza modello, avendo tenuto conto delle diverse possibilità di perdita di contenimento;
- l'estensione dell'area di danno associata al singolo scenario incidentale tipo che coinvolge la singola sostanza modello, avendo tenuto conto delle diverse possibilità di perdita di contenimento e delle relative soglie di danno per tutti i possibili bersagli considerati.

Sono definite due diverse modalità di perdita di contenimento e di rilascio (*perdita lieve* pari al 20% della volumetria del contenitore e *perdita grave* pari al 100% della volumetria del contenitore; in tutti i casi si ipotizza cautelativamente che il contenitore sia pieno alla massima capacità).

Sotto queste ipotesi la matrice tridimensionale può essere semplificata in una matrice bidimensionale avente un numero di righe corrispondente al doppio del numero di combinazioni sostanza/scenario di interesse ($27 \times 2 = 54$) e un numero di colonne corrispondente al numero complessivo di soglie di danno per bersagli umani e non umani ($4+4 = 8$, vedi Tabelle 4.4 e 4.5 per le soglie di danno e Tabella 4.6 per i raggi di danno) maggiorato di uno (le probabilità di accadimento dei singoli scenari e delle singole perdite di contenimento, vedi Tabella 4.7).

ID sostanza		ID scenario													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Idrogeno compresso	1-A													
2	Ossigeno compresso									2-J					
3	Azoto compresso										3-K				
4	Ammoniaca anidra		4-B									4-L		4-N	
5	Gas di petrolio liquefatto			5-C	5-D	5-E									
6	Ossido di etilene (+azoto)			6-C	6-D	6-E						6-L			
7	Ossigeno liquido refrigerato									7-J					
8	Azoto liquido refrigerato										8-K				
9	Gasolio						9-F							9-N	
10	Benzina								10-H	10-I				10-N	
11	Metanolo								11-H	11-I			11-M		
12	Epicloridrina						12-F	12-G					12-M	12-N	

Tabella 15 - Individuazione delle 27 combinazioni sostanza/scenario

Sostanza/ scenario	Tipologia contenitore	Evoluzione scenario	Perdita lieve	Perdita grave
1-A	pressurizzato	innesco immediato gas infiammabile	4,50E-03	5,00E-04
2-J	pressurizzato	dispersione gas comburente	9,00E-03	1,00E-03
3-K	pressurizzato	dispersione gas asfissiante	9,00E-03	1,00E-03
4-B	pressurizzato	innesco ritardato vapori infiammabili	1,80E-03	2,00E-04
4-L	pressurizzato	dispersione gas tossico	6,84E-03	7,60E-04
4-N	pressurizzato	rilascio in fase liquida	3,60E-04	4,00E-05
5-C	pressurizzato	innesco ritardato vapori infiammabili	3,15E-03	3,50E-04
5-D	pressurizzato	innesco immediato vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
5-E	pressurizzato	fire ball da vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
6-C	pressurizzato	innesco ritardato vapori infiammabili	3,15E-03	3,50E-04
6-D	pressurizzato	innesco immediato vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
6-E	pressurizzato	fire ball da vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
6-L	pressurizzato	dispersione gas tossico	3,15E-03	3,50E-04
7-J	atmosferico	dispersione gas comburente	9,00E-02	1,00E-02
8-K	atmosferico	dispersione gas asfissiante	9,00E-02	1,00E-02
9-F	atmosferico	innesco liquido infiammabile	7,20E-03	8,00E-04
9-N	atmosferico	rilascio in fase liquida	8,28E-02	9,20E-03
10-H	atmosferico	innesco immediato liquido infiammabile	3,60E-03	4,00E-04
10-I	atmosferico	innesco ritardato vapori infiammabili	3,60E-03	4,00E-04
10-N	atmosferico	rilascio in fase liquida	7,87E-02	8,74E-03
11-H	atmosferico	innesco immediato liquido infiammabile	3,60E-03	4,00E-04
11-I	atmosferico	innesco ritardato vapori infiammabili	3,60E-03	4,00E-04
11-M	atmosferico	dispersione gas tossico	4,14E-03	4,60E-04
12-F	atmosferico	innesco immediato liquido infiammabile	3,60E-03	4,00E-04
12-G	atmosferico	innesco ritardato vapori infiammabili	3,60E-03	4,00E-04
12-M	atmosferico	dispersione gas tossico	4,14E-03	4,60E-04
12-N	atmosferico	rilascio in fase liquida	7,87E-02	8,74E-03

Tabella 16- Valori di P_{sc} calcolati per 27 combinazioni sostanza/scenario e due livelli di gravità del rilascio

2.5.1 Effetti di danno da dispersione di materiale ADR

Per ciascuno scenario è adottato un modello equivalente di danno fisico, qualificato nella distanza del fronte di letalità al 50% e in quello di letalità al 10% valutati con approccio Probit.

ID scenario e scenario incidentale tipo		Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili
A	Jet fire di gas estremamente infiammabile	12,5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
B	Flash fire/VCE di vapori di gas liquefatto infiammabile	LFL	½ LFL		
C	Flash fire/VCE di vapori di gas liquefatto estremamente infiammabile	LFL	½ LFL		
D	Jet fire di vapori di gas liquefatto estremamente infiammabile	12,5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
E	Fire ball	Raggio fireball	350 kJ/m ²	200 kJ/m ²	125 kJ/m ²
F	Pool fire di liquido infiammabile	12,5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
G	Flash fire/VCE di vapori di liquido infiammabile	LFL	½ LFL		
H	Pool fire di liquido estremamente infiammabile	12,5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
I	Flash fire/VCE di vapori di liquido estremamente infiammabile	LFL	½ LFL		
J	Dispersione di gas comburente	35% O ₂		25% O ₂	
K	Dispersione di gas asfissiante	6% O ₂	11% O ₂	15% O ₂	
L	Dispersione di vapori di gas liquefatto tossico	LC50 (30min,hmn)		IDLH	LOC
M	Dispersione di vapori di liquido tossico	LC50 (30min,hmn)		IDLH	LOC
N	Rilascio sul suolo e nelle acque				

Tabella 17 - Soglie di danno per i bersagli umani

Dove:

LFL = limite inferiore di infiammabilità

LC 50 = concentrazione di una materia in aria che ucciderebbe il 50% dei soggetti una volta somministrata

IDLH = massima concentrazione di una sostanza tossica a cui si può essere sottoposti per 30 minuti senza subire effetti irreversibili

Sostanza/ scenario	Tipologia perdita	Bersagli umani				Bersagli non umani			
		Zona 1: Elevata letalità	Zona 2: Inizio letalità	Zona 3: Lesioni irreversibili	Zona 4: Lesioni reversibili	Strutture	Aree boscate	Aree agricole	Acque superficiali
1-A	lieve	7	9	10	14	7	8	6	
	grave	15	20	23	30	15	17	14	
2-J	lieve	<5	<5				<5	<5	
	grave	<5	<5				<5	<5	
3-K	lieve	<5	<5	<5			<5	<5	
	grave	<5	<5	<5			<5	<5	
4-B	lieve	<5	<5				<5	<5	
	grave	<5	<5				<5	<5	
4-L	lieve	<5	33		93		<5	<5	
	grave	13	70		182		7	7	
4-N	lieve						8	8	8
	grave						25	25	25
5-C	lieve	44	60				44	44	
	grave	90	119				90	90	
5-D	lieve	26	35	41	53	26	29	24	
	grave	59	78	92	120	59	65	53	
5-E	lieve	39	104	138	175	39	39	39	
	grave	65	233	309	391	65	65	65	
6-C	lieve	49	67				49	49	
	grave	99	132				99	99	
6-D	lieve	26	35	41	53	26	29	24	
	grave	59	78	92	120	59	65	53	
6-E	lieve	46	105	138	175	46	46	46	
	grave	77	234	309	391	77	77	77	
6-L	lieve	110	215		550		148	148	
	grave	215	415		1.060		285	285	
7-J	lieve	50	87				50	50	
	grave	84	150				84	84	
8-K	lieve	10	14	19			10	10	
	grave	17	24	32			17	17	
9-F	lieve	26	36	43	56	26	29	23	
	grave	85	115	136	177	85	95	77	
9-N	lieve						8	8	8
	grave						25	25	25
10-H	lieve	26	36	44	57	26	30	24	
	grave	87	117	140	181	87	98	79	
10-I	lieve	44	60				44	44	
	grave	89	120				89	89	
10-N	lieve						8	8	8
	grave						25	25	25
11-H	lieve	10	14	17	23	10	12	9	
	grave	34	47	56	73	34	38	31	
11-I	lieve	<5	<5				<5	<5	
	grave	<5	<5				<5	<5	
11-M	lieve	<5	<5	8		8	<5	<5	
	grave	<5	8		34		<5	<5	
12-F	lieve	14	20	24	31	14	16	12	
	grave	47	65	77	101	47	53	42	
12-G	lieve	<5	<5				<5	<5	
	grave	<5	<5				<5	<5	
12-M	lieve	<5	9		38		<5	<5	
	grave	<5	38		164		<5	<5	
12-N	lieve						8	8	8
	grave						25	25	25

Tabella 18 – Dimensione caratteristica delle aree di danno calcolate per 27 combinazioni sostanza/scenario e due livelli di gravità del rilascio.

2.6 Sottosistemi condizionanti il flusso del pericolo in galleria

Qualificati gli scenari di riferimento per l'applicazione dell'analisi di rischio in ambiente galleria stradale, è necessario procedere all'analisi della rilevanza delle prestazioni dei sottosistemi.

È di seguito proposto l'insieme dei sottosistemi a funzione mitigativa collettiva, il cui elenco è ottenuto dall'Allegato II del D. Lgs. 264/2006; per ciascuno di essi è verificata la proprietà o meno di condizionare il flusso del pericolo.

2.2.3	Misure supplementari per pendenza longitudinale superiore al 3&
2.2.4	Misure supplementari per larghezza della corsia inferiore a 3.5 m con traffico pesante
2.8.1	Illuminazione Ordinaria
2.8.2	Illuminazione di sicurezza
2.8.3	Illuminazione di evacuazione
2.9.2-4	Ventilazione meccanica
2.9.5	Ventilazione meccanica – disposizioni speciali per la ventilazione semitrasversale
2.10.2-3	Stazioni di emergenza
2.11	Erogazione idrica
2.12	Segnaletica stradale
2.13.1	Centro di controllo
2.14.1	Impianti di sorveglianza: telecamere con rilevamento automatico di incidente e/o incendio
2.15.1	Impianto per chiudere la galleria: semafori agli imbocchi
2.16.1	Sistemi di comunicazione: ritrasmissione radio ad uso dei servizi di pronto intervento
2.16.2	Sistemi di comunicazione: messaggi di emergenza via radio destinati agli utenti della galleria
2.17.1	Alimentazione elettrica di emergenza
2.18	Caratteristiche di resistenza e reazione al fuoco degli impianti
2.3.2	Banchine pedonabili di emergenza
2.3.7-8	Uscite di emergenza
2.4.1	Accessi per i servizi di pronto intervento
2.4.2	Punti di attraversamento spartitraffico agli imbocchi
2.5.2-3	Piazzole di sosta
2.6.2	Drenaggio
2.7	Resistenza al fuoco delle strutture
2.14.2	Impianti di sorveglianza: rilevamento automatico incendio
2.16.3	Sistemi di comunicazione: altoparlanti nei rifugi e presso le uscite
2.15.2	Impianto per chiudere la galleria: semafori interni

Legenda:

	Misure, prestazioni e caratteristiche prescritte o raccomandate: a prestazione garantita, o determinanti lo scenario di incidente ma con effetti invarianti sull'autosoccorso
	Misure, prestazioni e caratteristiche prestazionali a prestazione condizionata – condizionanti l'autosoccorso

Tabella 19: Elenco delle misure, prestazioni e caratteristiche ex Allegato II D. Lgs. 264/2006 per qualificazione dell'effetto sull'autosoccorso

Tralasciando le caratteristiche di struttura che costituiscono **dati fissi di scenario** (come la larghezza del marciapiede, realizzata sempre di misura massima compatibile) risultano condizionanti lo scenario di autosoccorso i soli sottosistemi di galleria e le procedure operative che possono influenzare la quantità di esposti al fenomeno, e quindi in particolare:

- la procedura che attiva l'interdizione di accesso al tunnel, in quanto prestazione complessa tecnico – comportamentale, è esposta ad inaffidabilità (in relazione alla qualificazione RAM dell'impianto di segnalazione agli imbocchi) e di efficacia (in relazione all'effetto atteso di blocco del flusso di traffico all'ingresso);
- tutti i sottosistemi capaci di condizionare (positivamente o negativamente) le prestazioni degli esodanti, e in particolare:
 - impianto elettrico di emergenza,
 - impianto di illuminazione (specialmente di emergenza),
 - impianto di ventilazione

Tutte le prestazioni fornite da tali impianti, in quanto direttamente impattanti la capacità e la prestazione di autosoccorso, dovranno essere definite in termini RAMS, secondo l'approccio tecnico fornito nel capitolo dedicato.

3 L'incidente come fenomeno e la sua stima

3.1 Premessa

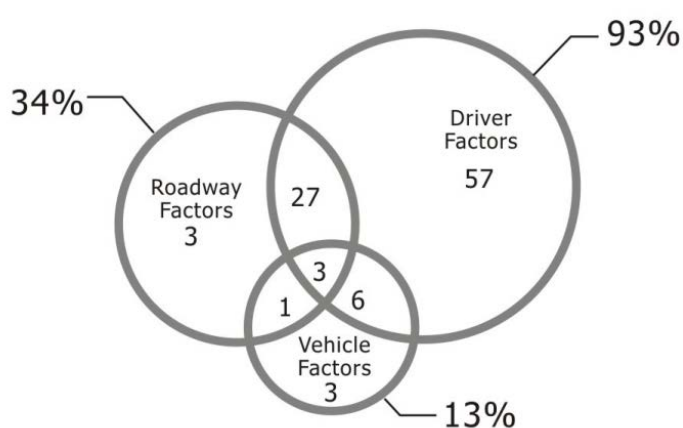
Il tema della sicurezza stradale è certamente rilevante sia dal punto di vista etico che della gestione della spesa sociale (pubblica e privata). La gestione della sicurezza stradale coinvolge attori diversi (decisori pubblici, imprese e collettività). L'ottimizzazione della spesa finalizzata alla prevenzione è un obiettivo strategico in un quadro di limitata disponibilità delle risorse.

Per l'ottenimento dello scopo della sicurezza delle strade è quindi essenziale focalizzare il tema della prevenzione tecnica possibile, e a questo fine è essenziale disporre di strumenti adeguati alla verifica dell'efficienza e dell'efficacia delle misure tecniche adottate; tali strumenti non possono che basarsi sull'analisi degli effetti delle modifiche tecniche - gestionali sui principali indicatori di sicurezza stradale, costituiti dalle occorrenze e/o dai tassi di incidente (Yannis G. P., 2016).

L'incidente è l'epifenomeno di un processo complesso associato ad un sistema aperto, nel quale sono riconoscibili componenti sistemiche generative del pericolo riconducibili a diversi ambiti, e in particolare:

- all'infrastruttura, qualificata nelle proprie caratteristiche geometriche, funzionali e prestazionali;
- alle condizioni di traffico inteso come fenomeno complessivo, qualificato nelle statistiche sintetiche su periodi lunghi (TGM, traffico giornaliero medio, o AADT) e brevi (densità per fasce orarie, intensità di punta e fenomeni di congestione);
- alle condizioni meteo climatiche, in quanto le condizioni ambientali influenzano la guida e modificano le prestazioni di aderenza delle pavimentazioni,
- agli utenti che conducono mezzi propri, e che, con il proprio comportamento nel complesso del flusso di traffico e in impegno della specifica tratta infrastrutturale, in genere determinano l'innescò dei fenomeni anomali prodromici agli incidenti.

L'ipotesi che il comportamento dell'utente – veicolo sia il fattore determinante l'innescò del fenomeno incidentale è confermato dalle valutazioni statistiche proposte dall'Aashto (Highway Safety Manual, 2010) e sinteticamente rappresentate nella grafica seguente.



Source: Treat 1979

Figura 69: rapporto di incidenza tra le cause di incidente tra gli ambiti generativi del pericolo - Highway Safety Manual, 2010

In forma simbolica la **prestazione di sicurezza offerta** da una tratta stradale può essere rappresentata attraverso la scrittura del funzionale seguente:

$$f_S = f(\mathbf{I}, \mathbf{T}, x, t)$$

dove \mathbf{I} è un vettore che raggruppa le caratteristiche dell'infrastruttura, \mathbf{T} è n vettore che raccoglie le caratteristiche del traffico, e x e t indicano la dipendenza spaziale e temporale del funzionale; nella forma funzionale saranno in genere presenti fenomeni aleatori di mutua influenza tra i singoli termini dei vettori \mathbf{I} e \mathbf{T} , e gli stessi \mathbf{I} e \mathbf{T} saranno condizionati dalle condizioni al contorno, anch'esse variabili e mutabili dipendenti dal tempo, a partire dalle condizioni meteo-climatiche.

L'utente che impegna la sezione di interesse attiva una **prestazione di sicurezza richiesta**, anch'essa rappresentabile in forma astratta da un funzionale:

$$f_{\bar{D}} = f(\mathbf{I}, \mathbf{T}, \mathbf{U}, x, t)$$

nella quale, in aggiunta alla complessità descritta, la richiesta di prestazione è ulteriormente condizionata dal comportamento del complesso veicolo – utente in transito, rappresentato dal vettore \mathbf{U} .

Il transito può quindi essere considerato sicuro (e cioè avviene in assenza di incidenti) quando la prestazione di sicurezza richiesta è inferiore a quella offerta dal sistema, e il flusso è regolare (dal punto di vista della sicurezza) fino a quando tutti i veicoli transitanti mantengono la condizione di margine di sicurezza positivo:

$$MS = f_S - f_{\bar{D}} > 0$$

Quando invece un singolo veicolo, nella sua propria modalità di impegno, richiede una prestazione di sicurezza eccedente la disponibilità offerta dal sistema, allora si determina una condizione di incidente.

La figura seguente propone una rappresentazione qualitativa della relazione tra il funzionale f_S e il funzionale $f_{\bar{D}}$ e del $MS = f_S - f_{\bar{D}}$.

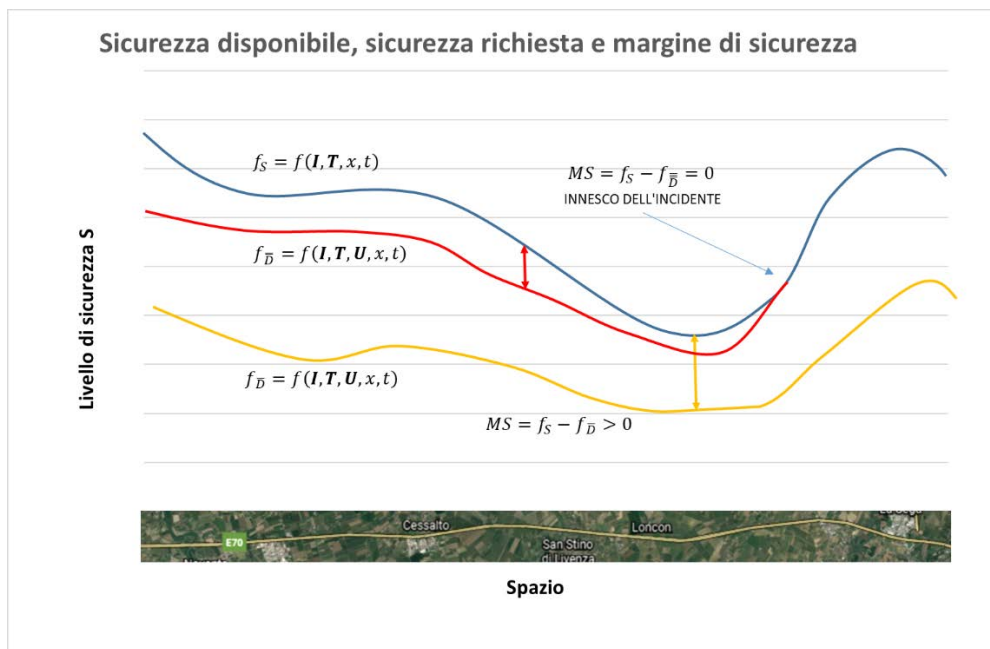


Figura 70: rappresentazione qualitativa della relazione tra il funzionale f_S e il funzionale $f_{\bar{D}}$ e del $MS = f_S - f_{\bar{D}}$

È quindi possibile qualificare il fenomeno incidentale come un fenomeno aleatorio e l'incidentalità come la concreta realizzazione di un processo stocastico tempo-dipendente.

In quest'ottica, le strategie tecniche di incremento della sicurezza corrispondono a strategie di massimizzazione del margine di sicurezza MS, e quindi a strategie di incremento (atteso efficace ed efficiente) del funzionale f_S e di condizionamento in senso riduttivo dei funzionali f_D associati a ciascun utente della strada.

La possibilità concreta di intervenire in senso riduttivo sul funzionale f_D è in verità piuttosto limitata. L'ambito comportamentale, che pure – come visto – costituisce l'ambito nel quale si determina l'insnesco dell'incidente, è caratterizzato dalla sostanziale indisponibilità di misure di prevenzione tecnica, con l'unica rilevante eccezione della possibilità di adottare interventi condizionanti la velocità di impegno della tratta, o attraverso interventi di dissuasione all'eccesso di velocità da realizzare nell'infrastruttura (segnaletica, strisce sonore...) o attraverso politiche gestionali su limiti di velocità e controlli connessi. Fatta questa eccezione, l'ambito di prevenzione efficace rispetto alla generalità dei comportamenti degli utenti (anche in quanto condizionati dalle condizioni psicofisiche degli utenti alla guida) è principalmente riconducibile a campagne di comunicazione e prevenzione comportamentale.

Per quanto riguarda invece le variabili condizionanti il fenomeno incidentale riconducibili alle condizioni dei veicoli, queste possono essere considerate quali caratteristiche specifiche, dipendenti da fattori economici e culturali locali e variabili nel tempo, che possono proporsi quali mediatori dell'incidentalità determinata dal comportamento degli utenti e dai fattori tipicamente tecnici-ingegneristici, individuati in via principale nelle caratteristiche dell'infrastruttura e del traffico che la utilizza.

I fattori meteorologici agiscono invece come mediatore tra le caratteristiche sistemiche e i funzionali di prestazione di sicurezza offerta e richiesta. Le misure tecniche disponibili all'incremento del margine di sicurezza rispetto a tali dinamiche sono specifiche e tendenzialmente efficaci.

3.2 Finalità degli studi sull'incidentalità stradale

L'analisi di dettaglio delle relazioni tra i fattori sistemici e il fenomeno incidentale è la premessa essenziale alla predisposizione di metriche utili alla misura del fenomeno e alla sua previsione. L'introduzione di metriche dell'incidentalità consente di applicare, in astratto, un robusto metodo ingegneristico per la gestione della sicurezza stradale.

La disponibilità di studi in materia è ampia; gli studi in materia possono essere sommariamente distinti in:

- Analisi specifiche con approccio epidemiologico - descrittivo, principalmente indirizzate al censimento di correlazioni significative tra fattori sistemici (relativi all'infrastruttura, al traffico, alle condizioni meteorologiche o all'utenza) e incidenti, condotti in genere con approcci statistici relativamente semplici e tipicamente riconducibili all'approccio epidemiologico del fenomeno incidentale;
- Analisi specifiche orientate all'indagine delle relazioni causali dell'incidentalità;
- Analisi sistematiche, evolute rispetto all'approccio precedente, principalmente indirizzate alla formulazione di strumenti previsionali degli incidenti, da applicarsi alla gestione della sicurezza stradale in contesti ampi.

Dal punto di vista ingegneristico sono certamente di maggior interesse gli studi del secondo e terzo tipo, per quanto sia da rilevare come la quota parte di rischio incidentale riferibile alle aree socio-comportamentale da un lato e quella tecnica, riferibile alle condizioni dell'infrastruttura, dall'altro, non possano essere a priori considerate incorrelate (si veda, a tal proposito, Elvik, 2004).

Considerando la peculiare difficoltà di ottenere completezza e rappresentatività campionaria dalle rilevazioni su periodi di osservazione limitati, a questo scopo assumono particolare interesse i modelli di previsione incidentale.

Di seguito, in distinte sezioni, è proposta una revisione degli studi disponibili e afferenti alle due famiglie individuate.

3.2.1 Studi indirizzati alla verifica di specifiche evidenze con approccio epidemiologico - descrittivo

Un primo tentativo di analisi del fenomeno dell'incidentalità caratterizzato dall'ambizione di una collezione trasversale per ambito psicosociale dei fattori causali si deve a Hakim e collaboratori. In tale lavoro è proposta l'evidenza di correlazioni significative tra incidentalità e flusso di traffico, reddito locale, percentuale di guidatori giovani, norme di manutenzione obbligatoria dei veicoli e norme sul consumo di alcol (Hakim, 1991). Tale lavoro, sviluppato a partire da una analisi della bibliografia dell'epoca sulle varie tematiche affrontate, evidenzia come le politiche di intervento legislativo orientate al condizionamento del comportamento per legge non presentino sempre, alla prova dei fatti, l'efficacia ipotizzata.

Un ulteriore studio (Híjar, 2000) propone un approccio epidemiologico sull'incidentalità osservata in un periodo di tempo significativo e su tratte rilevanti. In questo caso, gli incidenti registrati nell'autostrada tra Mexico City e Cuernavaca hanno evidenziato correlazioni positive e significative con l'età del conducente inferiore a 25 anni, la frequenza del viaggio, le motivazioni del viaggio (e in particolare se lo spostamento era avvenuto o meno per motivi lavoro), il consumo di alcol, la guida in orario diurno e feriale, e le condizioni meteorologiche avverse.

Uno studio di Page (2001) ha invece indagato la relazione tra incidenti (sia con riferimento al numero che al tasso di mortalità) in alcuni paesi OCSE tra il 1980 e il 1994, evidenziando (attraverso l'uso di regressione lineare multipla) una incidenza significativa e rilevante delle variabili indipendenti motorizzazione (numero di veicoli pro capite), incidenza di veicoli pesanti per il trasporto collettivo (autobus), composizione demografica della popolazione e incidenza della fascia giovanile in particolare, consumo di alcol.

Un analogo studio sull'incidentalità mortale nella provincia di Udine ha evidenziato che le categorie esposte a rischio maggiore sono pedoni, ciclisti e motociclisti, e le fasce d'età giovane e anziana in particolare. Tale rischiosità specifica è inoltre risultata variabile nelle ore della giornata (Valent, 2002).

Studi simili sono stati sviluppati in Norvegia (Jones, 2003), Hong Kong (Yau K. K., 2004), Alcuni studi si sono inoltre dedicati ad approfondire il peso, con approccio Odds Ratio, della velocità sul rischio incidentale e sugli incidenti gravi in particolare (Elvik, Speed and road safety: synthesis of evidence from evaluation studies., 2005), di specifiche modalità di incidente in relazione a fattori ambientali (Malin, 2019), socioeconomici e demografici (Yau K. K., 2006), di interventi di regolazione del traffico sotto il profilo normativo (Rolison, 2018), dell'incidenza dei disturbi dell'attenzione determinati dalla diversa propensione al sonno nelle varie fasce orarie della giornata (Åkerstedt, 2008), o al consumo di alcol e droghe (Kwon, 2015), o alla differenza socioeconomica di aree e distretti di un intero Paese (Gonzales et al, 2020).

Al di là della commistione d'ambito dei fattori selezionati – e quindi della sostanziale marginalità strategica di tali analisi allo scopo della gestione dell'infrastruttura – tali studi confermano l'esistenza di utenze fragili, costituite da giovani, conducenti che fanno uso di sostanze psicoattive (alcol, droghe) e, con l'emergenza rilevante che caratterizza il tempo corrente, l'utilizzo pericoloso di device (già in precedenza radio e cellulare, e oggi smartphone, TV e navigatori), la pericolosità dei quali non sembra essere correttamente percepita dagli utenti della strada (Vanlaar, 2006).

3.2.2 Studi indirizzati alla verifica delle variabili infrastrutturali causali del fenomeno incidentale

Un approccio per logica interna consente di ipotizzare, con motivazioni razionali, la rilevante influenza sull'incidentalità di moltissime tra le caratteristiche geometriche e strutturali che caratterizzano una tratta stradale. Tuttavia, alla messe di variabili che possono essere individuate a priori per la identificazione astratta

del set di variabili causali che determinano l'incidentalità, molto spesso non corrisponde la significatività attesa alla prova delle applicazioni statistiche.

In astratto, quindi, appare ragionevole che l'incidentalità dipenda strettamente e contemporaneamente, oltre che dalle variabili di esposizione, dalle caratteristiche delle pavimentazioni (che determinano l'aderenza), dalla geometria della sezione e dalla pendenza longitudinale, dalla curvatura e dalla successione tra le tratte a curvatura variabile, dalla visibilità (e quindi dalla illuminazione della tratta e dalle condizioni meteorologiche che ne costituiscono un mediatore), dalla conformazione delle corsie, delle carreggiate, dalla presenza di banchine o meno, dalla velocità del flusso del traffico, dai fenomeni di congestione, dalla variabilità delle velocità di transito tra le varie componenti di traffico, dalla composizione veicolare... Tuttavia anche i disegni regressivi più ambiziosi, basati su *dataset* popolosi e dettagliati, spesso hanno frustrato l'ambizione di riconoscere relazioni causali multiple significative, e in alcuni casi hanno addirittura evidenziato assenza di correlazione semplice significativa tra le variabili collezionate.

Le motivazioni di tali frustrate ambizioni di generalizzazione sono spiegabili dalla complessità del fenomeno, che può a tutti gli effetti essere definito caotico (Wang e coll. 2013).

Gli studi disponibili in letteratura hanno proposto alcune evidenze, con generalizzabilità variabile. Solo con riferimento alle evidenze emerse per prime nella successione degli studi:

- variabili di esposizione, costituite dalla lunghezza della tratta e dal flusso di traffico che la impegna: le evidenze sono risultate fin dai primi studi, coerentemente alle ipotesi in tempo risalente proposte per logica interna;
- andamento plano-altimetrico del tracciato (longitudinale e trasversale): l'incidentalità è risultata positivamente correlata alla curvatura (Persaud et al, 2000; Ng e Tarek Sayed, 2004) e alla pendenza (Ng e Tarek Sayed, 2004);
- caratteristiche della piattaforma (scabrezza e capacità di aderenza in condizione di asciutto e bagnato): (Fridstrøm et al., 1995);
- visibilità (in condizioni naturali e artificiali): l'incidentalità è risultata dipendente dalle condizioni di illuminazione e meteo (Fridstrøm et al., 1995; Yannis, Kondyli and Mitzalis, 2013);
- caratteristiche specifiche del traffico (composizione in veicoli leggeri e pesanti, intensità complessiva o per corsia, velocità media del flusso): l'incidentalità è correlata positivamente al volume di traffico medio orario e al volume di traffico medio giornaliero (Persaud et al., 1993; Fridstrøm et al., 1995) quale effetto direttamente conseguente all'aumentare delle occasioni di incidente; evidenze di correlazione tra incidenti e percentuale di veicoli pesanti (Vadlamani et al, 2011);
- numero e dimensioni di carreggiate e corsie: Amundsen e Ranes (2000) evidenziano in generale che l'incidentalità tipica delle strade è strettamente dipendente dagli standard costruttivi; già in precedenza era risultato evidente che l'incidentalità è correlata positivamente al numero delle corsie per carreggiata, in ragione dell'aumento delle strategie di free-flow nella gestione delle traiettorie di marcia dei singoli veicoli (Persaud et al., 1993); la rilevanza del free-flow è stata confermata anche da studi che hanno considerato strati omogenei per livelli di servizio – alti e bassi , i quali hanno dimostrato che l'incidentalità relativa ha un andamento inverso rispetto al TGM per i casi estremi (Hadi et al., 1995); l'incidentalità e la gravità media incidentale sono correlate negativamente alla larghezza delle singole corsie (a parità di numero di corsie) (Knuiman, 1993); evidenze analoghe sono proposte sulla proporzione tra incidenti, numero di corsie, larghezza della sezione e traffico (Abdel-Aty e Essam Radwan, 2000; Caliendo et al, 2007; Wang et al, 2009; Noland et Oh , 2004).

Come detto, la rilevanza statistica delle precedenti caratteristiche emerge, in verità, in modo differenziato nei vari studi: nel confronto tra i vari studi è riscontrabile infatti una modifica della misura dell'effetto, e, in alcuni casi, significatività dimostrate in alcune ricerche risultano non confermate in altre.

Un contributo alla restituzione di una visione vasta delle evidenze, parziali, ottenute nell'analisi di correlazione e di regressione prodotte negli ultimi 50 anni è proposto da Wang e coll. (2013), ed è riportata nella tabella di seguito, estratta dalla fonte citata.

Table A1
Summary of empirical studies on the effects of traffic and road characteristics on road safety.

Study	Data/research context	Summary of key finding(s) discussed in Sections 4 and 5
Abdel-Aty and Radwan (2000)	Highway accident data for 1992–1994 on State Road 50 in Central Florida, US	The degree of curvature increases the number of accidents on a road segment
Abdel-Aty and Wang (2006)	Accidents that occurred at the signalised state road intersections for 1999–2000 in the state of Florida, US	Intersections with 3-legs, with exclusive right-turn lanes on both roadways are associated with lower accident frequencies
Aljanahi et al. (1999)	Accident data for 1988–1992 on dual-carriageway roads in two counties in the UK	The number of accidents would reduce if the speed limit were to be lowered. Accidents are generally more serious at higher speeds
Baruya (1998)	Accident data for the years 1992–1996 on rural single-carriageway roads in England. The UK model was also compared with European data (from the Netherlands, Sweden and Portugal)	Average speed is negatively associated with accident frequency; the “degree of congestion” has a negative effect on accident frequency
Ceder (1982)	Daylight fatal and injury accidents on 4-lane interurban road sections for the period 1967–1975 in Israel	The relationship between the total accident rate and hourly flow follows a U-shaped curve under free flow conditions while for the case of “congested” flow data the accident rate increases more sharply
Ceder and Livneh (1982)	Fatal and injury accidents on 4-lane interurban road sections for the period 1967–1975 in Israel	Hourly traffic flow was found to be inversely related with accident rates for single-vehicle accidents in all cases; while in some cases hourly traffic flow was found to be positively related with accident rates for multi-vehicle accidents
De Brabander and Vereeck (2007)	Registered injury accidents that occurred between 1991 and 2001 in Flanders	Traffic lights can be more effective in protecting vulnerable road users than roundabouts by comparing safety situations between signalised intersections and non-signalised roundabouts at intersections
Dickerson et al. (2000)	Road accidents in London, UK	A strong negative accident externality was associated with high traffic flows
Golob and Recker (2003)	Accident data for 1998 Californian highways in the US	Accident severity generally tracks the inverse of traffic volume
Golob et al. (2004)	Accident data for 1998 Californian highways in the US	Strong relationships between traffic flow conditions and the likelihood of traffic accidents
Gwynn (1967)	Hourly accident data between 1959 and 1963 on a four-lane highway in New Jersey in the US	A U-shaped relationship exists between hourly traffic flow and accident rates
Hanbali and Fornal (1997)	Empirical study on intersection accidents in 1993 in the city of Milwaukee, US	Improvements in facility capacity (i.e. decreased traffic congestion) could reduce the “stop-and-go” driving related collisions
Haynes et al. (2007)	District-level accident data for the period 1995–1999 in England and Wales	More curved roads in an area result in less road accidents
Haynes et al. (2008)	Fatal road accidents occurring between 1996 and 2005 in 73 territorial local authorities across New Zealand	Road curvature has an inverse relationship with fatal accidents in urban settings. Curvature was generally found to be a protective factor
Hels and Orozova-Bekkevold (2007)	Cyclist accidents occurred at roundabouts between 1999 and 2003 in Denmark	The older the roundabout the higher the probability of accidents
Ivan et al. (2000)	Accidents on two-lane highway in Connecticut in the US	For single-vehicle accidents, there is a negative-exponential relationship with the segment V/C ratio. For multi-vehicle accidents the segment V/C is insignificant
Johansson (1996)	Monthly car accidents on motorways, January 1982 to December 1991, in the Swedish counties Stockholm, Kristianstad, Malmihus, Halland, Gothenburg and Bohus and Alvsborg	Reduced speed limit decreases the number of accidents involving minor injuries and vehicle damage

Table A1 (continued)

Study	Data/research context	Summary of key finding(s) discussed in Sections 4 and 5
Kockelman and Kweon (2002)	A sample of 0.85% of all police reported accidents in the US, obtained from 1998 National Automotive Sampling System GES	Males and younger drivers in newer vehicles at lower speeds sustain less severe injuries. Pickups and sport utility vehicles are less safe than passenger cars under single-vehicle crash conditions
Kockelman and Ma (2007)	Accidents that occurred in January 1998 on six Orange County, California freeways: Interstates 5 and 405, and State Routes 22, 55, 57, and 91	No evidence that speed conditions influence accident occurrence
Kononov et al. (2008)	Five years of accident data for multilane urban freeways in California, Colorado, and Texas in the US	Total as well as fatal and injury accident rates increase with the increase in traffic congestion; an increased number of lanes increases the number of accidents
Lave (1985)	Road fatalities during 1981 and 1982 on US high-speed roads (rural interstates, arterials, and collectors; and urban freeways, interstates, and arterials; Alaska and Hawaii were excluded)	Fatality rate was strongly associated with speed variance rather than average speed
Lord et al. (2005)	Accident data from 1994 to 1998 for rural and urban highways in the US	Both road density and V/C ratio have an overall inverse relationship with the number of accidents (per year per km). There is an inverse U-shaped relationship for total and single-vehicle accidents but a positive relationship for multi-vehicle accidents. There is a positive accident-traffic flow relationship, but the accidents increase at a decreasing rate as flow increases
Martin (2002)	Road accidents on interurban motorways in France between 1997 and 1998	Accident rates are highest in light traffic compared to heavy traffic, especially on three-lane motorways. There is no significant difference between daytime and night-time accidents. However, if accident severity was considered, hourly accidents were much worse in a night-time and light-traffic situation
Milton and Mannering (1998)	Accident data for highways in the state of Washington during 1992–1993	Short sections are less likely to experience accidents than longer sections; narrow lanes (less than 3.5 m) and sharp horizontal curves tend to decrease accident frequency in Eastern Washington; there is a positive relationship between accident frequency and the tangent length before a horizontal curve
Nilsson (2004)	Road accident data from Sweden	Changes in the number of accidents (or accident rate) can be associated with the changes in speed according to a power function. Positive associations between changes in speed and accidents were found, though the magnitude depends on types of accidents (e.g. fatal and injury)
Noland (2003b)	Road casualties in all 50 states in the US over a 14 year period (1984–1997)	Infrastructure improvements (e.g. newer lane miles, additional lanes) have been ineffective in reducing road fatalities and injuries
Noland and Oh (2004)	County-level highway accident data during 1987–1990 in the state of Illinois	An increase in the number of lanes and lane widths was associated with increased fatalities; and an increase in the outside shoulder width was found to be associated with reduced accidents
Noland and Quddus (2005)	Road traffic casualties during the period 1999–2001 in London, England	There is little effect of traffic congestion on road safety
O'Donnell and Connor (1996)	Road accidents involving motor vehicle occupants in 1991 in New South Wales, Australia	Increases in vehicle speed and the age of the victim would slightly increase the probabilities of serious injury and death. Higher blood alcohol level increases the possibility of a severe accident
Ossiander and Cummings (2002)	Accidents over the period 1974–1994 on rural and urban interstate freeways in Washington State, US	Increased speed limit was associated with a higher fatality rate
Peirson et al. (1998)	Accident and traffic data for London in 1991	It is proposed that the number of accidents increases in proportion to the increase in traffic flow
Pérez (2006)	Study on rural highways during the period 1986–1993	Highway upgrading has a significant positive effect on road safety
Quddus et al. (2010)	Accidents on the M25 motorway in England during the period 2003–2006	There is little impact of traffic congestion on accident severity; increased traffic flow decreases the level of accident severity
Shankar and Mannering (1996)	Single-vehicle motorcycle accidents (i.e., accidents involving one motorcycle) during the period 1989 and 1994 in the state of Washington, US	Speeding or vehicle speed at time of accident increases the likelihood of fatality, evident injury, and disabling injury. Helmet usage tends to increase the possibility of fatality when riders collide with fixed objects
Shankar et al. (1995)	Interstate rural freeway (I-90) in the Seattle area during the period 1988–1993	Number of horizontal curves and maximum grade are found to have a positive relationship with accident frequency
Shankar et al. (1996)	Interstate rural freeway (I-90) in Seattle area during the period 1988–1993	The increased number of horizontal curves per kilometre increase the possibility of an accident resulting in 'possible injury' relative to 'property damage only'
Taylor et al. (2002)	Accidents during the period 1992–1998 on rural single-carriageway roads in England	A positive relationship between accident frequency and average speed was found
Turner and Thomas (1986)	Motorway accidents in England	During the early morning when traffic is light there are a high number and percentage of fatal and serious injury accidents
Wang et al. (2009a)	Accidents for the period 2000–2002 in English wards	Increased average speed within a ward is positively associated with total fatalities and serious injuries; and road curvature is found to be negatively associated with road accidents
Wang et al. (2009b)	Accidents for the period 2004–2006 on the M25 motorway in England	Traffic congestion has little or no impact on the frequency of road accidents on the M25 motorway
Wang et al. (2013)	Accident data for the years 2003–2007 on the M25 motorway and surrounding motorways and A roads that connect to the M25 in England	Increased traffic congestion is associated with more fatal and serious accidents; traffic congestion however has little impact on slight injury accidents.
Zhou and Sisiopiku (1997)	Accident data from 1993 to 1994 for the interstate highway I-94 in Detroit, Michigan, US	The relationship between the hourly accident rates (per million vehicle kilometres) and the V/C ratio follows a U-shaped pattern and accidents involving injury and fatalities tended to decrease while the V/C ratio increases

Tabella 20: review sulle relazioni significative tra caratteristiche geometriche, strutturali e del traffico verificate in vari studi (Wang e coll. 2013, table A)

3.2.3 Studi e ricerche indirizzati alla formulazione di funzioni previsionali dell'incidentalità

Col progressivo incremento delle evidenze di correlazione certificate nei vari studi specifici, e lo sviluppo continuo degli strumenti di calcolo statistico nella disponibilità dei ricercatori, si è affermata la tendenza alla ricerca di funzioni previsionali dell'incidentalità che, considerando un opportuno set di variabili esplicative, consentissero di spiegare una quota rilevante della varianza del fenomeno.

I tentativi di definire un modello previsionale complesso muovono tutti dall'assunzione che il principale precursore incidentale è costituito dal fattore di esposizione, e quindi dalla lunghezza del tratto in osservazione e dalla misura del traffico medio che percorre la tratta in un periodo di riferimento. Tipicamente le caratteristiche infrastrutturali e gestionali di interesse sono quindi costituite da lunghezza e AADT (traffico giornaliero medio annuale, o TGM, traffico giornaliero medio nel caso italiano).

Tuttavia, la correlazione tra incidentalità e variabili di esposizione, prima intuita e quindi verificata dalle statistiche incidentali nella seconda metà dello scorso secolo, non solo non esaurisce la complessità del fenomeno, ma anzi ha ben presto evidenziato significativi limiti di qualità statistica.

Le prime evidenze sulla carenza esplicativa dei modelli di regressione lineare che considerassero solo le variabili di esposizione sono state discusse tra le fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80.

Ulteriormente è stata evidenziata la limitata qualità della correlazione tra AADT e incidentalità. Nei suoi studi, infatti, Ceder ha evidenziato come la relazione tra AADT e incidenti presentasse una discontinuità nel passaggio tra condizioni di traffico a flusso libero e condizioni di traffico congestionato (Ceder A., 1982)a (Ceder, 1982)b.

A partire dalla fine degli anni '80 sono stati proposti diversi modelli di regressione lineare caratterizzati da maggiore complessità, con l'introduzione nei modelli di un numero più ampio di variabili esplicative per verificare l'esistenza e l'intensità delle relazioni tra incidenti stradali e configurazione geometrica della strada (Zegeer et al. 1987, 1995, Okamoto e Koshi, 1989, Joshua e Garber, 1990, Miaou e Lum, 1992 e 1993, Miaou, 1994). Tuttavia, è risultato presto evidente che i modelli lineari erano poco adatti alla descrizione del fenomeno in quanto la varianza delle variabili nel modello non risulta costante come richiesto (Miaou et al., 1996); ulteriori limiti di modello sono riscontrabili nella frequente non normalità delle variabili in gioco.

La dimostrazione della preferibilità di un approccio statistico attraverso l'uso di modelli lineari generalizzati in luogo dei modelli di regressione con variabile normale si deve al lavoro di Joshua e Garber (1990), Miaou e Lum, (1993) e di Miaou e coll. (1994).

Un ulteriore studio caratterizzato da sistematicità si deve a Maher e Summersgill (Maher, 1996). Nel loro lavoro è evidenziato come il GLM sia un approccio più adeguato al trattamento dei dati incidentali, e come sia tuttavia necessario che l'impostazione del modello tenga in considerazione il problema della sottostima del valore medio, della sovradisersione dei dati reali rispetto al modello ipotizzato, e il problema legato alla gestione del trend nel tempo delle occorrenze.

L'applicazione dei GLM si è velocemente diffusa perché il modello risultante, caratterizzato da robusta base teorica, produce coefficienti interpretabili per ogni variabile esplicativa inclusa. Inoltre, questo framework di modellazione può essere facilmente applicato utilizzando programmi software statistici commerciali, come SAS (SAS, 2002) o Genstat (Payne, 2000).

I GLM proposti a partire dal 1993 si sono distinti in ragione della funzione di distribuzione di frequenza utilizzata. In particolare sono stati proposti GLM con funzione di Poisson (Miaou e Lum, 1993; Miaou, 1994; Maher e Summersgill, 1996; Oh et al., 2006; Lord et al., 2007), Poisson-gamma o Binomiale Negativa (Miaou, 1994; Shankar et al., 1995; Maher e Summersgill, 1996; Milton e Mannering, 1998; Persaud et al., 2002; Hiselius, 2004; Oh et al., 2006; Lord et al., 2007; Donnell e Mason, 2006), Gamma (Oh et al., 2006), nonché

ulteriori variazioni del modello di regressione con funzione Binomiale Negativa (Chin e Quddus, 2003; Miaou e Lord, 2003; El-Basyouny e Sayed, 2009).

Applicazioni del medesimo costruito di analisi sono con buon successo state applicate anche ad ambiti cittadini, investigando anche le relazioni tra incidentalità e area geografica urbana con l'utilizzo di sistemi di georeferenziazione e clusterizzazione delle aree per livelli di rischio (Ng K. S., 2002) (Satria, 2016).

Sulla base delle esperienze maturate, è oggi generalmente riconosciuto che quando la varianza campionaria è significativamente maggiore della media campionaria (sovradisersione), dovrebbero essere preferiti modelli di regressione con funzione Binomiale Negativa al posto dei modelli di regressione di Poisson.

D'altronde, è pure dimostrato che quando la varianza del campione è significativamente inferiore alla media campionaria (sottodispersione), i modelli GLM Gamma sono i più opportuni da utilizzare (Oh et al., 2006).

In corrispondenza dello sviluppo di studi con proposte di funzioni predittive ottenute attraverso il metodo di regressione attraverso GLM, si anima anche il dibattito scientifico sulle vulnerabilità dei modelli e vengono focalizzate le questioni tecnico – statistiche di maggiore rilievo. Una evidente criticità era in effetti emersa in relazione alla sovradisersione dei dati rispetto alla capacità predittiva della forma funzionale ottenuta con le tecniche di regressione. Tale problema di fitting era in genere risolto introducendo, nell'equazione di regressione, una varianza aggiuntiva fittizia finalizzata a riproporzionare il momento della distribuzione della stima rispetto a quello del campione.

Un primo tentativo di specifico inquadramento della questione si deve a Miaou e Lord (2003), che superano l'assunzione del parametro aggiuntivo di dispersione fissa ed esaminano varie relazioni dei parametri di dispersione durante la modellazione di incidenti di intersezioni urbane raccolti a Toronto. Il contributo più importante si deve tuttavia a Mitra e Washington (2006), i quali propongono metodi di correzione più raffinati e, soprattutto, propongono una interpretazione delle motivazioni della sovradisersione dei dati. I due ricercatori, riprendendo il lavoro di Miaou e collaboratori, verificano su vari data set che l'effetto della sovradisersione è strettamente dipendente dal modello di regressione adottato, e in particolare si presenta con caratteristiche di maggiore intensità nei modelli di regressione meno strutturati, sostanzialmente basati sulle sole variabili di esposizione (AADT e L). Quando i modelli sono più strutturati e meno esposti al rischio di variabili rilevanti omesse, la sovradisersione è sostanzialmente funzione della media stimata. Evidenziano quindi che il fenomeno si attenua quando i modelli assorbono anche altre variabili rilevanti e riferibili al flusso di traffico, così evidenziando che il problema della sovradisersione è sostanzialmente riconducibile a difetto di modello, in quanto caratterizzato da variabili rilevanti e omesse. Tale osservazione è particolarmente rilevante in quanto, nuovamente, mette in risalto come l'incidentalità sia l'esito di un processo stocastico poissoniano complesso. Ulteriori indirizzi pratici per la migliore gestione del problema della sovradisersione si devono ad Hauer (2004).

In alternativa all'applicazione dei GLM, a partire dalla metà degli anni 90' si è parallelamente sviluppata l'applicazione di modelli bayesiani per la modellazione delle collisioni di veicoli contro fissi e tra veicoli (Schluter et al., 1997; Tunaru, 2002; Miaou e Lord, 2003; Qin et al., 2005; Miaou e Song, 2005). In alcune ricerche più recenti i modelli bayesiani sono stati strutturati con approccio multistadio (Elvik, 2008; Deublein e coll., 2013).

Questi modelli offrono in genere statistiche regressive di superiore qualità rispetto ai GLM quando sono applicati a basi dati di numerosità ridotta e caratterizzate da valori medi campionari bassi (Lord e Miranda-Moreno, 2008).

Un ulteriore indirizzo di ricerca ha visto, negli ultimi anni, l'utilizzo di reti neurali per la simulazione e la riproduzione del fenomeno incidentale (Mussone et al., 1999), (Abdelwahab e Abdel-Aty, 2002), (Xie, 2007). Va tuttavia evidenziato che tale approccio difficilmente restituisce una interpretabile legge di relazione tra le

variabili generatrici e la variabile dipendente, avendo lo scopo della definizione di un algoritmo previsionale caratterizzato dal miglior adattamento ai dati. I risultati di tali ricerche, quindi, si propongono come difficilmente generalizzabili e le inferenze proposte sono particolarmente vulnerabili alla variazione campionaria (sia con riferimento alla base geografica che all'ampiezza del periodo di osservazione).

Accanto all'applicazione di tecniche quantitative, alcuni ricercatori (per la verità piuttosto isolati) hanno proposto l'utilizzo di tecniche di georeferenziazione degli eventi, applicando quindi modelli di familiarità (*cluster analysis*), ottenendo mappe di rischio incidentale. In questo caso l'analisi è stata orientata a definire aree critiche meritevoli di interventi di ristrutturazione urbanistica e infrastrutturale, tralasciando una analisi minuta dei fattori generativi del fenomeno incidentale (Kwok-suen et al., 2002). In alcuni casi (si veda Fernandes e Neves, 2013) l'approccio cluster è stato utilizzato per discriminare sottogruppi campionari a bassa variabilità interna e massimizzando la variabilità intergruppi, allo scopo di omogeneizzare i campioni sui quali proporre analisi di regressione, discriminando i casi statistici con riferimento alla tipologia di pavimentazione (e quindi all'aderenza disponibile) di varie tratte stradali. Questo approccio è molto interessante perché evidenzia esplicitamente i limiti campionari di cui si discuterà in seguito.

Il problema della generalizzabilità dei costrutti

I risultati proposti da questi studi di estrema raffinatezza statistica sono in genere caratterizzati da precisione e accuratezza molto spinte con riferimento alla base dati di analisi; d'altronde il confronto fra i risultati ottenuti dai vari modelli proposti (anche nel caso di dati ricavati da sistemi analoghi) evidenzia differenze rilevanti. Il tema è emerso compiutamente al moltiplicarsi degli studi, e ha portato alla necessità di una riflessione sulla qualità e fungibilità delle previsioni ottenibili dall'applicazione dei costrutti regressivi.

La motivazione principale di questa estrema accuratezza di stima interna e della spiccata variabilità tra i risultati proposti dai vari studi è imputabile all'estrema variabilità nella definizione dei dati in analisi (disomogeneità campionaria per diversa qualificazione degli incidenti) e alla – ragionevolmente ipotizzabile – carenza di completezza della maggior parte delle base dati (incompletezza campionaria) costituite, nella quasi totalità dei casi, da collezioni registrate da soggetti con competenza variabile sul fenomeno dell'incidente (gestori delle reti – ad accesso libero o controllato, enti di sorveglianza, organismi di controllo, istituzioni del soccorso...) i quali, in generale, hanno accesso solamente a quota parte della casistica incidentale.

In ragione dei vizi originari della base campionaria, in gran parte ineliminabili, sarebbe auspicabile che gli studi evidenziassero con maggiore dettaglio la fase di trattamento preliminare dei dati (e i limiti di completezza e affidabilità del campione) e rappresentassero nel dettaglio i criteri di coerenza interna della base dati utilizzata. Si veda sul tema, ad esempio, il contributo di Commandeur e coll. (2013), che evidenzia come le diffuse carenze di trattamento statistico preliminare delle serie storiche incidentali determinino effetti di sovrastima o sottostima sistematica degli stessi tassi incidentali annuali, e quindi inficino ogni valutazione statistica più raffinata ottenibili dalle analisi di regressione.

Una ulteriore motivazione che ha l'effetto di impedire la generalizzazione dei risultati ottenibili dall'elaborazione di una base dati specifica è costituita dal fatto che la variabilità del fenomeno dipende anche dal ruolo giocato da variabili esogene rispetto al sistema strada – veicoli, come quelle riferibili al complesso di determinanti socioculturali. L'interessante lavoro di Page (2000), ha proposto infatti l'applicazione di un modello di regressione multipla con tipicamente approccio epidemiologico, verificando la relazione tra la variabile dipendente tasso di mortalità incidentale e sette variabili esogene. Le conclusioni dello studio evidenziano infatti una relazione tra profilo demografico della popolazione, parco veicolare disponibile e variabili economiche, postulando quindi una dipendenza cross-culturale, il cui effetto rilevante è trascurato nei modelli di regressione costruiti sulle sole variabili endogene.

Una evidenza del ruolo, niente affatto banale, giocato dalle variabili omesse è evidente grazie al lavoro di Yau e coll. (2006) nel quale si evidenzia come le relazioni tra occorrenze e conseguenze incidentali da un lato, e variabili endogene dall'altro, siano più forti nel campione incidentale costituito da collisioni (e in generale interazioni) tra veicoli rispetto al campione complessivo che comprende anche incidenti a veicoli isolati. Il lavoro di Yau dimostra quindi che la variabilità residua dovuta a fattori esogeni è molto più elevata nel caso di incidenti a veicoli isolati che nel campione relativo a incidenti multiveicolari e che quindi una analisi che non discrimini tale differenza non può che essere caratterizzata da un livello di varianza residua più elevato.

Una interessante overview su questo carattere si deve già a Hirst e coll. (2004), che evidenzia l'esistenza di *"effetti confondenti riconoscibili nei modelli utilizzati per la valutazione della sicurezza stradale"*, e, considerando la spiccata differenza tra le modalità generative di varie tipologie incidenti, propone di procedere a valutazioni differenziate, escludendo l'opportunità di utilizzare campioni spuri.

La gestione della (relativamente elevata) varianza residua - non spiegata - ottenuta dall'applicazione di tecniche regressive a campioni generalmente disomogenei (e quindi con il vizio originario di una carenza di modellazione concettuale a monte) è spesso risolta con l'adozione di metodi statistici più raffinati (Hauer, 2001).

Con un approccio più modellistico, Mitra (2007) ha inoltre evidenziato, attraverso una metaricerca sui modelli di regressione proposti da altri autori, una sistematica classificazione delle implementazioni di modello statistico per la gestione delle variabili omesse, riconoscendo l'elevata complessità della genesi del fenomeno sia con riferimento alle variabili esogene che a quelle endogene.

In ragione di questo limite (non considerato dalla maggior parte dei lavori), l'accuratezza di stima di un modello di analisi multivariata, che normalmente è più spiccata al crescere della base campionaria, dovrebbe essere gestita con cautela soprattutto nei casi in cui la rete di riferimento è composita, territorialmente ampia e quindi anche culturalmente disomogenea.

Una prima rilevante voce critica contro la tendenza all'uso di modelli eccessivamente complessi, nel tentativo di recupero della semplicità modellistica, si trova nel lavoro di Xie e coll. (2007). Sullo stesso tema è utile ricordare il contributo di Wang, Quddus e Ison (2013) nel quale si evidenzia la necessità di strutturare l'analisi con approccio multistadio (in analogia alla proposta fatta anche da Fernandes e Neves, 2013), suddividendo il campione per gravità delle conseguenze. In questo contributo si evidenzia infatti come il ruolo predittivo giocato dal complesso di variabili endogene ed esogene è evidentemente diverso per le varie tipologie incidentali, e che quindi la possibilità di ottenere una regressione affidabile è condizionata alla realizzazione di campioni omogenei.

Il lavoro di Yau del 2004 aveva già chiaramente evidenziato come la casistica incidentale potesse essere trattata con dettaglio spinto solo operando su campioni stratificati ad elevata omogeneità interna, sostanzialmente verificando l'opportunità di studi specifici sulla genesi incidentale e proponendo una solida alternativa alla corsa verso un modello olistico. Nel suo studio, infatti, Yau riconosce, per 3 tipologie incidentali diverse (che costituiscono una partizione dell'80% del campione incidentale disponibile), 3 modelli generativi distinti, ciascuno costituito da variabili generative esogene ed endogene solo in parte condivise, dimostrando implicitamente che una modellazione regressiva olistica avrebbe dovuto considerare effetti rilevanti da almeno 16 variabili (riconducibili a zona dell'incidente, età e sesso del conducente, momento del sinistro – sostanzialmente in relazione all'effetto combinato del traffico e delle condizioni psicofisiche dei conducenti, condizione di illuminazione, condizione della strada, età del veicolo).

3.3 Un contributo indirizzato alla generalizzabilità dei costrutti predittivi: gli *Accident Prediction Models*

Gli APM (*Accident Prediction Models*) sono in genere costituiti da strutture algebriche più o meno complesse nelle quali un set di variabili indipendenti (generatrici o condizionanti l'incidentalità) determina una stima del numero o del tasso incidentale di interesse, in genere qualificato in termini di tipologia di incidente e/o di gravità delle conseguenze.

La fonte di principale interesse per avere una larga panoramica dello stato dell'arte in materia è costituita dal manuale AASHTO del 2010 (Aashto, 2010).

Gli APM possono essere sviluppati come un'unica equazione regressiva (*Safety Performance Function*, SPF) sostanzialmente riconducibile ad una costante di pericolosità specifica moltiplicata per le variabili di esposizione corretti con funzioni esponenziali, o come combinazione tra un SPF di base sviluppato per una configurazione stradale standard e un insieme di fattori modificativi denominati CMF, *Crash Modification Factor*, che consentono di regolare la previsione per tenere conto di caratteristiche locali specifiche. I CMF corrispondono, quindi, al contributo di varianza spiegata dal singolo fattore esaminato nel complesso del modello stocastico previsionale. Definiti i CMF risultano individuati i CRF, *Crash Reduction Factor*, complemento ad 1 del CMF corrispondente, che definiscono l'effetto specifico di una misura di prevenzione incidentale sul valore atteso in assenza della sua adozione.

È ormai evidente in letteratura che i CMF (e cioè l'incidenza dei fattori generativi dell'incidentalità nel complesso del modello previsionale adottato) non possono essere assunti identici per ambiti di studio diversi, sia con riferimento alle tipologie di strade, che alla topologia, che ai vari Paesi.

È, tuttavia, egualmente condiviso che evidenze statistiche ottenute da valutazioni locali e sufficientemente validate in approcci analoghi e studi condotti in diversi ambiti, possono consentire generalizzazioni parziali, sotto la condizione di introdurre fattori correttivi di aggiustamento.

Tipicamente gli APM proposti dall'Aashto sono strutturati in *Base Safety Performance Functions* (BSPF) specifici per tipologie di strada; i BSPF propongono stime di prima approssimazione e legano il tasso di incidente (variabile dipendente) con poche caratteristiche strutturali o di traffico, attraverso relazioni statistiche - in genere di regressione multipla - calibrate su base dati specifica. Il set di variabili indipendenti è in genere poco numeroso, e costituito essenzialmente dalla misura di traffico (AADT, *Average Annual Daily Traffic*) e dalla lunghezza delle tratte. Tali variabili sono, in effetti, generalmente utilizzate per la normalizzazione delle occorrenze incidentali, e il loro prodotto costituisce il principale fattore di esposizione all'incidentalità nella gestione statistica degli eventi di incidente.

La stima ottenuta attraverso l'applicazione dell'opportuna BSPF alla tratta oggetto di indagine è suscettibile di essere corretta attraverso l'applicazione di CMFs, che introducono correttivi (riduttivi o amplificativi) del valore di prima approssimazione con riferimento a specifiche strutturali o gestionali presenti nella tratta di indagine. Il valore dei CMFs è ottenuto attraverso la stima dell'*Odds Ratio* ottenuta dall'applicazione della singola misura (quindi considerando, in genere, effetti isolati) a casi studio disponibili in letteratura (cfr <http://www.cmfclearinghouse.org/results.cfm>). Attualmente i CMFs censiti (costituiti da quelli citati nel manuale AASHTO del 2010 e da quelli successivamente proposti) ammontano a oltre 7000, specializzati per tipologie di strade, tipologia delle misure di prevenzione, livello di affidabilità della stima proposta. Sono inoltre disponibili metodi empirici di stima dell'effetto complessivo conseguente alla contemporanea adozione di più misure gestionali.

Per i segmenti autostradali la funzione SPF di base proposta dall'Aashto ha la forma:

$$N_{spf} = (0,001 \times AADT)^b \times (L) \times e^{(a)}$$

dove a e b sono una funzione del tipo di incidente (incidente a veicolo isolato o incidente tra veicoli) e la gravità delle conseguenze (incidente mortale e/o feriti, incidenti con soli danni materiali).

Si evidenzia che nel caso autostradale la funzione predittiva introduce un fattore esponenziale sulla misura del flusso di traffico, restituendo un modello nonlineare con la misura del traffico medio.

La promettente capacità di adattamento di questo tipo di modelli ai dati disponibili non dovrebbe portare tuttavia alla sottovalutazione delle vulnerabilità intrinseche alle stime proposte con approccio Odds Ratio (Hirst, 2004). Il problema della regressione verso la media è quello, intrinseco, di maggiore evidenza (Hauer, *Observational before-after studies in road safety*, 1997). L'entità dell'effetto è variabile ma nei casi, peraltro frequenti, di adozione delle misure in tratte ad incidentalità critica, si sono verificati effetti di regressione alla media dell'ordine del 20-30% (Mountain, 1998).

Ma le vulnerabilità sono anche modellistiche e non soltanto legate all'incertezza statistica. A questo proposito è importante focalizzare che l'ipotesi forte sottostante all'approccio, e cioè che l'unico motivo di variazione dell'incidentalità sia costituito proprio dalla modifica introdotta, è in generale non verificato. A questo proposito è importante evidenziare che alcune modifiche, e in particolare quelle riconducibili alla gestione della velocità massima di percorrenza di una tratta, determinano un adattamento del traffico e alternative di tragitto (Webster, 1996). In tale ottica, interventi puntuali possono determinare, come dimostrato in alcuni casi, effetti perversi su più vasta scala con complessivo incremento dell'incidentalità dell'area (McCarthy, 2001). Ulteriori debolezze dell'ipotesi sono legate all'incidenza degli altri fattori, contestuali e concausali, dell'incidentalità, tra i quali si ricorda l'effetto di trend generale di miglioramento costruttivo dei veicoli, l'incidenza di campagne di sensibilizzazione di guida sicura o similari.

Al fine di contenere i difetti di stima, Hauer (1997) consiglia quindi di effettuare verifiche pre - post associate ad analisi su campioni di controllo, in modo da contenere le descritte vulnerabilità riconducibili agli effetti statistici e modellistici.

Importanti filoni di ricerca corrente sono indirizzati alla individuazione di migliori metodi di taratura che consentano il miglior adattamento degli APM AASHTO ad ambiti applicativi diversi dall'ambiente americano (Martinelli F, 2009) (la Torre et al, 2014, 2016, 2019).

Diversi ricercatori italiani hanno proposto APM per varie tipologie stradali, differenziato per livelli di gravità incidentale, sulla base dati dei gestori e utilizzando GLM con struttura dell'errore binomiale negativa. Caliendo ha sviluppato tale approccio per la previsione del numero di incidenti in tratte autostradali applicando in particolare un test di verifica della verosimiglianza del risultato ottenuto, verificando il fitting tra quanto previsto e quanto misurato sulle categorie di intensità del traffico delle varie tratte (Caliendo C, 2007). Dal punto di vista modellistico, il lavoro di Caliendo merita una attenzione specifica, avendo proposto un modello previsionale degli incidenti autostradali sulla base di un *data set* piuttosto ampio, ed ottenuto significative correlazioni tra incidenti e alcune caratteristiche geometriche la cui rilevanza è tanto dibattuta quanto poco verificata (come il raggio di curvatura, ad esempio). Caliendo ha inoltre applicato un analogo modello di regressione a incidenti avvenuti in galleria, riconoscendo la rilevanza delle variabili di esposizione (lunghezza e traffico), oltre al numero di corsie e alla composizione del traffico per categoria (la percentuale di mezzi pesanti, in particolare) (Caliendo C. &, 2014).

Altri (Cafiso S, 2010) hanno applicato il modello a data set di incidenti su strade a due corsie. Lo studio di Cafiso ha proposto un APM base, utile alla prequalificazione della pericolosità della rete, nel quale la stima dell'incidentalità è determinata unicamente dalle variabili di esposizione (lunghezza della tratta e traffico), e ulteriori APM di migliore raffinatezza statistica, con l'applicazione di variabili geometriche e di contesto, il cui uso è raccomandato solo ove la qualificazione della pericolosità della strada sia supportata da dati dettagliati, affidabili e protratti nel tempo.

3.4 L'incidentalità stradale nelle gallerie

Le analisi relative all'incidentalità in galleria stradale riconducibile ad ordinari incidenti – e cioè con l'esclusione degli incendi – che sono state condotte negli ultimi anni hanno evidenziato alcune specifiche caratteristiche del fenomeno incidentale nelle tratte sotterranee. La guida nei tunnel è infatti condizionata da fattori psicologici e sensoriali, e comporta una modificazione rilevante della strategia di guida rispetto alle tratte a cielo aperto, sia per effetto della sensazione di confinamento che per visione condizionata dalle pareti (Caliendo, 2013). Ciò detto, ai fini dell'inquadramento comparativo del fenomeno, l'incidentalità stradale in galleria può, con l'esclusione degli incendi, essere oggetto di studio con strumenti analoghi a quelli visti applicati per i *dataset* delle generiche tratte.

Il report Road Safety in Tunnel del PIAC (1995) evidenzia che i tunnel sono in generale più sicuri delle tratte a cielo aperto al netto di effetti anomali di allineamento verticale o orizzontale; il Piarc indicava, inoltre, una media di incidentalità severa per tunnel monodirezionali e bidirezionali pari a 8 e 10 eventi per 10^8 veicolikm.

Il confronto con l'incidentalità stradale, e specialmente delle tratte contigue ai tunnel, ha in genere evidenziato che l'ambiente galleria determina un effetto di riduzione del tasso incidentale nel confronto col tasso di incidente generico nelle tratte esterne (Lemke, 2000, Mashimo, 2002, Amundsen e Engebretsen, 2009).

A conclusioni diverse è peraltro giunto il rapporto SAFESTAR (2002), nel quale è verificato che il tasso incidentale di gallerie unidirezionali è talvolta superiore e talvolta inferiore a quello delle tratte a cielo aperto in adiacenza, concludendo che non è possibile sostenere in generale che alle gallerie sia associato un effetto riduttivo dell'incidentalità delle tratte a cielo aperto.

Tale effetto sembra, tuttavia, specificamente riferito alla componente degli incidenti lievi, essendo risultato, seppure in misura varia, che la gravità media degli incidenti stradali in galleria è significativamente maggiore rispetto a quelli generici sul resto delle tratte (Mashimo, 2002; Caliendo e De Guglielmo, 2017; Santos-Reyes and Beard, 2017).

In particolare, Caliendo, sulla base di analisi condotte nel 2012, calcola un tasso di incidenti totali pari a 0.25×10^{-6} veicolikm, e un tasso di incidenti gravi pari a 0.12×10^{-6} veicolikm. Sulla quota degli incidenti gravi la generalità della rete per periodi omologhi presenta invece un valore pari a 0.09×10^{-6} veicolikm. Ne deriverebbe quindi un tasso di incidenti gravi in galleria più elevato di circa il 38% rispetto alla stessa tipologia di incidenti a cielo aperto. Lemke (2000) seppure sulla base di un *dataset* meno ricco, aveva in effetti proposto analoghe considerazioni.

L'effetto congiunto di tali tendenze porta all'autocompensazione, ed è discusso se, con riferimento alla categoria degli incidenti più gravi, la galleria sia un ambiente caratterizzato da maggiore o minore sicurezza rispetto alla generalità della tratta. I dati proposti da Caliendo qualificherebbero le gallerie come ambienti a probabilità accresciuta di incidenti gravi rispetto al resto della rete, coerentemente a quanto verificato nel Rapporto SWOV del 2009.

Tali considerazioni si pongono in antitesi a valutazioni ufficiali e correnti, proposte, ad esempio, nelle Relazioni periodiche della Commissione Permanente delle Gallerie presso il CSLPP al Parlamento (2012, 2013, 2018).

In questo quadro, un contributo importante alla verifica della gravità degli incidenti in galleria si deve ad uno studio condotto sulle gallerie di rete autostradale italiana, nella quale, con riferimento agli anni 2006-2009, è stato verificato che il tasso incidentale degli incidenti gravi (frequenza incidentale su periodo annuale) e il

livello di danno medio associato al singolo evento incidentale grave sono entrambi maggiori in galleria rispetto ai corrispondenti indicatori calcolati nel resto della rete (Caliendo, 2012).

Un contributo alla migliore interpretazione del fenomeno può essere individuato nell'evidenza che le zone a maggior probabilità di incidente nella galleria sono costituite dalle zone di ingresso (Nævestad e Meyer, 2012); in particolare (Sun et al, 2019), il tasso di incidente nelle zone di transizione è tra 3 e 4 volte più alto, e in questa zona l'incidentalità incrementale è riferita in particolare, come ragionevole, ad incidenti tra veicoli. La causa è da ricercarsi nell'effetto "buco nero" come suggerito, per induzione, già da Rinalducci nel 1979, con l'effetto di modifica di velocità e traiettoria (Amundsen,1994; Sagberg et al., 1999, Caliendo, 2013, PIARC 2008); Questo effetto determina una incidenza più elevata, rispetto a quanto non avviene a cielo aperto, dei tamponamenti tra veicoli marcianti nella stessa direzione, determinati da frenatura in ingresso di alcuni utenti per effetto buco nero (Amundsen e Raner, 2000).

Nel Rapporto PIARC 249 05.16.B del 2006 è proposta una stima del tasso di incidente (su milioni di veicolikm) per le tratte comprese tra 50 metri prima dell'imbocco e fino all'uscita. Il PIARC propone in particolare i valori riportati nella seguente tabella.

Zona	Lunghezza zona	Tasso d'incidente [mln di veicoliKm]
Zona 1	Da 50 metri prima all'imbocco	30
Zona 2	Primi 50 metri della galleria	23
Zona 3	Ulteriori 100 metri della galleria	16
Zona 4	Ulteriore tratta in galleria e fino all'uscita	10

Tabella 21: tasso d'incidente nelle diverse zone delle gallerie [Rapporto PIARC 249 05.16.B]

L'effetto di accresciuta probabilità incidentale nelle zone singolari del tunnel (e specificamente agli imbocchi) potrebbe essere alla base dell'osservazione proposta da Amudsen e Raner (2000), Salvisberg (2004) e Nussbaumer (2007), i quali evidenziano una controintuitiva correlazione negativa tra incidentalità e lunghezza del tunnel.

Secondo Amudsen e Raner (2000) l'incidentalità sarebbe inoltre correlata negativamente a TGM (fatto, anche questo, controintuitivo) e alla larghezza del tunnel.

Le zone del tunnel sembrano inoltre essere associate in modo diverso anche in relazione alla gravità degli incidenti (Amundsen ed Engebretsen, 2009), e il rischio relativo al singolo evento è massimo nella parte centrale del tunnel (Amundsen e Raner, 2000).

Nel complesso gioco di relazioni tra i fenomeni descritti, alcune osservazioni proposte dai ricercatori meritano una citazione, seppure non sostanziate da evidenze statistiche. In particolare, considerata la condizione singolare agli imbocchi, sembra, per logica interna, assolutamente condivisibile l'osservazione di Caliendo (2013) secondo il quale la pendenza del tracciato in galleria dovrebbe comportare un incremento proporzionale dell'incidentalità, visto che i mezzi pesanti tendono ad accodarsi in salita e a determinare vincoli di traiettoria maggiori sui veicoli leggeri.

Nel quadro più ampio del modello di regressione proposto, con riferimento all'incidentalità in galleria con l'esclusione degli incendi, Caliendo e coll. (2013) propongono una funzione predittiva ottenuta dall'applicazione di un modello di regressione con funzione Binomiale Negativa, nella quale intervengono, con coefficienti differenziati in ragione del livello di gravità degli incidenti, oltre alle variabili di esposizione, anche la percentuale di mezzi pesanti e il numero di corsie. Lo studio ha inoltre evidenziato una rilevante dipendenza della stima dal tempo, essendo l'incidentalità (registrata su 4 anni) caratterizzata da un pronunciato trend (in riduzione). Lo studio evidenzia, in analogia a quanto verificato nella generalità degli studi sviluppati sulla rete in genere, che la correlazione positiva tra numero di corsie e incidentalità potrebbe

essere dovuto all'aumento della possibilità di cambio traiettoria offerta ai guidatori in caso di aumento delle corsie, essendo le interferenze tra le traiettorie veicolari uno dei precursori rilevanti dell'incidentalità. Circa la relazione tra lunghezza e incidentalità, il modello proposto da Caliendo evidenzia una correlazione positiva, opposta quindi a quella controintuitiva precedentemente formulata da Amudsen e Raner (2000).

In analogia a ciò, e ancora in opposizione alle osservazioni di Amudsen e Raner (2000), nel modello predittivo proposto da Caliendo gli incidenti sono positivamente correlati al TGM per corsia; tuttavia lo studio evidenzia l'esistenza di una relazione non lineare tra valori bassi, medi ed elevati di TGM, rendendo opportuna l'introduzione di coefficienti modificativi per i range 0-5000, 5000-13000 e oltre 13000 (TGM per corsia). Questa evidenza è d'altronde coerente alle risalenti osservazioni di Ceder (1982) proposte per analisi sulla generalità della rete.

Ulteriori evidenze, in particolare in relazione all'incidenza della quota di traffico pesante sull'incidentalità, sono proposte da Salvisberg et al (2004), i quali indicano in merito una correlazione positiva; Caliendo (2013) ottiene analoghe evidenze.

In analogia a quanto verificato in altri studi nelle tratte a cielo aperto, e a maggior ragione in questo caso, è evidente l'influenza dell'illuminazione e, nel caso dei tunnel, della finitura delle pareti del tunnel sul confort di guida, e quindi, ragionevolmente, sull'incidentalità (Kircher et al., 2012, Domenichini et al., 2017).

Una ultima osservazione di Caliendo (2013) si riferisce alla relazione tra incidentalità e tempo: nello studio è infatti verificata una tendenza alla diminuzione del tasso di incidentalità negli anni; tale effetto potrebbe essere dovuto a misure di prevenzione normative (patente a punti, introdotta in Italia nel 2003) o tecniche (introduzione dei sistemi Tutor). Ulteriori fonti (Relazioni al Parlamento della Commissione Permanente per le Gallerie presso il CSLPP) evidenziano tuttavia che il tasso incidentale in galleria è diminuito più che proporzionalmente rispetto ai corrispondenti incidenti nella generalità della rete autostradale, lasciando aperta l'ipotesi che i primi lavori realizzati introdotti a seguito del piano di adeguamenti ex D. Lgs. 264/2006 abbiano significativamente incrementato la sicurezza dei tunnel compresi nel campione di studio.

3.5 Gli incendi in galleria

Con riferimento alla ricerca sulla genesi dell'incidentalità stradale non tipica, e agli incendi ai veicoli in particolare, la ricerca si è prevalentemente focalizzata in analisi di tipo statistico – descrittivo del fenomeno, proponendo in alcuni casi tassi di incendio calcolati e riferiti ai tassi di incidentalità ordinaria.

L'incendio in galleria può essere ripartito nelle categorie di incendi originari, determinati dall'innesco a seguito di guasto al veicolo, e incendi secondari, in quanto conseguenti ad incidenti stradali ordinari, con innesco determinato, in tempi successivi rispetto al crash, dalla chiusura del triangolo del fuoco per effetto del materiale combustibile o infiammabile disperso e delle fonti di calore disponibili.

Circa la proporzione tra le due tipologie di incendi, nel rapporto PIARC del Comitato Tecnico sui tunnel stradali presentato a Sidney nel 1983 si evidenziava che *“gli incendi sono causati solitamente da guasti meccanici o elettrici dei veicoli, meno frequentemente da incidenti (anche perché gli incidenti in galleria sono meno frequenti degli incidenti delle tratte a cielo aperto); raramente, da malfunzionamenti di impianti di galleria.”*

Nel rapporto PIARC del 1995 Road Safety in Tunnels è riportata la casistica di incidentalità del tunnel Elb relativa a 16 anni di osservazioni: solamente in 1 caso su 63 si è verificato un incendio a seguito di incidente ordinario (con una incidenza quindi del 1.56%). Nel Rapporto PIARC del Comitato Tecnico sui tunnel stradali al Congresso di Montreal del 1995 si dichiara che *“quasi tutti gli incendi sono dovuti a guasti a singoli veicoli e non sono la conseguenza di un incidente”*.

Stante la predominanza statistica degli incendi originari su quelli secondari, il fenomeno, complessivamente considerato, può essere considerato speciale rispetto all'inquadramento proposto per il fenomeno dell'incidentalità generica nei tunnel. Nell'attesa, infatti, di rilevare evidenza statistica, per logica interna è atteso che il fenomeno dell'incendio originario al veicolo presenti genesi nelle caratteristiche del veicolo stesso.

La frequenza attesa degli eventi dovrebbe essere quindi, per logica interna, positivamente correlata in via principale alle sole variabili di esposizione (AADT, o TGM, e lunghezza della tratta), mentre dovrebbe risultare marginale e non significativo l'impatto delle caratteristiche del sistema complesso nei termini esposti per le trattazioni precedenti sul tasso di incendio.

Circa la pericolosità degli effetti, è consolidata l'evidenza che gli incendi in galleria presentano pericolosità elevata (Piarç, 2008; Mashimo, 2002, Caliendo, 2013); l'esempio tipicamente citato è quello dei tre incendi catastrofici del 1999-2005 (62 vittime a seguito degli eventi che hanno riguardato il Monte Bianco, il Tauri e il Gottardo); è altrettanto evidente che alla gravità dei danni verso le persone esposte si accompagnano i danni economici per effetto del calore sulle strutture e lunghe interruzioni della funzione per effetto dei lavori di ripristino / adeguamento necessari (Haak, 2001, Li & Chow 2003, Mashimo, 2002, Amundsen e Engebretsen, 2009).

Al fine di un primo inquadramento del fenomeno, si propongono di seguito le principali evidenze statistiche ricavate dalla letteratura sul tema.

3.5.1 Proporzione tra incendi originari e incendi determinati da incidenti

Il rapporto FIT del 2001 riporta che, su un campione di 29 incendi occorsi in galleria, 18 (pari al 62% del totale) erano stati innescati da malfunzionamenti e guasti verificati sul veicolo (il dato è riferito a gallerie monodirezionali e bidirezionali, e riporta la sola quota a causa definita).

In uno studio norvegese del 2001 (Amundsen et al, 2001) il 10% degli incendi risultava determinato ad esito di incidenti, mentre in un analogo survey austriaca (Rattei et al., 2014) si evidenzia una quota del 9% di inneschi da incidente. Secondo studio cinese (Hao Sun et al, 2012) la quota di incendi sul totale degli incidenti è circa l'1%.

Nel rapporto FIT conclusivo (2003) si dichiara inoltre che "Fino a circa il 95% di tutti gli incendi sono causati da difetti elettrici e meccanici dei veicoli, quali difetti elettrici, surriscaldamento del motore, surriscaldamento dei freni", e solo la parte residua può ricondursi ad incidentalità non originaria.

Il manuale sulla sicurezza delle gallerie del PIARC (2006) riporta una raccolta di 33 gravi eventi di incendio in galleria. La composizione per cause degli incendi vede 16 casi occorsi a seguito di incidenti ordinari, 14 per malfunzionamento o guasto ad apparati del veicolo e 3 casi determinati da causa sconosciuta. Il campione, come nel rapporto FIT del 2001 è selezionata su incendi ad elevata letalità.

Il rapporto NFPA U.S. Vehicle fire trends and patterns (2006) raccoglie probabilmente la più larga casistica di incendi registrati. Premettendo che la casistica si riferisce al parco veicoli e non ai veicoli circolanti, il rapporto dichiara 306.800 casi di incendio a veicoli relativi agli anni 2002 – 2005. Tra questi, solo il 3% è risultato essersi sviluppato in conseguenza di un altro incidente. È d'altronde evidente dalle statistiche sulla gravità delle conseguenze che gli incendi non originari determinano, tuttavia, più della metà del totale (57%) delle vittime complessive; e in ciò trovando motivazione la statistica PIARC 2006 precedentemente citata.

The Handbook of Tunnel Fire Safety (Beard e Carvel, 2012) riporta una casistica di grandi incendi piuttosto limitata. In tale campione di incendi, che 55 eventi su 61 (pari al 90% circa del totale) stati determinati da incidenti stradali con ulteriore evoluzione in incendio.

La quota parte di incendi originari sul totale degli incendi è quindi molto variabile in bibliografia, e dipende essenzialmente dal fatto che gli incendi secondari (conseguenti ad incidente tipico) sono più facilmente registrati che non gli inneschi di incendio per cause elettriche – meccaniche, e che spesso gli incendi non hanno esiti rilevanti; i campioni analizzati presentano quindi, anche in questo caso, il bias di fondo di un criterio di cut-off sulla scala della gravità non costante.

3.5.2 Stima del tasso di incendio per tipologia veicolo

Circa la dimensione quantitativa della frequenza del fenomeno, Nævestad e Meyer (2014) propongono una stima ricavata da una survey sulle gallerie norvegesi (2008-2011) che vede una incidenza complessiva di 21.25 eventi anno per 1000 gallerie, con 12.5 eventi di questi riferibili a incendi senza fiamme; Haak (2002) propone invece una survey sugli eventi occorsi in 10 anni nelle gallerie tedesche, e individua un tasso di incendio pari a 2 incendi ogni 100 mln di veicoli km; Rattei e coll. (2014) ricavano invece dal campione di tunnel austriaci un tasso pari a $3.5/10^9$ veicoliKm per leggeri, $23.4/10^9$ veicoliKm per pesanti, con un fattore amplificativo di 6.7 volte legato alla componente pesante.

La maggiore incidenza del fenomeno sulla componente pesante sembra d'altronde confermata anche dalle rilevazioni effettuate sugli incendi nel tunnel del Gottardo verificatisi in 7 anni (1992-1998), e che ha visto 42 incendi complessivi, con 7 casi di incendi a bus, 14 a mezzi pesanti e 21 ad autovetture. L'incidenza risulta quindi più elevata per mezzi pesanti e bus, con un valore medio del tasso pari a $4/10^6$ veicoliKm, e valori parziali per la componente pesante pari a $6/10^6$ veicoliKm e per la componente leggera pari a $1.5/10^6$ veicoliKm.

La maggiore incidenza del fenomeno sulla componente pesante potrebbe essere determinata dalla pendenza longitudinale dei tunnel, per effetto di surriscaldamento dei freni (nella corsia / carreggiata in discesa) o del motore (in quella in salita) (Brannvesen, 2011); a sostegno di tale ipotesi è l'evidenza che i veicoli pesanti sono sovrarappresentati negli incendi nelle gallerie con alto gradiente, con differenza statistica significativa rispetto alle gallerie norvegesi con pendenza compresa entro il 5%.

Tali statistiche sono in genere non direttamente confrontabili, in quanto, ancora più frequentemente di quanto non accada nelle raccolte dati di eventi di incidentalità ordinaria, per gli incendi è totalmente assente un criterio di classificazione consolidato per stratificare il fenomeno su livelli di gravità coerenti. I diversi valori proposti sono quindi sostanzialmente riconducibili al diverso taglio campionario sulla scala della gravità (o, se si vuole, ad una diversa quota di cut-off individuata sulla piramide di Heinrich che descrive il fenomeno).

3.5.3 Cause di incendio

Circa le cause degli eventi, la ricerca internazionale indica che le cause più comuni degli incendi nelle gallerie stradali dei veicoli sono difetti meccanici o elettrici (PIARC, 2008: 61); secondo Nævestad e Meyer (2014), pur con scarsità di dati, emerge che le cause degli incendi nelle gallerie stradali che coinvolgono veicoli pesanti e leggeri sono diverse rispetto alle cause scatenanti gli eventi a mezzi pesanti. Questa osservazione suggerisce che per prevenire il rischio e minimizzare le conseguenze incendi stradali in galleria dovrebbero essere adottate misure diverse per veicoli leggeri e pesanti. Nel primo caso, in particolare, le misure dovrebbero essere dirette ad evitare errori e incidenti singoli, mentre per i mezzi pesanti le misure dovrebbero concentrarsi sull'incremento dell'affidabilità tecnica dei veicoli (evidentemente in relazione al fatto che gli incendi più frequentemente sono determinati da guasti tecnici).

Avendo radice causale nell'affidabilità del parco veicolare, la frequenza degli incendi è marcatamente più elevata nelle strutture con componenti di traffico in uso caratterizzate da età media più elevata e origine del mezzo in Paesi dell'Est Europa (Rapporto OECD, 2006).

3.5.4 Proporzione tra incendi secondari ed incidenti gravi

Un contributo alla proporzione del fenomeno rispetto all'incidentalità tipica viene dal rapporto austriaco (Rattei e coll. 2014), nel quale il rapporto tra incendi secondari e incidenti ad elevato impatto (con ciò intendendo solo quelli che hanno determinato almeno 1 vittima) risulterebbe pari a 0.96% per veicoli leggeri, e 0.41 per veicoli pesanti.

3.5.5 Misura del danno

Nævestad e Meyer (2014), sulla base delle osservazioni protratte per 4 anni per 1000 gallerie, evidenziano che gli incendi in galleria nella maggior parte dei casi non producono danno a persone. Nel campione norvegese il 3.7% degli incendi ha causato morti – attribuibili tuttavia all'incidente stradale precedente o conseguente all'incendio e non a danni diretti dovuti al fuoco - e un ulteriore 2.2% ha causato lesioni gravi a persone; il 4.4% degli incendi ha causato danni alla galleria. Gli incendi in questione hanno determinato la chiusura del tunnel nell'80% dei casi, e in particolare: 1-60 minuti nel 43% dei casi; 61-105 minuti nel 15%; più di 105 minuti nel 22%.

3.5.6 Collocazione spaziale degli eventi nel tunnel

Sulla base di analisi di collocazione dello studio norvegese (Nævestad e Meyer, 2014), la collocazione degli incendi è sostanzialmente casuale in galleria (considerando la lunghezza media dei tunnel e la percentuale normalizzata di quanti accaduti in fascia di ingresso o centrale); si verifica inoltre una riduzione della quota nella tratta di uscita, ragionevole in rapporto al comportamento atteso del guidatore.

3.5.7 Collocazione temporale degli eventi nelle fasce orarie della giornata e in periodi dell'anno

Nello studio norvegese già citato oltre il 70% degli incendi si sono verificati tra le ore 06.00 e 18.00, e la maggior parte, (57,8%) si sono verificati in primavera e estate. Tali frequenze di incendi di veicoli nei tunnel durante il giorno e l'anno sembrano corrispondere alla quantità di traffico durante questi periodi. La stessa tendenza è stata verificata in studi sugli incidenti nelle gallerie stradali (Amundsen e Engebretsen, 2009); se ne deduce una assenza di correlazione con fenomeni climatici o temporali, come atteso per logica interna.

3.6 Metodi di previsione finalizzati alla gestione della sicurezza e all'analisi del rischio di uno specifico sito

L'ampia review della letteratura disponibile ha evidenziato come, con riferimento all'incidentalità ordinaria (con ciò intendendo gli incidenti stradali diversi dagli incendi), nonostante i metodi di interpretazione più raffinati (e che quindi sacrificano inevitabilmente la generalizzabilità al miglior fitting) mantengano una spiccata quantità di varianza non spiegata, sono ormai consolidati e validati i metodi di analisi previsionale basati su GLM, con l'adozione preferenziale di metodi specifici in ragione della scarsità di dati, sovradisersione o sottodisersione della distribuzione della variabile stimata e/o di quella campionaria (Elvik, The predictive validity of empirical Bayes estimates of road safety, 2008). Va incidentalmente osservato che, nonostante tali metodi siano consolidati e verificati robusti dalla comunità scientifica, non si evidenzia a tutt'oggi una diffusione proporzionale nella gestione materiale delle infrastrutture da parte dei gestori stradali e nelle tecniche di controllo adottate dai soggetti regolatori (Yannis G. D., 2016).

Assunto quindi che appare certamente preferibile riferirsi a tali modelli per la stima della componente incidentale costituita dagli incidenti diversi dall'incendio, l'adozione di opportune strategie previsionali per la qualificazione della frequenza attesa degli incendi richiede una riflessione dedicata, necessaria, in particolare, per lo studio del profilo di rischio (e quindi del livello di sicurezza) delle gallerie stradali.

In relazione a tale tipologia di fenomeno incidentale, va preliminarmente osservato che l'adozione di metodi regressivi complessi richiede una elevata qualità dei dati in ingresso, sia con riferimento alla metrica di classificazione per tipologia incidentale, sia con riferimento alla completezza dei dati raccolti nel periodo di osservazione.

Il problema si pone inoltre ove si consideri che, ai fini dell'analisi di rischio delle gallerie, la stima della frequenza attesa di accadimento degli incendi è riferita a tratte brevi e singolari, con gli effetti di difetti di stima che la scarsità di dati determina inevitabilmente.

Una soluzione applicativa può essere costituita – nella condizione specialissima di una applicazione a tratte ridotte – dall'adozione di un approccio puramente ricognitivo dell'incidentalità effettivamente verificata nel sito (ovviamente condizionata attraverso i principali fattori di esposizione incidentale, costituiti da tempo di osservazione, lunghezza della tratta – supposta omogenea per caratteristiche – e intensità del traffico). Tale approccio, che non richiede la definizione di alcuna ipotesi sulle caratteristiche del processo stocastico generativo del fenomeno, risponde ai presupposti di Vapnik (2006, 2013).

Questa ipotesi costituisce una alternativa all'adozione di qualunque metodo di interpretazione strutturata dei dati raccolti, e si basa quindi sull'assunzione, nell'assenza di migliori indicazioni, che il fenomeno osservato sia il miglior descrittore possibile del fenomeno stocastico del quale l'osservazione è una specifica, particolare realizzazione campionaria.

L'analisi dei dati, condotti con approccio campionario alla Vapnik, può essere favorevolmente condizionata ove si consideri che, per logica interna (cioè per giudizio esperto circa la dinamica generativa del fenomeno) assumono certamente una rilevanza le variabili di esposizione (lunghezza della tratta, volume del traffico, ampiezza del periodo di osservazione), come d'altronde dimostrato anche nelle elaborazioni statistiche generalmente prodotte e confermato nel trattamento statistico delle base dati disponibili e riportate nel corrente lavoro. Nell'elaborazione di una analisi di rischio è infatti tendenzialmente preferibile riferirsi a dati specifici della struttura oggetto d'analisi (PIARC, 2013). La carenza di dati può essere superata con l'adozione di campioni allargati a strutture / tratte simili, selezionate con criterio dell'analogia, in particolare con riferimento ai parametri caratterizzanti verificati rilevanti in bibliografia scientifica. L'analogia può riferirsi anche separatamente ai singoli fenomeni oggetto di studio, essendo verificato che il fenomeno generativo dell'incidente e quello evolutivo successivo sono condizionati da parametri differenti.

In quanto coerente a tale approccio, risulta di grande rilevanza il lavoro di Meng e coll. (2011), specificamente orientato al trattamento statistico dell'incidentalità con lo scopo applicativo della risk analysis. In particolare Meng propone l'esistenza di tratte omogenee di tunnel a incidentalità quasi-costante, che si articolano in singolarità (costituite principalmente dalle zone di transizione agli imbocchi e dalle intersezioni).

Questo approccio consente di riferirsi a una base campionaria ampliata rispetto alla valutazione del solo tunnel oggetto di studio, e con caratteristiche affini, come verificata, ad esempio, da giudizio esperto e sulla base dell'effettiva verifica delle analogie strutturali e funzionali ipotizzate. L'approccio è inoltre sostanzialmente coerente alla modalità di analisi dei dati proposta dalla Linea Guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali di cui al Decreto Ministeriale 2/5/2012.

Tale approccio propone inoltre, in sostanza, una applicazione al caso di studio di tecniche di analisi dei dati e del rischio che sono consolidate in altri settori del comparto trasporti, come in quello ferroviario, laddove è generalmente previsto che la valutazione di sicurezza è proposta con analisi specifiche e, ove si sia carenti di

rappresentatività dei dati, procedendo ad integrate analisi in sistemi analoghi (cfr Direttiva sulla Sicurezza delle Ferrovie, 2013/402/CE).

Tale ipotesi di procedura di analisi risulta inoltre confermata a seguito delle elaborazioni statistiche applicate alle banche dati disponibili e riportate negli allegati da 1 a 4 e che possono essere riassunti sinteticamente (limitatamente all'interesse che rappresentano nell'economia di questo scopo) nelle seguenti osservazioni:

1. l'ambiente galleria presenta una pericolosità specifica, come dimostrato da bibliografia consolidata ed analisi condotte sul fattore protettivo topologico (rapporto tra incidentalità a cielo aperto e in galleria) con riferimento alla generalità degli incidenti, e riassunta nella tabella di seguito, estratta dall'Allegato 2; nel campione analizzato, con riferimento al rapporto tra frequenze incidentali, il fattore galleria risulta protettivo di un fattore 3.65.

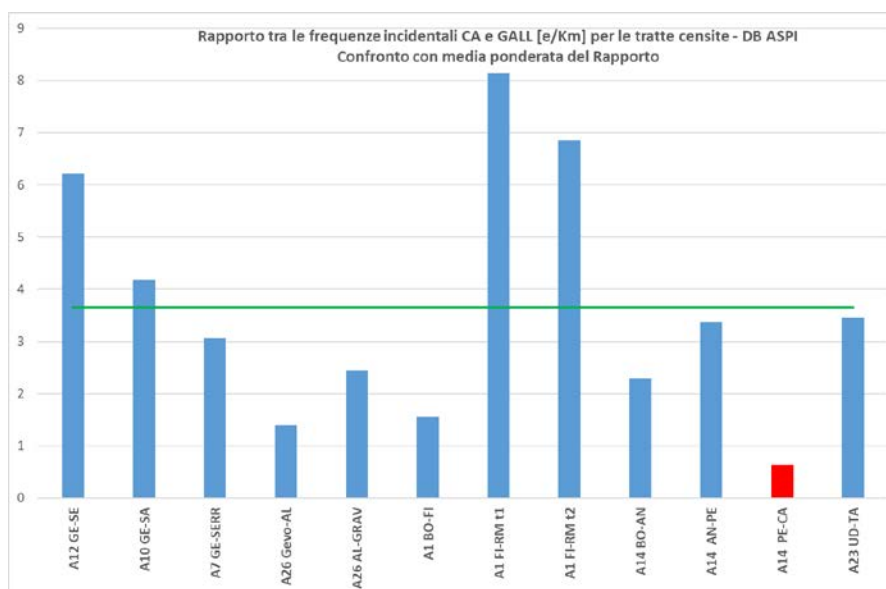


Figura 71: rapporto tra frequenze incidentali in tratta a cielo aperto e in galleria – dati ASPI

Tratte autostradali	FI CA [e/Km]	FI GAL [e/Km]	Lungh tratta [m]	Rapp. Inc. CA/G
A12 GE-SE	1,26E+01	2,03E+00	48700	6,21
A10 GE-SA	1,56E+01	3,72E+00	45500	4,19
A7 GE-SERR	8,50E+00	2,77E+00	50000	3,06
A26 Gevo-AL	5,28E+00	3,78E+00	83700	1,40
A26 AL-GRAV	1,61E+00	6,57E-01	161200	2,45
A1 BO-FI	8,48E+00	5,45E+00	91100	1,56
A1 FI-RM t1	5,47E+00	6,72E-01	137600	8,14
A1 FI-RM t2	3,83E+00	5,58E-01	135300	6,85
A14 BO-AN	5,16E+00	2,26E+00	86200	2,28
A14 AN-PE	5,05E+00	1,50E+00	134100	3,37
A14 PE-CA	2,78E+00	4,36E+00	140500	0,64
A23 UD-TA	1,51E+00	4,37E-01	101200	3,45
Effetto galleria				
fattore di prevenzione incidentale medio		3,65		

Tabella 22: rapporto tra frequenze incidentali in tratta a cielo aperto e in galleria e calcolo del valore medio – dati ASPI (ex Allegato 3)

2. le tratte in galleria dei singoli tronchi analizzati presentano una pericolosità (misurata in termini di tassi di incidenti gravi e tassi di incendio) caratteristica, cioè sufficientemente differenziate tra i

tronchi da poter essere qualificate come *firme di rischio* specifiche, come evidenziato nelle tabelle di seguito riprodotte ed estratte dall'Allegato 4;

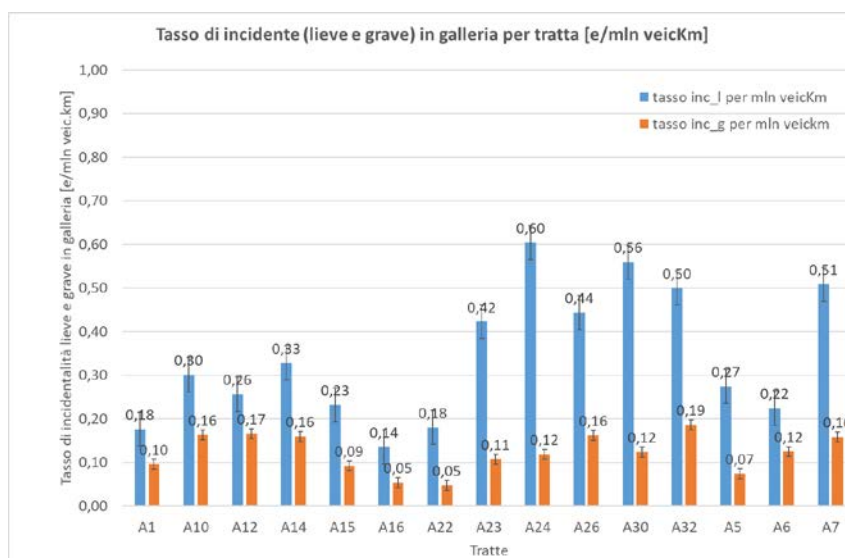


Figura 72: pericolosità misurata in termini di tassi di incidenti lievi e gravi– dati Gestori (ex allegato 4)

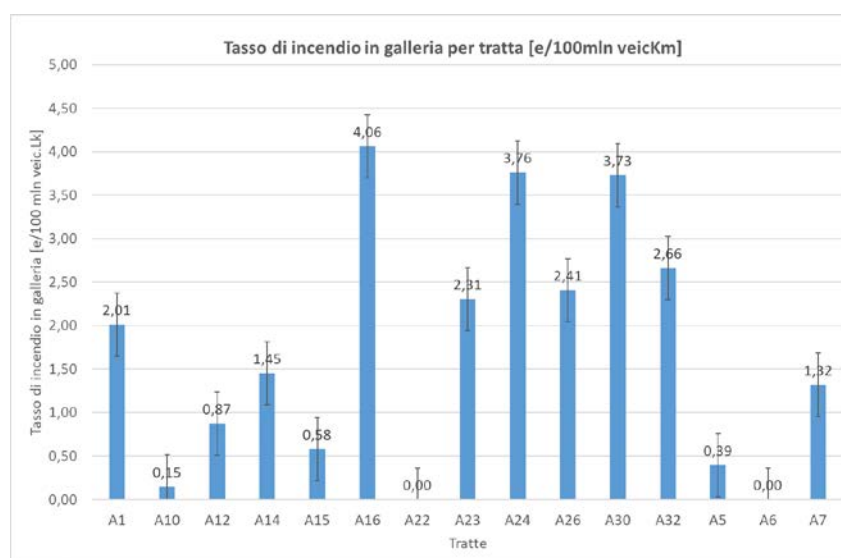


Figura 73: pericolosità misurata in termini di tassi di incendio – dati Gestori (ex Allegato 4)

3. A conferma della lettura proposta al punto precedente, le analisi di correlazione e regressione sul campione omogeneo dei dati forniti dalle società di gestione (Allegato 4) evidenziano che un livello elevato di varianza spiegata del fenomeno dell'incidentalità tipica (oltre il 50%) e di quello dell'incendio (oltre il 35%) possono ricondursi all'effetto delle variabili generative di struttura, come riassunte nella tabella di seguito;

Sottocampione	Variabile dipendente	Variabili indipendenti con correlazioni significative verso la variabile dipendente	Variabili indipendenti che sostengono il costruito di regressione multipla	Varianza spiegata
Incidenti Lievi	Eventi di incidenti lievi	Canne, L, TGM_corsia, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza	TGM_corsia, Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza, <u>Corsia Em, curv max</u>	50,30%
Incidenti gravi	Eventi di incidenti gravi	Canne, TGM_corsia, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Quota	TGM_corsia, Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza, <u>Corsia Em, curv max</u>	55,60%
Incendi	Eventi di incendio	L , TGM_sezione, Esposizione (LxTGM_sez), Corsie	Esposizione, <u>TGM_corsia</u> , % Pesanti, <u>Corsie</u>	35,60%
Incendi	Tasso di incendio	TGM_corsia , TGM_sezione, Esposizione (LxTGM_sez)	TGM_sezione, <u>Pendenza</u>	14,20%

Legenda: le variabili con correlazione significativa riportate in rosso nella terza colonna non risultano ricomprese nel costruito di regressione della quarta colonna; le variabili sottolineate nella quarta colonna sono risultate significativamente partecipanti al costruito regressivo pur non avendo, singolarmente nei confronti della variabile indipendente, evidenziato significatività accettabile.

Tabella 23: risultati delle analisi di correlazione semplice e regressione multipla applicate al campione Gestori 2006 – 2009 (ex Allegato 4)

Se ne deduce che è ragionevole applicare il principio di analogia di struttura al fine di ottenere, all'interno della medesima tratta, un campione aggregato di gallerie che, nella stima dei tassi di incidente grave e di incendio, possano considerare tutti gli eventi occorsi a strutture caratterizzate da analogia, in perfetta concordanza con i principi che sottendono alla definizione di parametri caratterizzanti l'attività ispettiva applicata ai tronchi a cielo aperto e alle gallerie fino a 500 m secondo quanto stabilito dalla Linea Guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali di cui al Decreto Ministeriale 2/5/2012.

- Per la qualificazione delle probabilità di incendio generalizzato, e quindi dell'evento complesso e ad intensità rilevante che, nello spazio degli eventi di incendio in generale, costituisce l'unico sottogruppo determinante le condizioni di pericolo attivo verso gli utenti, è possibile applicare un fattore riduttivo cautelativamente individuato attraverso l'analisi dell'evoluzione del fenomeno di incendio in galleria operata sulla base dati della Commissione Permanente presso il CSLPP e discusso in Allegato 3; in particolare le tabelle di seguito, estratte dall'Allegato citato, evidenziano che non più del 5% degli eventi può essere definito quale incendio generalizzato, coerentemente alle stime proposte nella letteratura scientifica rilevante analizzata;

Classe	Durata dell'interruzione		eventi [n]	f [-]
	da [minuti]	a [minuti]		
1	0	60	10	0,16666667
2	61	120	24	0,4
3	121	180	5	0,08333333
4	181	240	4	0,06666667
5	241	300	1	0,01666667
6	301	360	5	0,08333333
7	361	420	3	0,05
8	421	480	0	0
9	481	540	0	0
10	541	600	1	0,01666667
11	601	661	1	0,01666667
12	661	720	2	0,03333333
13	721	780	1	0,01666667
14	781	840	0	0
15	841	900	0	0
16	901	960	1	0,01666667
17	961	1020	1	0,01666667
18			1	0,01666667
frequenza relativa di incendi generalizzati [%]				5

Tabella 24: classificazione dei 60 eventi di incendio per classe di durata di interruzione conseguente ex Allegato 3)

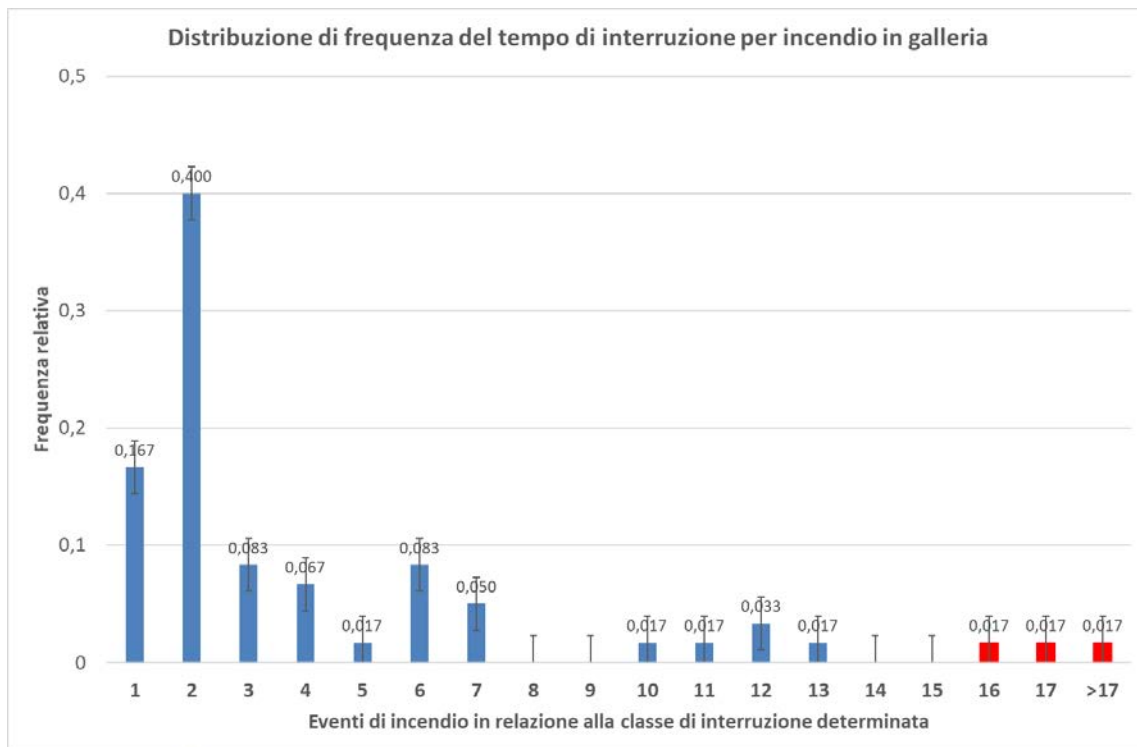


Figura 74: classificazione dei 60 eventi di incendio per classe di durata di interruzione conseguente (ex Allegato 3)

- Il rapporto tra incendi originari (che costituiscono la gran parte degli incendi registrati) e incendi occorsi a seguito di incidente tipico è stimato in valori inferiori al 5% dalla bibliografia più risalente, e a valori inferiori da quella più recente; nell'analisi dei dati degli eventi occorsi in galleria contenuti nella BD della Commissione Permanente presso il CSLPP, tale rapporto è stimato nell'ordine dell'1.5%, come evidenziato nell'Allegato 3.

In ragione di ciò, e vista la rilevante incertezza di stima propria del fenomeno analizzato, e considerato che la stima del 5% di incendi pericolosi sul totale degli incendi è certamente caratterizzata da errore di eccesso, la quota parte degli incendi non originari può certamente essere assorbita nella categoria precedente.

4 L'approccio RAMS per LA verifica della prestazione dei sottosistemi tecnici

4.1 Affidabilità e disponibilità di un sistema E, E, EP secondo la norma IEC 61508

Sicurezza, funzionalità e facilità d'uso sono requisiti essenziali dei sistemi tecnici.

Nonostante le gallerie stradali, da più parti, vengano considerate sistemi tecnici complessi e all'avanguardia, non esiste per esse l'obbligo di progettazione e manutenzione delle prestazioni degli impianti con approccio RAMS, cioè con approccio finalizzato all'ottenimento metodologicamente esatto del livello di prestazione imposto o voluto.

Tuttavia, nonostante l'approccio RAMS non sia d'obbligo per la progettazione, esercizio e manutenzione degli impianti, sembra utile adottarne i metodi di calcolo per raggiungere lo scopo di una qualificazione oggettiva delle prestazioni degli impianti in galleria, e in particolare per quelli che, come evidenziato nel capitolo precedente, determinano le condizioni di attivazione e sviluppo delle procedure di emergenza e dell'autosoccorso in particolare.

Allo scopo di adottare un chiaro e consolidato standard, è quindi opportuno fare riferimento alla norma *Functional safety of electrical, electronic and programmable electronic (E/E/PE) safety-related systems* EN/IEC 61508, sviluppata dalla International Electrotechnical Commission, (*traducibile in Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili (E/E/EP) per applicazioni di sicurezza*) e ai suoi metodi di valutazione in particolare.

4.1.1 Struttura della IEC 61508

La norma è composta da sette sezioni:

- IEC 61508-1 Requisiti generali
- IEC 61508-2 Requisiti dei sistemi E/E/PE
- IEC 61508-3 Requisiti del software
- IEC 61508-4 Definizioni ed abbreviazioni
- IEC 61508-5 Esempi di determinazioni dei livelli di integrità di sicurezza
- IEC 61508-6 Guida all'applicazione delle 61508-2 e 61508-3
- IEC 61508-7 Panorama delle tecnologie e delle misure tecniche

La strategia generale di inquadramento e calcolo consiste nel definire i livelli di integrità della sicurezza da raggiungere, e quindi progettare, anche tramite valutazioni affidabilistiche complesse e fino all'uso di metodi di analisi dei rischi, le prestazioni attese, misurando e gestendo i guasti casuali e sistematici e gli errori umani.

4.1.2 Il Safety Integrity Level

Secondo la norma IEC 61508, per ogni funzione assegnata ai sistemi di sicurezza E/E/PE deve essere specificato un livello di conformità in termini di integrità della sicurezza. Tale livello è espresso attraverso il SIL, con valori compresi tra 1 e 4. Il SIL costituisce la classificazione dell'impianto o sottosistema sulla scala di fidatezza (affidabilità e disponibilità) rispetto ai guasti pericolosi cui è esposto il sistema di sicurezza. La norma IEC 61508 non definisce il SIL da raggiungere in funzione della specifica applicazione; questa operazione viene

svolta attraverso un'analisi di rischio del sistema tecnico in oggetto e una valutazione del rischio accettabile, come combinazione della probabilità e del danno conseguente al fallimento, in relazione alla specifica utilizzazione.

L'assegnazione del SIL ad una prestazione è un processo complesso che muove dalla attribuzione della probabilità media di fallimento di ciascun elemento o sottosistema, e procede, attraverso l'analisi della struttura fisica di interazione e connessione sistemica, fino all'attribuzione della probabilità di guasto rilevante dell'intero impianto. In tabella¹⁹ sono riassunti i vari livelli di SIL con le rispettive probabilità medie di fallimento, dove si definiscono:

PFD_{AVG} (Probability of Failure on Demand): probabilità media che il sistema di sicurezza fallisca l'intervento in caso di necessità. Si utilizza nel caso ci sia bassa richiesta di intervento.

PFH_{AVG} (Probability of Failure per Hour): probabilità media che la funzione del sistema di sicurezza venga meno durante la sua attività. Si utilizza nel caso ci sia alta richiesta di intervento.

Safety Integrity Level (SIL)	Average Probability of Failure on Demand (PFD_{AVG})	Average Probability of Failure per Hour (PFH_{AVG})
SIL 4	$10^{-5} \leq x \leq 10^{-4}$	$10^{-9} \leq x \leq 10^{-8}$
SIL 3	$10^{-4} \leq x \leq 10^{-3}$	$10^{-8} \leq x \leq 10^{-7}$
SIL 2	$10^{-3} \leq x \leq 10^{-2}$	$10^{-7} \leq x \leq 10^{-6}$
SIL 1	$10^{-2} \leq x \leq 10^{-1}$	$10^{-6} \leq x \leq 10^{-5}$

Tabella 25 Safety Integrity Level e relativi PFD e PFH

Si noti che, a scopo cautelativo, ad una funzione non sarà assegnato un SIL esclusivamente in base al suo valore di PFD o PFH. Ad esempio, se per una funzione si calcolasse un PFD pari a $9 \cdot 10^{-3}$, rientrante quindi nel range di un SIL 2, a causa della vicinanza col valore limite 10^{-2} , si potrebbe decidere di assegnare un valore di SIL 1 a tale funzione. Dal momento che un sistema complesso è formato da più funzioni singole, se una di queste possiede un valore limite, è probabile che l'intero livello di sicurezza del sistema non riesca a fornire una prestazione rientrante nel SIL della funzione con valore limite.

4.1.3 HFT (Hardware Fault Tolerance)

Nella determinazione del SIL concorre anche la Hardware Fault Tolerance (HFT) che può essere definita come il numero di guasti contemporanei N per cui un N+1-esimo guasto può causare una perdita della funzione di sicurezza.

Nella pratica quindi la HFT definisce il grado di ridondanza del sistema. Prendendo la più semplice combinazione di elementi in parallelo si può banalmente affermare che tale sistema ha HFT=1. In linea generale maggiore è HFT, maggiore è il livello di sicurezza raggiunto dal sistema. Sistemi che non posseggono ridondanze hanno un valore di HFT pari a zero.

4.1.4 SFF (Safe Failure Fraction)

Un altro parametro che concorre alla definizione del SIL è la Safe Failure Fraction (SFF) definibile come la percentuale di guasti sicuri, oppure pericolosi ma rilevati, in rapporto al numero totale dei guasti.

I guasti si possono dividere in quattro gruppi:

¹⁹ CEI EN 61508-1, tabelle 2 e 3, pag. 38

- λ_{DU} : guasti pericolosi non rilevati (dangerous undetected failures). Questi guasti causano un malfunzionamento nel sistema e non vengono rilevati durante le attività di diagnosi;
- λ_{DD} : guasti pericolosi rilevati (dangerous detected failures). Questi guasti causano un malfunzionamento nel sistema ma vengono rilevati dalle attività di diagnosi;
- λ_{SU} : guasti sicuri non rilevati (safe undetected failures). Questi guasti, sebbene non rilevati dalle attività di diagnosi, risultano sicuri e quindi non pericolosi per il sistema;
- λ_{SD} : guasti sicuri e rilevati (safe detected failures). Questi guasti, oltre ad essere sicuri, sono rilevati dalle attività di diagnosi.

La SFF può essere dunque calcolata come:

$$SFF = \frac{\lambda_{DD} + \lambda_{SU} + \lambda_{SD}}{\lambda_T}$$

con λ_T numero totale dei guasti

Dall'unione di HFT e SFF si può avere un'idea del SIL massimo raggiungibile da determinate funzioni dei componenti di un sistema. Si distinguono i sistemi in due classi, A e B, dove in classe A vengono raggruppati i sistemi molto semplici, in classe B invece i sistemi più complessi. In base a ciò si ottengono le seguenti tabelle²⁰:

Safe Failure Fraction (SFF)	Hardware Fault Tolerance Classe A		
	N=0	N=1	N=2
$x < 60\%$	SIL1	SIL2	SIL3
$60\% \leq x < 90\%$	SIL2	SIL3	SIL4
$90\% \leq x < 99\%$	SIL3	SIL4	SIL4
$X \leq 99\%$	SIL3	SIL4	SIL4

Tabella 26: Safe Failure Fraction e relativo SIL in base alla Hardware Fault Tolerance (Classe A)

Safe Failure Fraction (SFF)	Hardware Fault Tolerance Classe B		
	N=0	N=1	N=2
$x < 60\%$	Non permesso	SIL1	SIL2
$60\% \leq x < 90\%$	SIL1	SIL2	SIL3
$90\% \leq x < 99\%$	SIL2	SIL3	SIL4
$X \leq 99\%$	SIL3	SIL4	SIL4

Tabella 27: Safe Failure Fraction e relativo SIL in base alla Hardware Fault Tolerance (Classe B)

Si nota che per i sistemi più complessi, proprio a causa della loro architettura, per raggiungere lo stesso SIL dei sistemi semplici è necessario disporre di valori più alti di SFF o si deve ricorrere a delle ridondanze.

In entrambe le classi per valori molto alti di SFF si possono raggiungere i valori più alti del SIL ma il SIL 4 è raggiungibile solamente in presenza di almeno una ridondanza.

La presenza di due ridondanze, raggiungibile nel modo più semplice con tre elementi posti in parallelo, indipendentemente dal valore di SFF, garantisce un SIL 2 per sistemi complessi e un SIL 3 per sistemi semplici.

²⁰ CEI EN 61508-2, punto 7.4.4.2.2, pagg 25-27

Nei capitoli successivi si tratterà più approfonditamente il metodo di calcolo di PFD e PFH e la relativa assegnazione del SIL.

4.2 I componenti di un sistema di sicurezza tipico delle installazioni in galleria

Gli impianti di sicurezza di galleria sono in genere strutturati ricorrendo a tre tipi di componenti:

- Sensori
- Risolutori logici
- Attuatori

Nella configurazione più semplice si verifica il seguente processo di attivazione:

- Il sensore raccoglie e trasmette i dati ad un operatore logico;
- L'operatore logico elabora le informazioni ricevute e, in caso di anomalia, invia un segnale ad un attuatore;
- L'attuatore, ricevuto il segnale, modifica lo stato dell'impianto per porlo in stato attivo.

La buona integrazione di questi elementi garantisce la sicurezza funzionale dell'impianto.

Rispondono a questa logica di struttura gli impianti di ventilazione di galleria, la cui attuazione è prevista per necessità sanitaria al superamento di soglie limite dei valori monitorati (opacità, monossido di carbonio, CO₂) o per intervento in condizione di emergenza, con attivazione automatica o comandata.

4.2.1 Sensori

I sensori devono essere in grado di rilevare un livello di parametro guida e misurarlo su scala. È necessario che il sensore risulti caratterizzato da una soglia in corrispondenza della quale si attivi un impulso di allarme. La scelta della soglia di allarme è variabile in funzione del parametro monitorato, della pericolosità dello scenario che si attiva al superamento della soglia e viene selezionato anche considerando l'opportuno bilanciamento verso l'esposizione a falsi positivi.

4.2.2 Collegamenti

I dati rilevati dai sensori vengono trasmessi tramite cavo in rame o fibra ottica a delle LAN (Local Area Network) poste in zona sicura presso zone a maggiore sicurezza della galleria. I collegamenti vengono realizzati tipicamente in fibra ottica perchè tale tecnologia permette di trasmettere i segnali con la migliore velocità e affidabilità circa l'effetto di rumore, risultando insensibile alle interferenze e alle perturbazioni di tipo elettromagnetico. Le stesse LAN consentono ottime prestazioni in termini di velocità di trasferimento dei dati.

Per poter monitorare i dati da remoto, le informazioni vengono in genere anche trasferite da una LAN ad una WAN (Wide Area Network), una rete che si estende su grandi distanze geografiche.

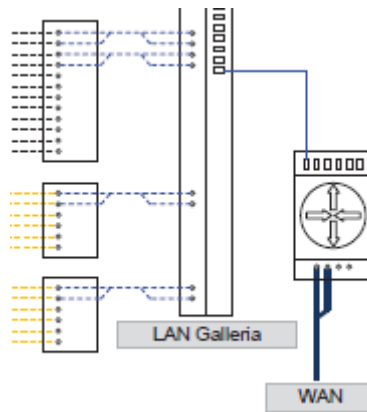


Figura 75: Wide Area Network collegata ad una LAN

I collegamenti sono in genere ridondati tra le diverse cabine perché i dati siano conservati su più dispositivi. All'interno delle cabine non sussiste la necessità di utilizzare esclusivamente collegamenti in fibra ottica dal momento che, essendo ambienti confinati in luoghi sicuri, non si riscontra in genere un rischio di interferenze esterne; inoltre la vicinanza dei dispositivi all'interno di una cabina rende superflua la velocità di trasmissione della fibra, risultando sufficiente l'utilizzo di collegamenti in rame per la maggior parte dei componenti. Il primo esempio di collegamento in rame si ha nella trasmissione dati tra una LAN di galleria e una LAN posta in cabina.

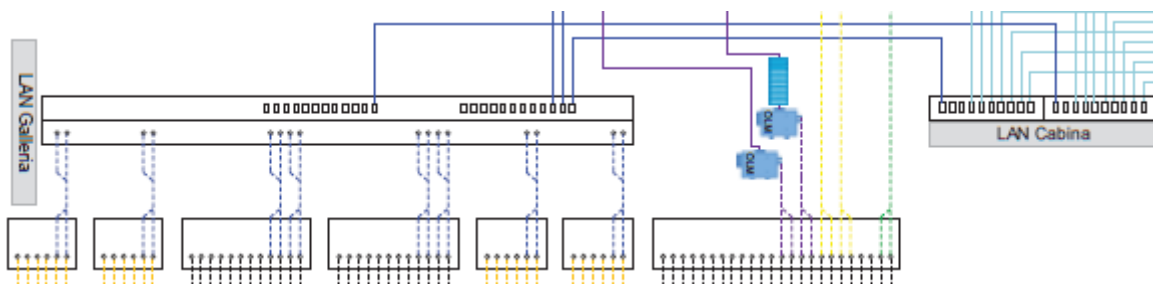


Figura 76: Collegamenti in rame e in fibra tra diversi elementi nelle cabine

Nell'immagine sono raffigurati i collegamenti in rame (linea continua) tra due LAN. Si distinguono dai collegamenti in fibra (linea tratteggiata).

Le LAN di cabina provvedono poi a trasmettere i dati, sempre tramite collegamenti in rame, a diversi componenti:

- Reti WAN
- NAS (Network Attached Storage)
- DSS (Support Decision System)
- SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

Tutti i collegamenti tranne uno (quello con lo SCADA) sono in genere caratterizzati da opportuna ridondanza. Questo non vale per lo SCADA per il quale è previsto in genere un solo collegamento con la LAN. Alcuni componenti (VSR e DSS) sono sovente in numero di due e ciò costituisce una ulteriore ridondanza a favore della sicurezza delle comunicazioni all'interno del sistema.

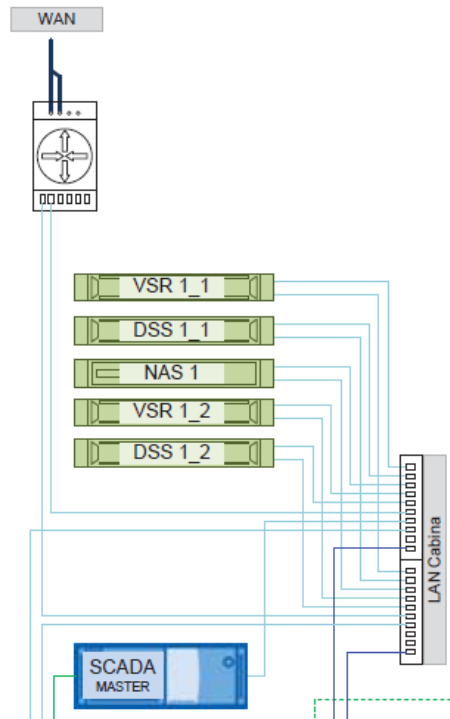


Figura 77: collegamenti tra LAN di cabina e altri componenti della cabina

4.2.3 NAS (Network Attached Storage)

I NAS sono dispositivi collegati alla rete la cui funzione è quella di consentire agli utenti di accedere e condividere una memoria di massa all'interno della propria rete o dall'esterno. Generalmente sono dotati di un sistema operativo e di diversi hard disk destinati all'immagazzinamento dei dati.

4.2.4 VSR (Voltage Sensitive Relay)

I VSR rilevano la tensione di ingresso generata e collegano o disconnettono automaticamente l'apparecchio o il circuito a tensioni preimpostate. In genere vengono utilizzati per evitare l'eccessiva scarica di una batteria e sono molto comuni in sistemi dove è presente una coppia di batterie. Consentono di evitare cadute di tensione presso le LAN garantendo, con prestazioni elevate, la continuità della distribuzione elettrica.

4.2.5 DSS (Decision Support System)

È un sistema software di supporto alle decisioni che permette di aumentare l'efficacia dell'analisi in quanto fornisce supporto a tutti gli utilizzatori che devono prendere decisioni strategiche di fronte a problemi che non possono essere risolti con i modelli della ricerca operativa. La funzione principale di un DSS è quella di estrarre in poco tempo e in modo versatile le informazioni utili ai processi decisionali, provenienti da una rilevante quantità di dati.

4.2.6 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) e PLC (Programmable Logic Controller)

Dall'acronimo, SCADA indica un sistema in grado di effettuare controlli di supervisione e acquisizioni di dati. Uno SCADA può identificare anche semplicemente un software che permette la realizzazione e il funzionamento di sistemi di supervisione, controllo e telecontrollo senza dover necessariamente scrivere codici attraverso linguaggi di programmazione.

I sistemi SCADA sono spesso utilizzati come interfaccia, nell'ambito dei sistemi di controllo e necessitano di:

- sensori che effettuano misurazioni e/o registrano variazioni di grandezze fisiche sul sistema in oggetto;
- microcontrollori, nel nostro caso PLC (Programmable Logic Controller) i quali effettuano misurazioni tramite i sensori a cui sono collegati e memorizzano i valori misurati in una memoria locale;
- un sistema di telecomunicazione tra i microcontrollori e il supervisore;
- uno o più computer supervisori (server) che periodicamente raccolgono i dati dai microcontrollori e li elaborano per estrarne informazioni utili.

Tipicamente, con riferimento agli impianti e ai sottosistemi di mitigazione, lo SCADA è collegato ai PLC attraverso una LAN. Gli stessi PLC sono poi messi in comunicazione con le LAN di galleria e con degli OLM (Optical Link Modules), strumenti che permettono il passaggio dal rame alla fibra, e successivamente alla cabina.



Figura 78: Collegamenti tra SCADA e PLC

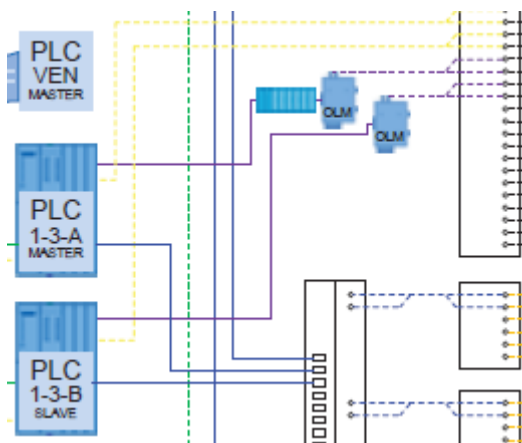


Figura 79: Collegamenti tra PLC ed elementi prossimi alla galleria

4.2.7 Attuatori

Lo SCADA processa i dati e adotta le decisioni e, comunicando con gli elementi presenti nei by-pass, ordina agli attuatori il funzionamento previsto. In ogni by-pass, infatti, sono presenti degli interruttori (switch) in grado di azionare ad esempio le porte tagliafuoco e i ventilatori. Tali interruttori, ai quali d'ora in poi ci si riferirà con l'appellativo "attuatori", sono la parte terminale del sistema. Non fanno parte del processo logico-decisionale come lo SCADA e i PLC ma si limitano a mettere in pratica gli ordini che ricevono da monte. Gli attuatori sono automatici, non necessitano dunque di un intervento umano per modificare lo stato del sistema.

4.3 Funzionamento dell'impianto di ventilazione in galleria

In generale il funzionamento dell'impianto di ventilazione prevede la verifica dei livelli monitorati e, in caso di superamento delle soglie prefissate, il solutore determina l'attivazione. In particolare:

- I sensori rilevano un livello del parametro sopra soglia;
- il segnale di allarme raggiunge il sistema di automazione (lo SCADA) e i DSS, i quali lavorano a supporto dello stesso SCADA
- Lo SCADA elabora le informazioni e le invia ai PLC. Le stesse informazioni vengono inviate anche ai NAS perché vengano salvate e archiviate
- I PLC recepiscono i dati dello SCADA e ordinano agli attuatori selezionati di modificare il loro stato
- Gli attuatori (switch) attivano la funzione richiesta.

4.3.1 Le singole funzioni dell'impianto

Al fine della valutazione prestazionale dell'impianto, si elencano le singole funzioni che vanno a costituire la catena di funzionamento dell'impianto:

- Rilevazione da parte dei sensori in galleria;
- Trasmissione del segnale dai sensori alla LAN di galleria;
- Trasmissione del segnale dalla LAN di galleria alla LAN di cabina;
- Trasmissione del segnale dalla LAN di cabina ai DSS;
- Elaborazione del segnale da parte dei DSS e trasmissione alla LAN di cabina;
- Trasmissione del segnale dalla LAN di cabina agli SCADA;
- Elaborazione del segnale da parte degli SCADA e conseguente invio di un allarme;
- Trasmissione del segnale di allarme dagli SCADA alla LAN;
- Trasmissione del segnale di allarme dalla LAN ai PLC, elaborazione degli ordini ricevuti dagli SCADA e invio dei risultati alla LAN di galleria;
- Trasmissione degli ordini dalla LAN di galleria agli attuatori;
- Attivazione della funzione di mitigazione da parte degli attuatori.

Ciascuna di queste funzioni, in linea teorica, presenta un grado di inaffidabilità da calcolare. In realtà la trasmissione a mezzo fibra ottica è immune da perdite di segnale, mentre i collegamenti in rame sono a breve distanza e presenti in camere dove non si rilevano rischi di interferenze; per cui può, senza rilevanti approssimazioni, essere trascurato il tasso di fallimento alla funzione "trasmissione del segnale". In definitiva, le funzioni che andranno analizzate sono:

- Rilevazione da parte dei sensori in galleria;
- Elaborazione del segnale da parte dei DSS;
- Elaborazione del segnale da parte degli SCADA;
- Elaborazione da parte dei PLC degli ordini ricevuti dagli SCADA;
- Attivazione della funzione di mitigazione da parte degli attuatori.

4.3.2 Le CCF (Common Cause Failures)

Una CCF, letteralmente “causa comune di guasti”, gioca un ruolo importante nella fidatezza di un sistema. Le CCF sono riconducibili all’effetto di degradazione degli agenti, di varia natura, che provocano un guasto non necessariamente simultaneo, di almeno due elementi posti in parallelo. Un’alta percentuale di umidità nell’aria può portare al guasto di più elementi di natura elettronica che si trovano vicini tra loro; oppure una improvvisa innalzamento della temperatura generata all’interno di un impianto può mettere fuori gioco più elementi allo stesso tempo; o ancora, l’errata stampa di un circuito elettrico provoca la messa fuori gioco di due diodi nello stesso momento al passaggio di un gradiente. Le principali cause possono essere riassunte così:

- Requisiti incompleti o in conflitto tra loro;
- Errori nel design;
- Carenze dei componenti utilizzati;
- Manutenzione errata a causa di errori umani o apparecchiature di prova;
- Cause ambientali.

Quale che sia la natura scatenante della CCF, il risultato è la degradazione, parziale o totale, della funzionalità di un sistema. Quando presenti in grande numero, le CCF influiscono pesantemente sull’affidabilità dei sistemi ridondati, con la concreta possibilità di compromettere il funzionamento di un intero impianto.

Nel tempo sono stati sviluppati diversi modelli per il calcolo delle CCF. Tra le varie disponibili nella bibliografia scientifica e tecnica, il *Partial Beta Model* mostra il vantaggio di una applicazione standardizzata e la possibilità di valorizzare gli interventi di manutenzione preventiva, il cui regolare e frequente svolgimento costituisce la migliore prevenzione delle CCF non riconducibili ad errata concezione del sistema.

4.3.3 Il Partial Beta Model

Il Simple Beta Model, modello da cui deriva il *Partial Beta Model*, presuppone che una proporzione fissa dei guasti (chiamata β) derivi da una causa comune. La stima di β è valutata in base al sistema. Il metodo si basa su dati storici molto limitati.

Il Partial Beta Model è più sofisticato del Simple Beta Model in quanto i contributi a β sono suddivisi in gruppi di funzionalità operative che si ritiene influenzino il grado di CCF. Pertanto, il fattore β viene composto aggiungendo insieme i contributi di una serie di fattori all’interno di ciascun gruppo. Nel tradizionale Partial Beta Model i gruppi di fattori, che rappresentano le difese contro le CCF, sono:

- somiglianza (la diversità tra unità ridondanti riduce le CCF)
- separazione (distanza fisica e barriere riducono le CCF)
- complessità (l’attrezzatura più semplice è meno soggetta a CCF)
- analisi (la precedente analisi dei dati FMEA e sul campo riduce la possibilità di CCF)
- procedure (il controllo delle modifiche e delle attività di manutenzione può ridurre CCF)
- formazione (progettisti e manutentori possono aiutare a ridurre il CCF attraverso la comprensione delle cause di malfunzionamenti)
- controllo (i controlli ambientali possono ridurre la suscettibilità alle CCF)
- test (i test ambientali possono rimuovere le caratteristiche del design soggette a CCF).

4.3.4 Il BETAPLUS Model

Per il presente studio si utilizzerà il BETAPLUS Model, un modello sviluppato a partire dal Partial Beta Model, che presenta le seguenti caratteristiche:

- è oggettivo e massimizza la tracciabilità nella stima della Beta. In altre parole, la scelta dei punteggi della *checklist* durante la valutazione del progetto può essere registrata e rivista;
- è possibile per qualsiasi utente del modello sviluppare ulteriormente le liste di controllo da tenere in considerazione per valutare eventuali fattori causali di fallimento rilevanti che possono essere percepiti;
- è possibile calibrare il modello rispetto ai tassi di guasto effettivi, sebbene con dati molto limitati;
- esiste una relazione credibile tra le liste di controllo e le caratteristiche del sistema da analizzare;
- il metodo del punteggio aggiuntivo consente di ponderare separatamente i contributori parziali β .

Il BETAPLUS Model include i seguenti miglioramenti:

- **Categorie di fattori:** considerando che i metodi esistenti si basano su un unico giudizio soggettivo di punteggio in ogni categoria, il metodo BETAPLUS fornisce un design specifico e domande operative a cui rispondere in ciascuna categoria. Domande specifiche forniscono un punteggio individuale in ciascuna categoria (ovvero separazione, diversità, complessità, valutazione, procedure, competenza, controllo ambientale, test ambientale) e consentono una valutazione del progetto e dei suoi fattori operativi e ambientali. Altri metodi Beta comportano solo un singolo punteggio per ciascuna categoria;
- **Punteggio:** il punteggio massimo per ogni domanda è stato ponderato calibrando il risultati di valutazioni rispetto a dati operativi noti sul campo. Le attrezzature programmabili e non programmabili sono valutate con liste di controllo leggermente diverse al fine di riflettere i tipi di apparecchiature;
- **Tenuta di conto della copertura diagnostica:** poichè le CCF non sono necessariamente simultanee, un aumento della frequenza del test automatico o del test di prova ridurrà β poichè i guasti potrebbe non verificarsi esattamente nello stesso momento. Pertanto, test più frequenti faranno prevenire alcune CCF;
- **Suddivisione delle liste di controllo in base all'effetto della diagnostica:** vengono utilizzate due colonne per i punteggi della checklist. La colonna A contiene i punteggi per quelle caratteristiche di protezione dalle CCF che viene percepita come potenziata da un aumento della frequenza diagnostica (test di prova o test automatico). La colonna B contiene i punteggi per quelle caratteristiche che non sono potenziate da un miglioramento della frequenza diagnostica;
- **Definizione di un modello:** il modello consente di modificare il punteggio in base alla frequenza e copertura del test diagnostico. I punteggi della colonna A vengono modificati moltiplicandoli per un fattore C derivato da considerazioni relative alla diagnostica. Questo punteggio C si basa sulla frequenza e sulla copertura della diagnostica. C è un numero che può acquisire valori nell'intervallo da uno a tre. β viene quindi stimato dal punteggio grezzo che si ottiene attraverso la seguente formula:

$$S = A * C + B$$

Si presume che l'effetto del punteggio diagnostico C sull'efficacia di A abbia caratteristiche lineari. Quindi si immagina che ciascuna modalità di guasto abbia la stessa probabilità di essere rivelata dalla diagnostica. Solo dati più dettagliati possono stabilire se il precedente presupposto non è valido.

- Non linearità: al momento non ci sono dati sulle CCF per giustificare la deviazione dal presupposto che quando la Beta diminuisce (cioè migliora) i miglioramenti successivi diventano proporzionalmente più difficili da raggiungere. Pertanto, la relazione tra il fattore β e il punteggio grezzo S è considerata esponenziale e questa non linearità si riflette nell'equazione che traduce il punteggio grezzo in un fattore β ;
- Tipo di apparecchiatura: il punteggio è stato sviluppato separatamente per apparecchiature programmabili e non programmabili, al fine di riflettere i criteri leggermente diversi che si applicano a ogni tipo di attrezzatura.
- Calibrazione: il modello è stato calibrato in base a dati sul campo.

Al fine di stabilire il punteggio C è necessario valutare l'effetto della frequenza e della copertura diagnostica. Questa, espressa in percentuale, è una stima della percentuale di guasti che verrebbero rilevati dal test di prova o dal test automatico. Ciò può essere stimato mediante giudizio o, più formalmente, applicando una FMEA per decidere se ogni errore sarebbe rivelato dalla diagnostica.

4.3.5 Modello esponenziale del BETAPLUS Model

Viene proposto un modello esponenziale per riflettere la crescente difficoltà nel ridurre ulteriormente β all'aumentare del punteggio:

$$0.3 * e^{\frac{(-3.4*S)}{2624}}$$

A causa della natura di questo modello, si possono inserire parametri aggiuntivi in ciascuna categoria, a seconda del giudizio soggettivo dell'utilizzatore. Il modello può quindi essere modificato e adattato alle proprie esigenze. Il modello può essere utilizzato al meglio in modo iterativo per testare l'effetto di progettazione, funzionamento e manutenzione, per vedere in che modo questi parametri alterano il punteggio. Le eventuali modifiche proposte possono essere valutate modificando i punteggi e ricalcolando β .

4.3.6 Il coefficiente CMooN

Il modello β di base si applica alla ridondanza 1oo2 semplice; tuttavia, al cambiare dello schema MooN, il valore di β deve essere modificato. Basti pensare al caso estremo 1ooN dove N è un relativamente grande, ad esempio 5. In questo caso sono tollerati ben quattro guasti, dal momento che solo un componente su cinque è necessario per espletare la funzione. Il valore di β sarà di conseguenza abbassato (quindi migliorato) per riflettere la forte affidabilità del sistema 1oo5. Dall'altra parte, se prendiamo un sistema 4oo5 si vede subito che un solo guasto è tollerato perchè almeno quattro elementi su cinque devono essere in grado di eseguire la propria funzione. Questo è di fatto un sistema peggiore del semplice 1oo2 e di conseguenza il valore di β andrà aumentato (peggiolato).

In tabella si riassumono i coefficienti da applicare a β per ogni tipo di configurazione, fino a N=9. I valori evidenziati in grassetto (per 1oo6, 1oo7, 1oo8, 1oo9, 2oo9) vanno riportati al valore 0,075, poichè valori troppo bassi del coefficiente non sono considerati realistici. Più avanti ci si riferirà a questi coefficienti con la dicitura C_{MooN} .

	M=1	M=2	M=3	M=4	M=5	M=6	M=7	M=8
N=2	1							
N=3	0.3	2.4						
N=4	0.15	0.75	4					
N=5	0.075	0.45	1.2	6				
N=6	0.0375	0.26	0.83	1.58	8.1			
N=7	0.019	0.15	0.54	1.2	1.9	11		
N=8	0.009	0.084	0.35	0.87	1.5	2	14	
N=9	0.005	0.047	0.22	0.61	1.2	1.8	2	17

Tabella 28: Coefficienti CMooN corrispondenti a diverse configurazioni

Nella tabella trova conferma il ragionamento fatto prima: per una configurazione buona (1oo5) il C_{MooN} è molto minore di 1, per una scarsa (4oo5) il C_{MooN} è molto maggiore di 1.

4.3.7 Schema funzionale dell'impianto

Lo schema funzionale dell'impianto consente di qualificare i guasti e di riconoscere quali perdite funzionali corrispondono alla condizione del guasto pericoloso.

Lo schema funzionale è ottenuto attraverso la rappresentazione dei collegamenti in serie e in parallelo tra i vari componenti dell'impianto. Nella figura seguente non sono presenti i tipi di collegamenti AND e OR per la parte che riguarda i sensori che rilevano la condizione di anomalia corrispondente all'incendio in galleria, e sono costituiti dai sistemi di rilevazione T (sensori puntuali di temperatura), CO (monossido di carbonio), O (Opacità), TVCC (sistema di videosorveglianza con rilevazione automatica della presenza di fumo) e CT (cavo termosensibile in galleria); per una maggiore fruibilità si rimanda alla figura dedicata in cui è evidenziato in dettaglio lo schema di collegamento dei sensori. Il collegamento OR, valido nel nostro caso per le configurazioni 1oo2, 1oo3 e per le parti terminali dello schema dei sensori, è rappresentato da un cerchio. Il collegamento AND, è rappresentato da un ovale. Per i sensori, i collegamenti AND sono in tutto dieci e differenziati per colore per una maggiore comprensione dell'immagine. I collegamenti rossi riguardano le coppie di sensori 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, i blu collegano le coppie 2-3, 2-4 e 2-5, i gialli accoppiano i sensori 3-4 e 3-5, il verde riguarda la coppia 4-5.

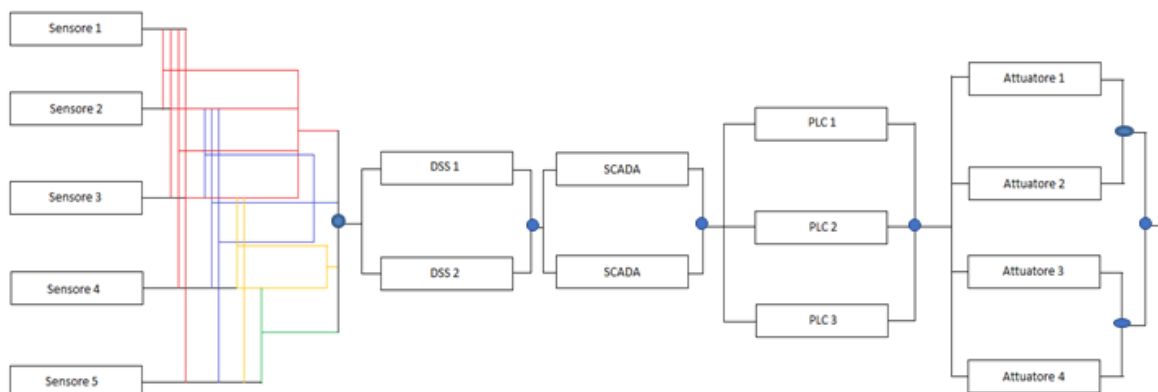


Figura 80: schema di collegamento dei componenti e ridondanze di progetto

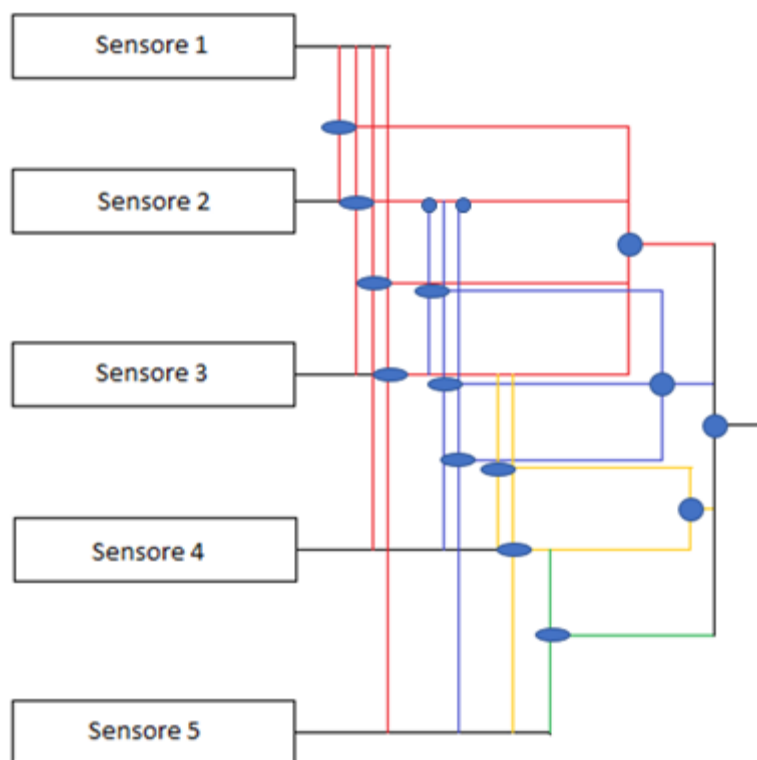


Figura 81: schema di collegamento dei sensori e ridondanze specifiche 2oo5

Lo schema in figura precedente mostra una configurazione 2oo5. È infatti sufficiente che una sola coppia di sensori funzioni e rilevi una anomalia nel parametro monitorato perché si determini un segnale di allarme. Per questo i collegamenti AND riguardano singole coppie: nel momento in cui una qualunque coppia di sensori percepisce l'anomalia, gli altri sensori risultano superflui per la misurazione in corso e i collegamenti terminali si basano di conseguenza sulla logica OR.

4.3.8 Calcolo dell'affidabilità

Fatte le dovute premesse si può procedere al calcolo di ogni singola funzione per arrivare a stabilire il livello di sicurezza del sistema. Il *Mean Restoration Time*, da sommare al tempo medio intercorrente tra due successive manutenzioni, è stato volutamente escluso dalle formule perché il suo contributo è trascurabile.

Rilevazione da parte dei sensori di galleria

Considerando l'impianto di rilevazione costituito da cinque sensori sorveglianti H24 e in condizione di parallelo affidabilistico. Tenzialmente, più è basso il rapporto tra M ed N, più è sicura la configurazione e questo porterebbe a ipotizzare uno schema 1oo5 per i rilevatori di gas in galleria. È anche vero però che uno schema del genere rischierebbe di procurare falsi allarmi, dal momento che un'anomalia in un solo sensore genererebbe un segnale di allarme. Preso atto di ciò è adottata una configurazione 2oo5 (già illustrata in precedenza), sostanzialmente al riparo da falsi allarmi e con un alto grado di tolleranza.

Si specifica che è supposta la logica di funzionamento alla pari tra i componenti, cioè, presi i cinque sensori si suppone che tutti operino allo stesso livello con le medesime performance, indipendentemente dalla loro posizione.

Il calcolo della probabilità di fallimento di un sistema 2oo5 sarà quindi:

$$PFD = ((1 - \beta) * \lambda_{DU} * \tau)^4 + C_{2005} * \frac{\beta * \lambda_{DU} * \tau}{2}$$

Dove:

β indica la proporzione fissa dei guasti derivanti da una causa comune;

λ_{DU} è il tasso dei guasti pericolosi non rilevati;

C_{MOON} è un coefficiente, dipendente dalla configurazione in parallelo dello schema, che va a modificare il valore di β ;

τ è il tempo che intercorre tra due successive manutenzioni.

Il termine C_{MOON} si ricava immediatamente dalla tabella specifica e corrisponde a 0,45. Per λ_{DU} e τ si estraggono i dati d'interesse dalle tabelle del NOG 070²¹:

Component	λ_{DU} (10^{-6})
IR Gas detector, Line	0.7

Component	Test interval (months)	Test interval (hours)
Fire and gas detectors	6	4380

Figura 82: tasso di guasto e intervallo tra due successive manutenzioni per i sensori

Per il calcolo di β si ipotizza, a favore di sicurezza, che non sia presente un regolare controllo diagnostico, da cui deriva un valore di C pari ad 1. Inoltre si fa l'ipotesi che non sia presente un adeguato controllo ambientale. Le ipotesi sono cautelative e probabilmente non realistiche ma servono a verificare la bontà del sistema e a vedere in che modo un maggior controllo diagnostico potrebbe migliorare le prestazioni. Si anticipa infatti che i calcoli svolti verranno rieseguiti una seconda volta con un fattore β potenziato.

A seguito delle ipotesi formulate, si ottengono valori di A e B pari rispettivamente a 340 e 242. Dalla formula si ottiene:

$$S = 340 * 1 + 452 = 792$$

Sostituendo tale valore di S nella formula (x) si ha:

$$\beta = 0.3 * e^{\frac{(-3.4*792)}{2624}} = 0.11$$

Si fa presente che tale valore di β sarà utilizzato anche per gli altri componenti del sistema. Non risultano infatti grandi differenze nei risultati ricavabili dalle tabelle dell'Appendice tra i valori di A e B per quanto riguarda i sensori e i valori di A e B per quel che riguarda gli altri componenti.

Avendo anche il valore di β si può procedere al calcolo di affidabilità dei sensori:

²¹ 070 - Norwegian Oil and Gas application of IEC 61508 and IEC 61511 in the norwegian petroleum industry, Appendice A "Background for minimum SIL requirements", pagg. 57-59. Si fa riferimento a questa fonte anche per i componenti dell'impianto descritti in seguito.

$$PFD = (0,89 * 7 * 10^{-7} * 4380)^4 + 0,45 * \frac{0,11 * 7 * 10^{-7} * 4380}{2} = 7,59 * 10^{-5} h^{-1}$$

L'affidabilità è il complemento a 1 della inaffidabilità, per cui si ottiene:

$$R = 1 - 0,0000759 = 0,9999241$$

In analogia a quanto sviluppato per i sensori, è possibile procedere alla valutazione della prestazione delle altre funzioni di sistema.

Calcolate le PFD di tutte e cinque le funzioni si può procedere al calcolo della PFD dell'intero impianto. Trattandosi di un sistema in serie, è necessario moltiplicare i valori di affidabilità trovati per ottenere l'affidabilità del sistema. A quel punto l'inaffidabilità del sistema è il complemento a 1 del risultato trovato:

$$R_{tot} = 0,9999241 * 0,9994979 * 0,9999998 * 0,9998554 * 0,9996328 = 0,99891$$

$$PFD_{tot} = 1 - 0,99891 = 1,09 * 10^{-3} h^{-1}$$

FUNZIONE	PFD (h ⁻¹)	R
SCADA	2 x 10 ⁻⁷	0,9999998
Sensori	7,59 x 10 ⁻⁵	0,9999241
PLC	1,446 x 10 ⁻⁴	0,9998554
DSS	5,021 x 10 ⁻⁴	0,9994979
Attuatori	3,6713 x 10 ⁻⁴	0,9996328

Tabella 29: R delle singole funzioni, in ordine decrescente

Dal momento che, in realtà, il controllo diagnostico è presente, si rieseguo i calcoli per ogni funzione usando un nuovo valore di β . Tale valore sarà più piccolo (migliorato) rispetto al precedente perché prenderà in considerazione l'effettiva presenza di un controllo diagnostico. Con l'inserimento di un controllo diagnostico, i valori di A, B e C cambiano nel seguente modo:

A: 340 → 390

B: 452 → 993

C: 1 → 2

Il relativo valore di S che si ottiene è il seguente:

$$S = 390 * 2 + 993 = 1773$$

Sostituendo il nuovo S nella formula si ottiene un nuovo valore di β :

$$\beta = 0,3 * e^{\frac{(-3,4 * 1773)}{2624}} = 0,03$$

Da qui si procede con la riesecuzione dei calcoli col fattore β migliorato:

Sensori

$$PFD = (0,97 * 7 * 10^{-7} * 4380)^4 + 0,45 * \frac{0,03 * 7 * 10^{-7} * 4380}{2} = 2,07 * 10^{-5} h^{-1}$$

$$R = 1 - 0,0000207 = 0,9999793$$

DSS

$$PFD = 0,03 * 10^{-6} * \frac{8760}{2} + \frac{(0,97 * 1 * 10^{-6} * 8760)^2}{3} = 1,555 * 10^{-4} h^{-1}$$

$$R = 1 - 0,0001555 = 0,9998445$$

La funzione relativa agli SCADA non subisce modifiche al suo valore di affidabilità in seguito al miglioramento del fattore β .

$$R = 0,9999998$$

PLC

$$PFD = 0,3 * 0,03 * 10^{-6} * \frac{8760}{2} + \frac{(0,97 * 1 * 10^{-6} * 8760)^3}{4} = 3,96 * 10^{-5} h^{-1}$$

$$R = 1 - 0,0000396 = 0,9999604$$

Attuatori

$$PFD_{int} = 0,03 * 2 * 10^{-7} * \frac{17520}{2} + \frac{(0,97 * 2 * 10^{-7} * 17520)^2}{3} = 5,64 * 10^{-5} h^{-1}$$

$$R_{int} = 1 - 0,0000564 = 0,9999436$$

$$PFD_{at} = 0,003 * 5,8 * 10^{-6} * \frac{8760}{2} + \frac{(0,97 * 5,8 * 10^{-6} * 8760)^2}{3} = 1,5717 * 10^{-4} h^{-1}$$

$$R_{attuatori} = 1 - 0,00015717 = 0,9998428$$

$$R_{tot_attuatori} = R_{int} * R_{attuatori} = 0,9999436 * 0,9998428 = 0,999786$$

$$PFD_{tot_attuatori} = 1 - 0,999786 = 2,14 * 10^{-4} h^{-1}$$

Si riepilogano in tabella i nuovi valori di affidabilità delle funzioni:

FUNZIONE	PFD [h^{-1}]	R
SCADA	$2 * 10^{-7}$	0,9999998
Sensori	$2,07 * 10^{-5}$	0,9999793
PLC	$3,96 * 10^{-5}$	0,9999604
DSS	$1,555 * 10^{-4}$	0,9998445
Attuatori	$2,14 * 10^{-4}$	0,999786

Tabella 30: R delle singole funzioni, in ordine decrescente, in presenza di un controllo diagnostico.

Il nuovo valore di affidabilità del sistema e la sua relativa PFD sono:

$$R_{tot} = 0,9999998 * 0,9999793 * 0,9999604 * 0,9998445 * 0,999786 = 0,9961135$$

$$PFD_{tot} = 1 - 0,9961135 = 3,886 * 10^{-4} h^{-1}$$

Per procedere alla valutazione della probabilità di fallimento in caso di chiamata in servizio dell'impianto è a questo punto necessario transitare dal concetto di affidabilità a quello di disponibilità. A tale scopo è necessario introdurre il tempo medio di riparazione e calcolare quindi l'incidenza del corretto funzionamento (in termini di disponibilità temporale normalizzata) sul totale del ciclo medio costituito da tempo medio di guasto e tempo medio di riparazione, in perfetta conformità a quanto presentato in § 2.

In considerazione dell'incertezza dell'evento di incendio (che costituisce il fenomeno oggetto di monitoraggio), la valutazione del SIL del sistema è ottenuta stimando il SIL relativo alla condizione di guasto pericoloso per sistemi *interventivi*.

Per valutare la probabilità che si abbia indisponibilità della funzione nell'occasione di incendio è necessario introdurre il valore del tempo di resa in pristino dell'impianto, che, in quanto impianto di sicurezza, deve essere oggetto di un contratto di manutenzione dedicato.

Ipotizzando che la condizione di guasto – rilevata – attivi una manutenzione efficace in un tempo medio di 11 giorni (10 di attesa media, vista la programmazione di un accesso ogni 20 giorni, oltre ad 1 giorno lavorativo effettivo di intervento), si ha:

$$U=1-A= 1-MTTF/(MTTF + MTTR)= 1-(2300/(2300+264))=0,104$$

4.4 Esempio di implementazione della funzione di disponibilità del singolo sottosistema nel sistema complessivo

L'analisi estesa delle funzioni espletate dai sottosistemi di mitigazione, sviluppata per ciascuno di essi, è strutturata nella analisi complessiva di funzionamento degli impianti di galleria, con il livello di dettaglio richiesto allo scopo di qualificare in modo completo e rappresentativo tutte le condizioni ambientali che hanno effetto sul flusso del pericolo o sulla prestazione di autosoccorso espressa dagli esposti. La figura di seguito riassume l'approccio sistemico, evidenziando, attraverso un albero di composizione, la determinazione della frequenza attesa di accadimento di scenari ambientali – dato certo l'evento incidentale.

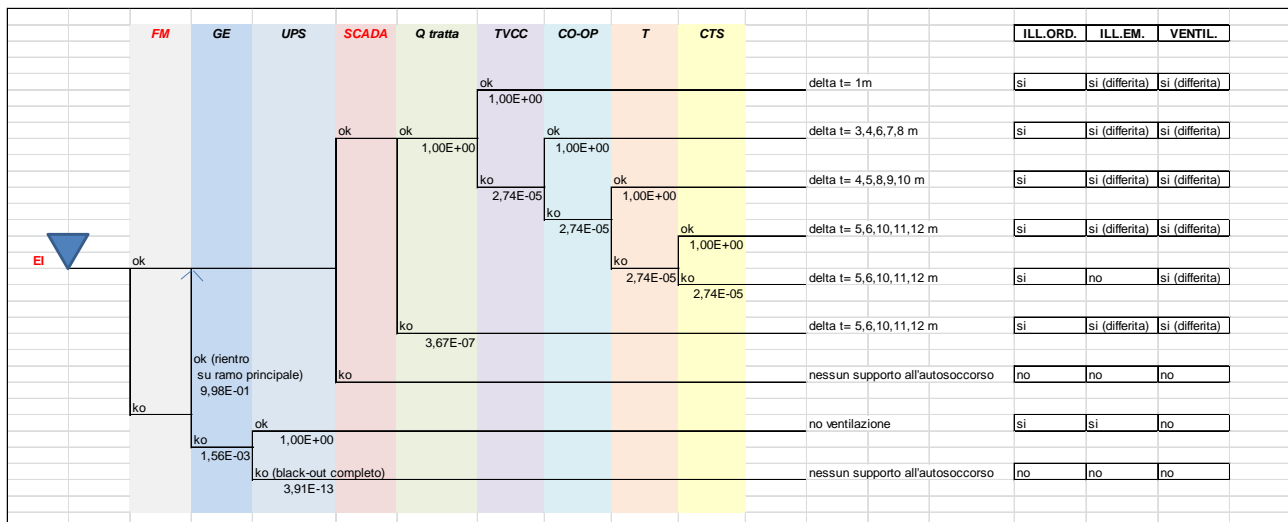


Figura 83: compositore di probabilità condizionata degli scenari funzionali complessivi – illuminazione, illuminazione di emergenza e ventilazione.

L'effettiva qualificazione della prestazione degli impianti di galleria dovrebbe, inoltre, essere soggetta a continua verifica, e la qualificazione di efficacia e disponibilità dovrebbe essere condotta a priori e monitorata a posteriori, allo scopo di restituire ipotesi di analisi di rischio effettive.

Un esempio del trattamento diagnostico dei dati monitorati è riportato, con riferimento ad un caso reale anonimizzato, nel § seguente.

4.4.1 Database guasti e anomalie impianti di galleria

Il DB raccoglie 9871 casi di anomalie e guasti relativi al I trimestre 2017 occorsi nelle gallerie della tratta autostradale A23.

Il parco gallerie è costituito da 9 gallerie e 18 fornicati.

Le singole gallerie hanno impianti SCADA di supervisione e trasmissione in centrale remota dei sistemi di:

- Videosorveglianza (integrato da sistema di riconoscimento di anomalia del traffico, incidente e incendio);
- Antincendio (costituito da condotta idrica, cavo termosensibile, estintori nei by-pass, rilevatori di fumo nei bypass, sistema di pressurizzazione);
- Illuminazione (permanente, di rinforzo, di emergenza);
- Ventilazione (ventilatori longitudinali in gruppi di 2 sanitaria per funzione sanitaria e di emergenza);

Struttura del DB - Sottosistemi e componenti:

- 1 Analisi traffico (-, telecamera);
- 2 Antincendio (Cavo termosensibile, elettropompa antincendio, estintore by-pass, rilevatore fumo by-pass);
- 3 Comunicazione (-, PLC, PLC Ventilazione, PLC Shelter, PLC Illuminazione, PLC By Pass, I/O remoto);
- 4 Distribuzione Elettrica (...);
- 5 Fumo-Incendio (-, telecamera);
- 6 Generico (SCADA);
- 7 Illuminazione (-, circuito entrata, circuito permanente, contattore, interruttore, luci rinforzo, selettore, sensore di luminanza, variatore);
- 8 Pressurizzazione (Elettrosoffiante, Porta, Portellone);
- 9 Ventilazione (algoritmo, anemometro, interruttore, sensore CO/OP, sensore temperatura, ventilatore);
- 10 Videosorveglianza (-, telecamera).

Il DB guasti restituisce eventi a carico di sottosistemi non gerarchizzando, e quindi non sintetizzando la funzione persa. Il diretto utilizzo dei dati registrati è quindi inficiato dalla ridondanza dei segnali di guasto, con l'effetto di un riverbero dei guasti originari da elementi gerarchicamente superiori a tutti gli elementi inferiori. Ciò determina che, ad esempio, la registrazione di un guasto di una centralina è registrato come guasto alla centralina e anche come guasto a tutti i singoli componenti da questa controllati. L'effetto è una sovrastima del tasso di guasto (e quindi della indisponibilità) dei singoli componenti dell'impianto.

Il DB guasti non è strutturato per giudizio sull'effetto del guasto, che dal punto di vista sistemico potrebbe essere qualificato come:

- a. Guasto (perdita di funzione dell'elemento / impianto);
- b. Anomalia (perdita di capacità di controllo/comando locale e remota dell'elemento / impianto);

- c. Perdita di controllo (perdita di capacità di controllo / comando remoto dell'elemento / impianto, essendo comunque mantenuta la capacità di funzionamento per reazione locale del sistema SCADA).

I guasti riconducibili a impianti e componenti sono gravati da fenomeni di guasto, anomalia e perdita di controllo di singoli componenti difettosi. L'utilizzo migliore dei dati di DB per orientare la manutenzione specifica di componenti a guastabilità anomala renderebbe un decremento significativo del tasso di guasto delle varie tipologie di componenti e sottosistemi, e della indisponibilità attesa degli stessi.

L'analisi del DB consente, per tipologie di guasto, di individuare le occorrenze e i tempi di indisponibilità, e quindi di ricavare gli indicatori di prestazione RAMS.

La figura seguente restituisce, a titolo esemplificativo, il quadro complessivo degli impianti supervisionati, con il numero di occorrenze dei guasti e la durata della condizione di indisponibilità.

DATI A23			
21 FORNICI, (escluse le gallerie non esercite)			
Sottosistema	Tipo	Dati	
		Conteggio di Sta	Somma di Durata
Analisi Traffico	-	160	460
Analisi Traffico	Telecamera	40	115
Antincendio	Cavo Termosensibile su Fornice Destro	15	21
Antincendio	Cavo Termosensibile su Fornice Sinistro	21	292
Comunicazione	-	4	24
Comunicazione	PLC	29	63
Comunicazione	PLC by-pass 1	6	3
Comunicazione	PLC by-pass 2	7	7
Comunicazione	PLC by-pass 3	1	1
Comunicazione	PLC Illuminazione	3	2
Comunicazione	PLC Shelter	6	7
Comunicazione	PLC Shelter CP	2	479
Comunicazione	PLC Ventilazione	5	6
Comunicazione	Remote I/O	88	61

Figura 84: esempio di DB operazionalizzato per il monitoraggio e l'analisi ex post della disponibilità e funzionalità dei sottosistemi rilevanti per la sicurezza

La figura di seguito è esemplificativa del risultato ottenibile, con riferimento all'indisponibilità del sottosistema sorvegliante della ventilazione (PLC) e sistema di TVCC.

Mese di gennaio 2016						
Allarmi riguardanti PLC		PLC totali		5	h teoriche funzionamento	43800
Galleria		(più elementi)			indisponibilità totale [h]	573,9
					% indisponibilità	1,31
					MTTR [min]	214
					MTBF [min]	16109,1
Dati						
Dettaglio	Conteggio di Stato	Somma di Durata min	Max di Durata min	Media di Durata min		MTBF/(MTBF+MTTR)
Allarme comunicazione PLC	128	19767,55	19639,65	154,4339844		0,986897
Allarme Comunicazione PLC Ventilazione	14	14,1	1,05	1,007142857		
Allarme Comunicazione RIO / PLC	19	14653,33333	14635,33333	771,2280702		
Totale complessivo	161	34434,98333	19639,65	213,8818841		
Telecamere		Interdistanza	150m	TVCC totali	20	h teoriche funzionamento
Galleria		(più elementi)				175200
						indisponibilità totale [h]
						184,4
						% indisponibilità
						0,105
						MTTR [min]
						173
						MTBF [min]
						65223,2
Dati						
Dettaglio	Conteggio di Stato	Somma di Durata min	Max di Durata min	Media di Durata min		MTBF/(MTBF+MTTR)
Timeout connessione	64	11065,01667	174,8833333	172,8908854		0,997356
Totale complessivo	64	11065,01667	174,8833333	172,8908854		

Figura 85: analisi della disponibilità effettiva dell'impianto TVCC

5 Applicazione della procedura di analisi di rischio quantitativa esperta alla galleria Clap Forat (A23)

5.1 Descrizione della struttura di case study

Sulla base delle osservazioni proposte nei capitoli precedenti, la procedura di analisi di rischio esperta definita è applicata ad una galleria reale, costituita dalla struttura Clap Forat, inserita nella tratta Carnia - Pontebba dell'Autostrada A23 gestita da ASPI.

La galleria si presenta a doppia canna e due corsie per senso di marcia, banchine limitate, assenza di corsia d'emergenza, e caratteristiche strutturali e di traffico come di seguito riportato nelle tabelle esplicative di seguito riportate.

La attribuzione del TGM di struttura è operata, in presenza di dati non collimanti fra le banche dati disponibili e riferite a periodi di osservazione diversi, selezionando il campione dati di riferimento che sarà utilizzato in via preferenziale in tutta l'analisi, costituito da quanto collezionato nei DB Gestori anni 2006 – 2009.

Scheda 1	IDENTIFICATIVO DELLA GALLERIA (galleria monodirezionale con L compresa tra 1000 e 3000 m)		
Nome Galleria	Clap Forat		
Anno di costruzione	1966		
Nome Tratta Viaria	A23 - autostrada Alpe-Adria		
Tipologia	Costruzione		
autostradale	<input checked="" type="checkbox"/>	Naturale	<input checked="" type="checkbox"/>
stradale urbano	<input type="checkbox"/>	Artificiale	<input type="checkbox"/>
stradale extra-urbano	<input type="checkbox"/>	Trincea coperta	<input type="checkbox"/>
Numero canne	2		
Direzionalità	Monodirezionale	<input checked="" type="checkbox"/>	Bidirezionale <input type="checkbox"/>
Progressiva Chilometrica	86.493 ingresso SUD		
Coordinate UTM			
Localizzazione portale di ingresso	Dogna (imbocco SUD)	Orientamento	SUD
Localizzazione portale di uscita	Pietratagliata (imbocco NORD)	Orientamento	NORD
Quota s.l.m.	519.00 INGRESSO SUD / 530.00 USCITA (Nord Est)		
Trasporto ADR	NO		<input type="checkbox"/>
	SI	Libero	<input checked="" type="checkbox"/>
		Scortato	<input type="checkbox"/>
		Limitato nel Tempo	<input type="checkbox"/>
	Limitato nella Tipologia	<input type="checkbox"/>	
Accessibilità ai fornici	Si		

Tabella 31: scheda galleria n.1 – elementi identificativi della galleria

Scheda 2		CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DELLA GALLERIA			
	Direzione	SUD-NORD			
Dimensioni Lineari	Lunghezza	1686 m			
	Larghezza	9.90 m			
	Altezza	6.62 m			
Pendenza Media	0.59 %				
Forma della Sezione	circolare				
n° Corsie	2	n° Corsie emergenza	0		
Area della Sezione	56 mq				
Numero by-pass / gallerie pedonali	N° 2		Interdistanza [m]	600	
Numero by-pass / gallerie carrabili	N° -		Interdistanza [m]	-	
Numero svincoli interni	0		Interdistanza [m]		
Altezza sagoma limite	5.50 m				
Marciapiedi	<input checked="" type="checkbox"/>	n° per carreggiata	1	Larghezza	50 cm
Caratteristiche delle Vie di Accesso	Pendenza (≤ 10 %)				%
	Resistenza al Carico (≥ 20 t)				T
	Altezza Libera (≥ 4 m)				m
	Raggio di Volta (≥ 3 m)				m
Tracciato	Imbocchi in rettilo				
	n° curve in galleria		1		
	Raggio di curvatura [m]		10000		
	Restringimenti di carreggiata in galleria		NO		
	Svincoli o incroci in galleria				
Piazzole di sosta	NO				

Tabella 32: scheda galleria n.2 – caratterizzazione geometrica

Scheda 4.1		CARATTERIZZAZIONE TRAFFICO			
Tipologia di Traffico	A.Leggero	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	B.Misto	<input checked="" type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	C.Pesante	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
Tipologia di Veicoli	Veicoli Leggeri	75%-65%	Dev. standard		
	Veicoli Pesanti	25%-35%	Dev. standard		
	Rado	<input type="checkbox"/>	Frequenza %		
Trasporto ADR	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> Sulla tratta	<input type="checkbox"/> Al casello di prossimità		
			<input checked="" type="checkbox"/> Libero		
			<input type="checkbox"/> Scortato		
			<input type="checkbox"/> Limitato nel tempo		
		<input type="checkbox"/> Limitato nella tipologia			
Traffico Medio Giornaliero [Veicoli/Giorno]		> 2000 veicoli/corsia-giorno			

Tabella 33: scheda galleria n.4.1 – caratterizzazione traffico

Scheda 5	SINOSSI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELLA GALLERIA		
Sistema di Illuminazione	Ordinario		
	Sicurezza	Linea Preferenziale Cabina	
		Linea Preferenziale G.E.	
		Batterie Tampone	
	Evacuazione	Picchetti luminosi	[m]
Illuminamento 2 lux (5 lux all'imbocco)	Altezza	[m]	
Impianto elettrico	Tipologia rete		
	N° punti fornitura		
	Potenza complessiva installata		
	Potenza elettrica gruppo elettrogeno		
	Numero gruppi elettrogeni		
	Potenza elettrica UPS		
	Durata prevista UPS		
	Dispositivi sotto gruppo elettrogeno		
	<input checked="" type="checkbox"/> Impianto di alimentazione di emergenza		
	<input checked="" type="checkbox"/> Impianto di ventilazione della galleria per la gestione dei fumi generati da un evento incendio		
	<input checked="" type="checkbox"/> Impianto idrico antincendio		
	Impianto di illuminazione diurna e notturna della galleria		
	Dispositivi sotto UPS		
	Impianto di illuminazione notturna e di sicurezza		
	<input checked="" type="checkbox"/> Impianto di illuminazione centro di controllo e locali tecnici, segnaletica in galleria e nei tratti in prossimità degli imbocchi		
	<input checked="" type="checkbox"/> Impianto di sorveglianza		
	<input checked="" type="checkbox"/> Impianto di rilevazione incidenti e incendi		
<input checked="" type="checkbox"/> Sistema di gestione della galleria			
<input checked="" type="checkbox"/> Impianti di comunicazione			

Tabella 34: scheda galleria n.5 – sistemi di sicurezza – parte 1

Scheda 5	SINOSSI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELLA GALLERIA		
Sistema di Ventilazione			
Tipologia	Naturale		
	Longitudinale		<input checked="" type="checkbox"/>
	Semitrasversale/Trasversale	Invertibile	
		Non Invertibile	
	Ibrido		
Trasversale	<input type="checkbox"/>	Ibrido	
Configurazione	Numero centrali		Numero camini
	Numero tratti	3	Lunghezza max tratto M 600
Dimensionamento	Numero acceleratori	6	
	Diametro acceleratori	0.80	
	Spinta acceleratori		

Tabella 35: scheda galleria n.5 – sistemi di sicurezza – parte 2

Scheda 5	SINOSSI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELLA GALLERIA					
Blocco del traffico	Barriere	<input type="checkbox"/>	Interdistanza	m		
Monitoraggio traffico	Telecamere	<input checked="" type="checkbox"/>	n°	Interdistanza	m	
	Rilevazione automatica incidente	<input type="checkbox"/>	Conteggio veicoli		<input checked="" type="checkbox"/>	
	Velocità media traffico	<input checked="" type="checkbox"/>	Tipologia veicoli		<input checked="" type="checkbox"/>	
Centro di controllo	Remoto	<input checked="" type="checkbox"/>	In loco	<input type="checkbox"/>	Outsourcing	
Sistema di gestione galleria	Assente	<input type="checkbox"/>	Automatico	<input type="checkbox"/>	Operatore	
	Ridondanza	<input type="checkbox"/>	Client/server	<input type="checkbox"/>	n° postazioni locali	
	Procedura emergenza standard	<input checked="" type="checkbox"/>	Procedure emergenza diversificate	<input type="checkbox"/>	Comunicazione servizi di soccorso	
Sistema Servizi Ausiliari	Circuito Aria Compressa					
	Altro:					
Sistema di Comunicazione	Segnalazione Acustica					
	Segnalazione Ottica	TV-CC			<input checked="" type="checkbox"/>	
		Pannelli a Messaggio Variabile			<input checked="" type="checkbox"/>	
		Semafori			<input checked="" type="checkbox"/>	
		Segnaletica di Sicurezza			<input checked="" type="checkbox"/>	
	Segnalazione Radio	Cavo Fessurato			<input checked="" type="checkbox"/>	
		Messaggi agli utenti			<input checked="" type="checkbox"/>	
		Frequenze Attive		PS		
		VVF				
		Servizio	<input checked="" type="checkbox"/>			
Stazioni di emergenza	Interdistanza					
	Telefono	<input checked="" type="checkbox"/>	Estintori	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Pulsante allarme	<input checked="" type="checkbox"/>	Armadio/nicchia			
Monitoraggio parametri Ambientali	Anemometri				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Sensori CO				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Sensori NOx					
	Sensori CO ₂					
	Opacimetri				<input checked="" type="checkbox"/>	
Sistema di Rivelazione Segnalazione Incendio	Rivelatori Fumi				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Sensori CO				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Sensori CO ₂					
	Opacimetri				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Rivelatori Gas Tossici					
	Telecamere				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Sensori Termici		Interni		Lineari	
		Esterni				
Sistema di Allarme Incendio	Manuale				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Automatico				<input checked="" type="checkbox"/>	

Tabella 36: scheda galleria n.5 – sistemi di sicurezza – parte 3

Gruppo IV				
Parametri di Sicurezza	Misure	Sistemi di sicurezza	Requisiti Minimi di Sicurezza	
Monodirezionale a doppia canna $2000 < TGM < 10000$ [Veic/corsia] $L(1000 - 3000)$ [m]	Misure Strutturali		Dislivelli $\leq 5\%$	
			Banchine pedonabili di emergenza	
			Uscite di emergenza ogni 500 m	
			Drenaggio liquidi infiammabili e tossici	
			Resistenza al fuoco delle strutture	
	Misure Impiantistiche	Illuminazione		Illuminazione Ordinaria
				Illuminazione Sicurezza
				Illuminazione Emergenza
		Ventilazione		Ventilazione meccanica longitudinale
				Altoparlanti
		Comunicazione		Messaggi radio agli utenti
				Ritrasmissioni radio
				Stazioni di emergenza
		Rilevazione		Rilevamento automatico incidenti
				Rilevamento automatico incendi
				Telecamere
		Gestione Incendio		Estintori
				Erogazione idrica
		Gestione Traffico		Idranti ogni 250 m
				Segnaletica stradale
Alimentazione elettrica		Semafori prima degli ingressi		
		Alimentazione elettrica Ordinaria		
		Alimentazione elettrica di emergenza		
		Resistenza e reazione al fuoco dei componenti dei sistemi di sicurezza		

Tabella 37: Requisiti Minimi Obbligatoriosi della classe di appartenenza (ex Allegato 2 D. Lgs. 264/2006)

Denominazione	Galleria Clap Forat
Tipologia struttura	Galleria a due canne su autostrada extraurbana
Lunghezza [m]	1686
Numero corsie per senso di marcia	23
Volume di traffico [v/giorno corsia]	> 2000 (2900 circa)
Percentuale veicoli pesanti [%]	25-35%
Interdistanza tra le vie di fuga [m]	600
Deficit di requisiti minimi	-

Tabella 38: scheda di sintesi elementare

La raccolta fotografica di seguito evidenzia i caratteri salienti della struttura.

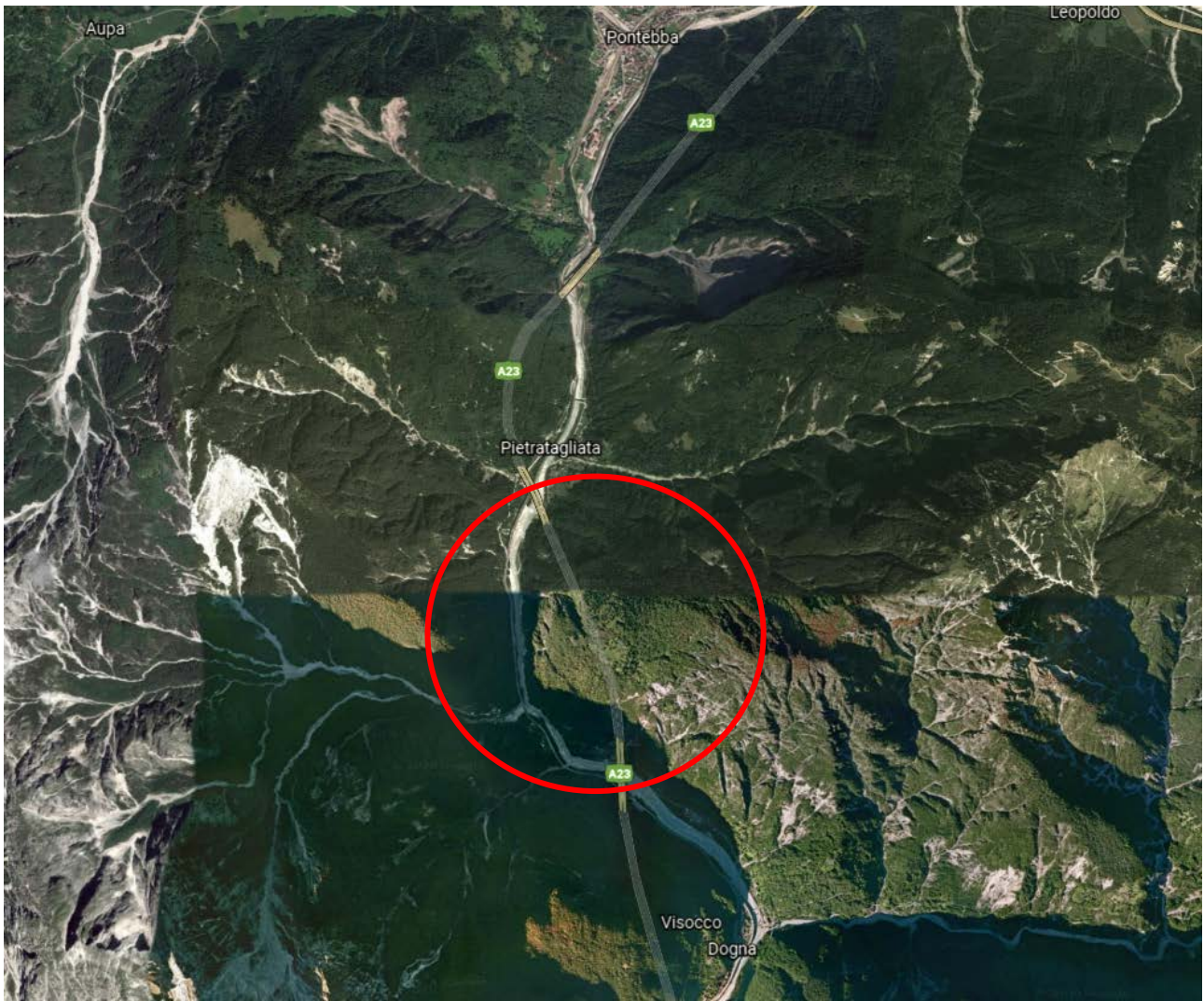


Figura 86: aerofoto della tratta comprendente la galleria



Figura 87: Vista interna canna direzione NORD



Figura 88: imbocco SUD della canna NORD



Figura 89: imbocco NORD della canna SUD



Figura 90: bypass interno e vista della coppia di ventilatori di testa

5.2 Dati statistici per la qualificazione dei tassi di incidente

Per quanto verificato nel DB della Commissione delle Gallerie Stradali presso il CSLPPP, per la galleria Clap Forat non risultano eventi di incidente o anomalia comunicati dal gestore negli anni 2008-2015. E' tuttavia stato verificato che la BD non può essere considerata completa.

Nel DB degli incidenti in galleria compilato dai Gestori e relativo agli anni 2006-2009 risultano invece accaduto 1 incendio, 1 incidente grave e 11 incidenti lievi. Sulla base di tali evidenze, è possibile stimare tassi di accadimento di prima approssimazione e di seguito riportati.

Denominazione	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no; 1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l
CLAP FORAT A23	2	1686	2988	0,34	2	A23	0	0,40	0,59	524	0	1	1	1	11
													tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l
													3,40E-08	3,40E-08	3,74E-07

Tabella 39: dati di incidente galleria Clap Forat – anni 2006 – 2009 – DB Gestori

Tale stima, che sarebbe comunque centrata (e quindi restituirebbe uno stimatore di buone qualità intrinseche) è certamente poco affidabile in ragione della scarsa numerosità dei valori assoluti. Al fine di migliorare la qualità della stima si applica quindi il metodo di allargamento campionario esperto, di seguito applicato.

5.3 Allargamento del campione di stima

L'allargamento del campione di stima degli indicatori di incidente può essere ottenuto sulla base di verificate analogie tra le strutture di una rete.

Sulla base di quanto evidenziato negli studi dei capitoli precedenti, il criterio di verifica dell'analogia può essere costituito:

- Dall'appartenenza a tratte stradali a incidentalità media simile;
- Dalla esistenza di simili condizioni di struttura, con riferimento a conformazione della sezione (numero di corsie e loro larghezza, banchine / corsie d'emergenza), andamento planoaltimetrico, tipologia della pavimentazione, sistema di illuminazione e allestimento di migliore visibilità; il buon esito di tale verifica è favorito dalla coeva progettazione / costruzione delle gallerie facenti parte della medesima tratta autostradale;
- Dall'esistenza di simili condizioni di traffico in attraversamento della struttura, e in particolare con riferimento a TGM, flussi di punta, stagionalità, percentuale di pesanti.

Queste due fasi di verifica del criterio di sufficiente analogia tra strutture sono proposte in serie, procedendo ad una applicazione dei criteri di verifica sulle caratteristiche strutturali, e procedendo quindi a verifica dell'analogia sui parametri del traffico.

Sulla base dei dati I.STAT georiferiti e delle valutazioni di merito sulle caratteristiche strutturali delle gallerie della tratta, si verifica la possibilità di proporre una stima dell'incidentalità tipica della galleria a partire dall'incidentalità di tutte le gallerie insistenti sulla tratta omogenea per caratteristiche salienti.

Allo scopo si propone una prima analisi dei dati georiferiti e disponibili su I.STAT condotta con logica esterna (quindi puramente statistica) e quindi implementata da considerazioni di logica interna (di merito tecnico). Si procederà inoltre alla verifica dell'omogeneità dei parametri caratterizzanti la pericolosità (a partire da quelli che hanno dimostrato una primaria influenza sugli eventi occorsi di incidente ed incendio come risultanti nel DB dei dati dei Gestori).

5.3.1 Dati I.STAT

Sulla base delle serie storiche degli eventi assoluti riferiti ai singoli Km della tratta autostradale (che si sviluppa dalla progressiva 0.00 in corrispondenza della diramazione dalla Torino – Trieste, e arriva al Km 119.9 in corrispondenza della barriera di Dogana presso Tarvisio), sono ottenuti gli istogrammi di intensità assoluta (n. eventi) di seguito rappresentati.

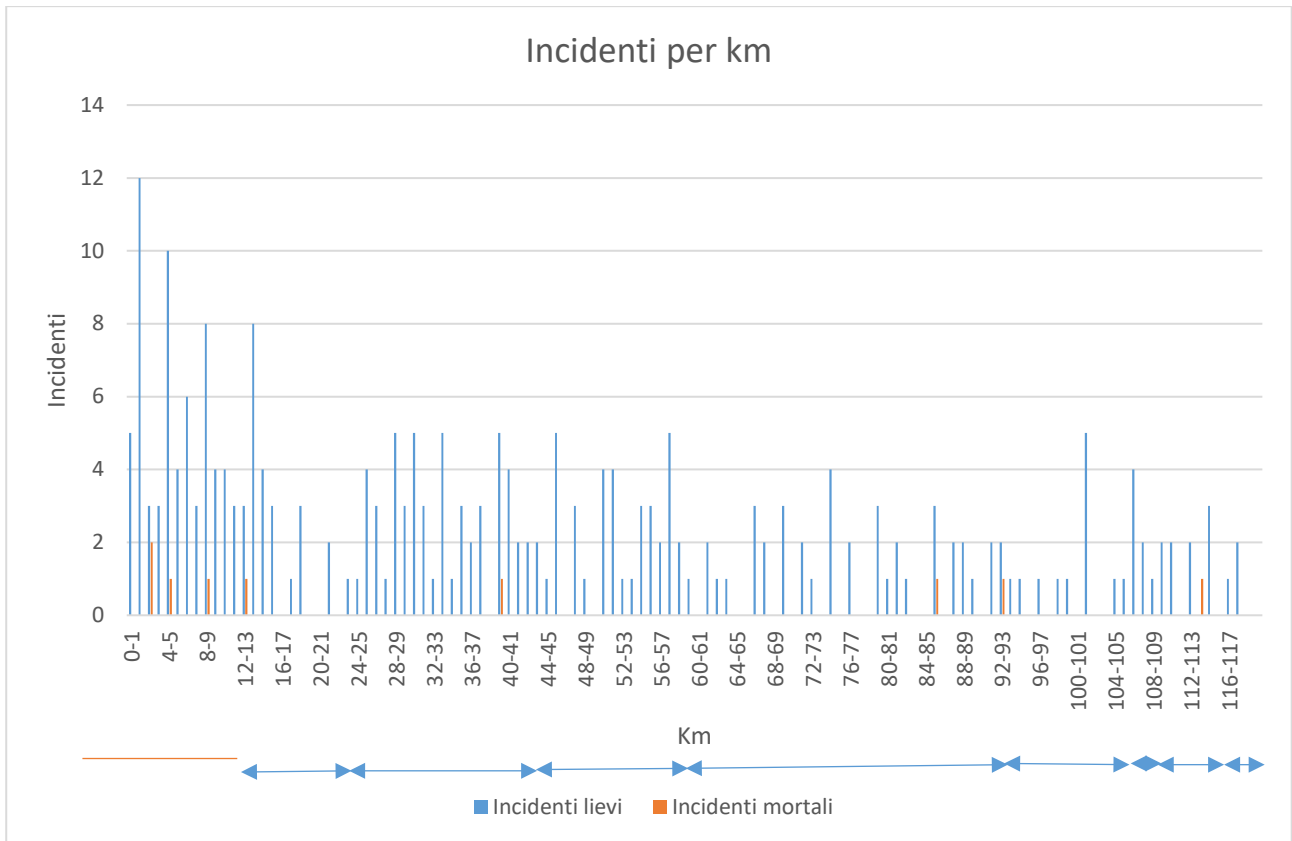


Figura 91: sviluppo della progressiva chilometrica della intera tratta e rappresentazione degli incidenti georiferiti disponibili

La raccolta I.STAT presenta, con evidenza già grafica, significativa differenza di incidentalità tra la prima tratta (individuata con un segmento orizzontale rosso) e le successive. Le tratte tra casello e casello sono individuate dalle doppie frecce orizzontali riportate in basso nella figura. Per logica interna sono inoltre verificabili alcune singolarità del tracciato in corrispondenza della tratta dal km 105 in poi, essendo presenti due uscite ravvicinate e condizionamenti del traffico dovuti alla attività di dogana presenti.

Sulla base di quanto detto, al fine di confrontare con maggior dettaglio i valori di incidentalità tipici delle tratte, sono riportate le tabelle di seguito.

Tratto 1: connessione A4 - Udine Sud	
Gallerie	0
Inc. totali	80
Inc. Mortali	5
L	15
Tratto 2: Udine Sud - Udine Nord	
Gallerie	0
Inc. totali	15
Inc. Mortali	0
L	11
Tratto 3: Udine Nord - Gemona Osoppo	
Gallerie	0
Inc. totali	51
Inc. Mortali	1
L	19
Tratto 4: Gemona Osoppo - Carnia	
Gallerie	2
Inc. totali	35
Inc. Mortali	0
L	15
Tratto 5: Carnia - Pontebba	
Gallerie	8
Inc. totali	40
Inc. Mortali	2
L	33
Tratto 6: Pontebba - Valbruna	
Gallerie	1
Inc. totali	10
Inc. Mortali	0
L	11
Tratto 7: Valbruna - Tarvisio Sud	
Gallerie	0
Inc. totali	8
Inc. Mortali	0
L	4
Tratto 8: Tarvisio Sud - Tarvisio Nord	
Gallerie	2
Inc. totali	10
Inc. Mortali	1
L	7
Tratto 9: Tarvisio Nord - Dogana	
Gallerie	0
Inc. totali	3
Inc. Mortali	0
L	5

Tabella 40: dettaglio degli incidenti per tratte casello - casello

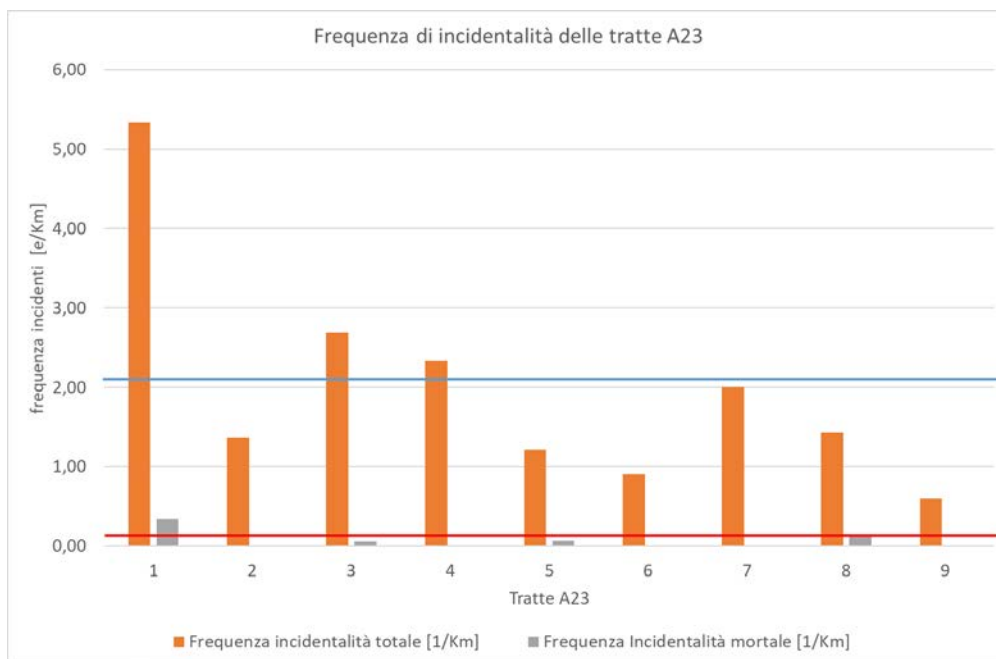


Figura 92: frequenza chilometrica di incidentalità delle singole tratte casello – casello – A23

Si evidenzia quindi che la tratta 1 presenta frequenza incidentale per Km molto più elevata del resto della tratta.

Si esplicita inoltre, per logica interna, che la tratta 2 (Udine sud, Udine nord) presenta caratteristiche di traffico non associabile alla tipologia extraurbana, e si confermano le condizioni di esercizio speciali che caratterizzano le tratte 8 e 9.

Sulla base di tali evidenze, residuano in quanto meritevoli di interesse le tratte da 3 a 7. Va inoltre evidenziato che le tratte 3 e 7 sono prive di gallerie, e quindi ad esse non è significativo applicare il principio di allargamento campionario.

Ciò detto, l'analisi si focalizza sulle tratte da 4 a 6.

Delle 3 tratte in analisi è riportato il dettaglio del tasso di incidentalità, avendo operato la normalizzazione sul numero di veicoli transitanti (dati ASPI).

Tratta	4	5	6
Tasso incidentalità totale [mln veicKm]	0,607481	0,501498	0,376591
Tasso Incidentalità mortale [mln veicKm]	0	0,025075	0

Tratta	
Indice di incidentalità totale medio tratte 4-6 [mln veicKm]	0,519
Indice di incidentalità mortale medio tratte 4-6 [mln veicKm]	0,012

Tabella 41: tasso di incidentalità delle singole tratte omogenee – A23

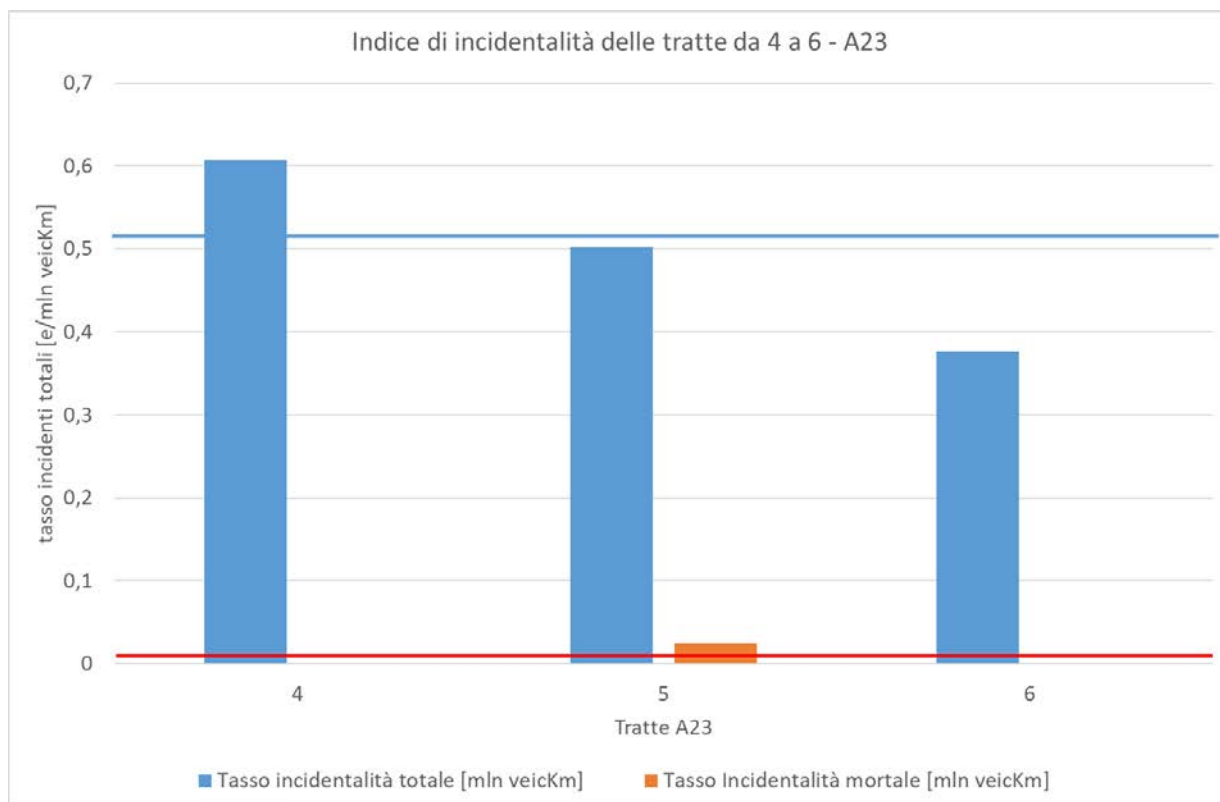


Figura 93: tasso di incidentalità delle singole tratte omogenee – A23

Dal punto di vista statistico e per logica interna (con particolare riferimento agli elementi funzionali della strada) l'incidentalità delle tre tratte può essere considerata operativamente simile.

Ne deriva che sono rispettate le condizioni preliminari necessarie alla verifica dell'analogia delle gallerie insistenti sulle tre tratte in analisi, operando le verifiche sui parametri di struttura e di traffico.

5.3.2 Verifica di omogeneità delle gallerie delle tratte 4-6

Al fine di poter considerare campione omogeneo l'intero gruppo di gallerie comprese nelle tratte 4, 5 e 6, si richiama l'elenco delle variabili strutturali, funzionali e di traffico che è stato verificato nei costrutti regressivi (vedi Allegato 4).

Sottocampione	Variabile dipendente	Variabili indipendenti con correlazioni significative verso la variabile dipendente	Variabili indipendenti che sostengono il costrutto di regressione multipla	Varianza spiegata
Incidenti Lievi	Eventi di incidenti lievi	Canne, L, TGM_corsia, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza	TGM_corsia, Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza, Corsia_Em, curv_max	50,30%
Incidenti gravi	Eventi di incidenti gravi	Canne, TGM_corsia, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Quota	TGM_corsia, Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza, Corsia_Em, curv_max	55,60%
Incendi	Eventi di incendio	L , TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), Corsie	Esposizione, TGM_corsia, % Pesanti, Corsie	35,60%
Incendi	Tasso di incendio	TGM_corsia , TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez)	TGM_sezione , Pendenza	14,20%

Legenda: le variabili con correlazione significativa riportate in rosso nella terza colonna non risultano ricomprese nel costrutto di regressione della quarta colonna; le variabili sottolineate nella quarta colonna sono risultate significativamente partecipanti al costrutto regressivo pur non avendo, singolarmente nei confronti della variabile indipendente, evidenziato significatività accettabile.

Tabella 42: risultati delle analisi di correlazione semplice e regressione multipla applicate al campione Gestori 2006 – 2009

Con riferimento al tracciato da Gemona a Valbruna, le gallerie presenti sono riportate nella tabella seguente. La tabella riporta inoltre i valori dei parametri individuati nelle analisi di regressione come rilevanti nella genesi dell'incidentalità e caratterizzanti le singole strutture.

Tratta	Galleria	canne	lunghezza	TGM_corsia	TGM_sezione	Esposizione	% pesanti	Corsie	pendenza	Corsia em	Curv_max
		[-]	[m]	[veic/gg]	[veic/gg]	[veicKm/Y]	[-]	[-]	[%]	[stringa]	[1/Km]
4	LAGO	2	1548	2630	10520	5,94E+06	23,72	2	0,00	No	0,50
4	MENA	2	330	2630	10520	1,27E+06	23,72	2	3,00	No	0,00
5	CAMPIOLO	2	852	1655	6620	2,06E+06	29,31	2	1,88	No	0,83
5	MOGGIO UDINESE	2	1570	1655	6620	3,79E+06	29,31	2	0,83	No	0,83
5	ZANNIER	2	1502	1655	6620	3,63E+06	29,31	2	1,73	No	0,50
5	RACCOLANA	2	1411	1655	6620	3,41E+06	29,31	2	0,43	No	1,67
5	DOGNA	2	1596	1655	6620	3,86E+06	29,31	2	1,57	No	0,33
5	CLAP FORAT	2	1661	1655	6620	4,01E+06	29,31	2	0,59	No	0,40
5	PIETRATAGLIATA	2	1362	1655	6620	3,29E+06	29,31	2	0,29	No	1,25
5	PONTEBBA	2	2248	1655	6620	5,43E+06	29,31	2	1,11	No	0,00
6	ARTIFICIALE	1	50	1653	6612	1,21E+05	30,91	2	0,00	No	0,00
6	PAGONIA	2	953	1653	6612	2,30E+06	30,91	2	0,00	No	1,25

Tabella 43: collezione dei valori dei parametri caratterizzanti i modelli generativi dell'incidentalità per tutte le gallerie delle tratte 4, 5 e 6 della A23

Dai dati collezionati nella tabella si evince che, con riferimento alle caratteristiche definite come rilevanti a seguito delle analisi di regressione fatte, la tratta 4 presenta un TGM di corsia significativamente maggiore a quello delle tratte 5 e 6 (oltre il 50% più elevato). Ciò determina che le gallerie della tratta 4 non saranno considerate facenti parte del campione.

Per quanto riguarda le altre strutture (tratte 5 e 6), con l'eccezione singolare della galleria Artificiale (di lunghezza inferiore ai 500 m e quindi estranea al campo di applicazione del D. Lgs. 264/2006), tutte le altre strutture presentano parametri distribuiti nei range indicati nella tabella seguente.

		Minimo	Massimo
canne	[-]	2	2
lunghezza	[m]	852	2248
TGM_corsia	[veic/gg]	1653	1655
TGM_sezione	[veic/gg]	6612	6620
Esposizione	[veicKm/Y]	2,06E+06	5,43E+06
% pesanti	[-]	29,31	30,91
Corsie	[-]	2	2,00
pendenza	[%]	0,00	1,88
Corsia em	[stringa]	No	No
Curv_max	[1/Km]	0,00	1,67

Tabella 44: sottogruppo omogeneo di gallerie della A23

Il campione così definito presenta tutti i parametri coerentemente situati rispetto ai range di definizione dei range definiti come normali / speciali dall'Allegato 2 del D. Lgs. 264/2006, e in particolare:

- tutte le gallerie presentano un valore percentuale di veicoli pesanti superiore al 15%, e approssimativamente pari al 30%;
- tutte le gallerie hanno pendenza nel range di normalità, inferiore al 3%;
- tutte le gallerie presentano un andamento planimetrico sufficientemente regolare, con curve dolci e approcci con clotoide;
- le sezioni tipo delle gallerie sono identiche;

Dai dati forniti dal gestore risulta inoltre:

- che le pavimentazioni sono identicamente realizzate, con asfalto non drenante;
- che gli impianti di illuminazione sono identicamente concepiti, realizzati e mantenuti;
- e che, per quanto non rilevante ai fini della classificazione dei parametri rilevanti per la genesi dell'incidentalità (avendo invece effetto sull'evoluzione degli scenari di incidente eventualmente occorsi), tutte le gallerie selezionate presentano identiche caratteristiche impiantistiche, bypass tra le canne quali percorsi di evacuazione - intervallati a distanza di circa 600 metri nelle gallerie maggiori, o disposti circa in mezzera nelle gallerie di lunghezza inferiore a 1300 m); tutte le gallerie sono inoltre sorvegliate da un sistema di telecontrollo unico, i cui dati sono inviati ad una unica centrale di controllo presso il centro ASPI di Udine Nord.

La verifica di tali parametri consente di procedere alla verifica di omogeneità, secondo un approccio coerente ai parametri oggetto di verifica ispettiva e censiti nelle schede di ispezione secondo il Decreto Ministeriale 2/5/2012 *Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali* (cfr Capitolo 1, sezione specifica dedicata al DM 2/5/2012).

5.3.3 Identificazione del campione omogeneo di strutture per il calcolo dei tassi di incidente grave e di incendio in galleria

Sulla base delle analisi svolte, è quindi possibile confermare, per logica statistica e per verifiche svolte, la disponibilità di un campione sufficientemente omogeneo di gallerie della A23, costituito dalle strutture riportate nella tabella seguente.

Tratta	Galleria	canne	lunghezza	TGM corsia	TGM sezione	Esposizione	% pesanti	Corsie	pendenza	Corsia em	Curv_max
		[-]	[m]	[veic/gg]	[veic/gg]	[veicKm/Y]	[-]	[-]	[%]	[stringa]	[1/Km]
5	CAMPIOLO	2	852	1655	6620	2,06E+06	29,31	2	1,88	No	0,83
5	MOGGIO UDINESE	2	1570	1655	6620	3,79E+06	29,31	2	0,83	No	0,83
5	ZANNIER	2	1502	1655	6620	3,63E+06	29,31	2	1,73	No	0,50
5	RACCOLANA	2	1411	1655	6620	3,41E+06	29,31	2	0,43	No	1,67
5	DOGNA	2	1596	1655	6620	3,86E+06	29,31	2	1,57	No	0,33
5	CLAP FORAT	2	1661	1655	6620	4,01E+06	29,31	2	0,59	No	0,40
5	PIETRATAGLIATA	2	1362	1655	6620	3,29E+06	29,31	2	0,29	No	1,25
5	PONTEBBA	2	2248	1655	6620	5,43E+06	29,31	2	1,11	No	0,00
6	PAGONIA	2	953	1653	6612	2,30E+06	30,91	2	0,00	No	1,25

Tabella 45: campione ridotto finale – gallerie omogenee della A23

Al fine di ricavare i tassi relativi al km generico di galleria si procederà quindi all'estrazione degli incidenti di tratta riferiti a queste strutture come riportati nel campione di miglior dettaglio disponibile, individuato nel DB gestori anni 2006 – 2009. Evidentemente il valore ricavato sarà rappresentativo di tempo passato, e i risultati ottenuti non potranno considerarsi adeguati ai fini della classificazione della sicurezza di struttura. Va tuttavia evidenziato che lo scopo strategico del lavoro proposto è nella definizione di un metodo esperto e coerente alle previsioni dell'Allegato 3 del D. Lgs. 264/2006, e tale applicazione è proposta solo a scopo illustrativo.

Ciò detto, i valori ricavabili per le strutture sono riportati nella tabella di seguito, ottenuta dall'estrazione parziale dei dati rispetto a quella di tratta generale presentata nell'Allegato 4.

A23							
Denominazione	Incendi	Incid_g	Incid_I	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_I	tasso_incid_tutti
CLAP FORAT DX A23	1	1	11	3,4E-08	3,4E-08	3,74E-07	4,08E-07
CAMPIOLO DX	1	1	10	6,86E-08	6,86E-08	6,86E-07	7,54E-07
DOGNA DX A23	0	3	6	-	1,08E-07	2,15E-07	3,23E-07
MOGGIO UDINESE DX A23	0	0	9	-	-	3,22E-07	3,22E-07
PAGONIA DX A23	0	3	5	-	1,77E-07	2,94E-07	4,71E-07
PIETRATAGLIATA DX A23	1	3	7	4,34E-08	1,3E-07	3,03E-07	4,34E-07
PONTEBBA DX A23	1	2	12	2,52E-08	5,04E-08	3,02E-07	3,53E-07
RACCOLANA DX A23	0	5	10	-	2,05E-07	4,1E-07	6,15E-07
ZANNIER DX A23	0	0	4	-	-	1,58E-07	1,58E-07
Lunghezza totale	13164						
TGM medio (ponderato)	2982						
tasso di incendio medio [e/veic.Km]	6,98E-08						
tasso di incidente grave medio [e/veic.Km]	3,14E-07						
tasso di incidente lieve medio [e/veic.Km]	1,29E-06						
casi incendio	4						

Tabella 46: tassi incidentali calcolati sulla base dati del campione ridotto di gallerie omogenee

Sulla base di tali tassi saranno quindi ricavati i valori attesi delle frequenze di accadimento degli eventi iniziatori degli alberi risolutivi dell'analisi di rischio.

5.4 Struttura ETA

5.4.1 Traffico registrato, modello di accadimento per fasce di traffico e modello di accadimento a seguito di incidente

La galleria Clap Forat, in quanto inserita nella tratta Carnia – Pontebba, è stata oggetto di rilevazione del traffico in transito per complessivi 6 mesi, dalle 0.00 del 1/7/2013 alle 24.00 del 31/12/2013.

La rilevazione ha raccolto i dati di transito in termini di passaggi su ciascuna delle due carreggiate in intere ore, suddivisi per tipologia veicoli (leggeri e pesanti).

I grafici seguenti riportano l'andamento delle frequenze registrate nei giorni feriali (lun-ven) e nei giorni prefestivi e festivi (sab-dom), ottenuto con lo stesso approccio.

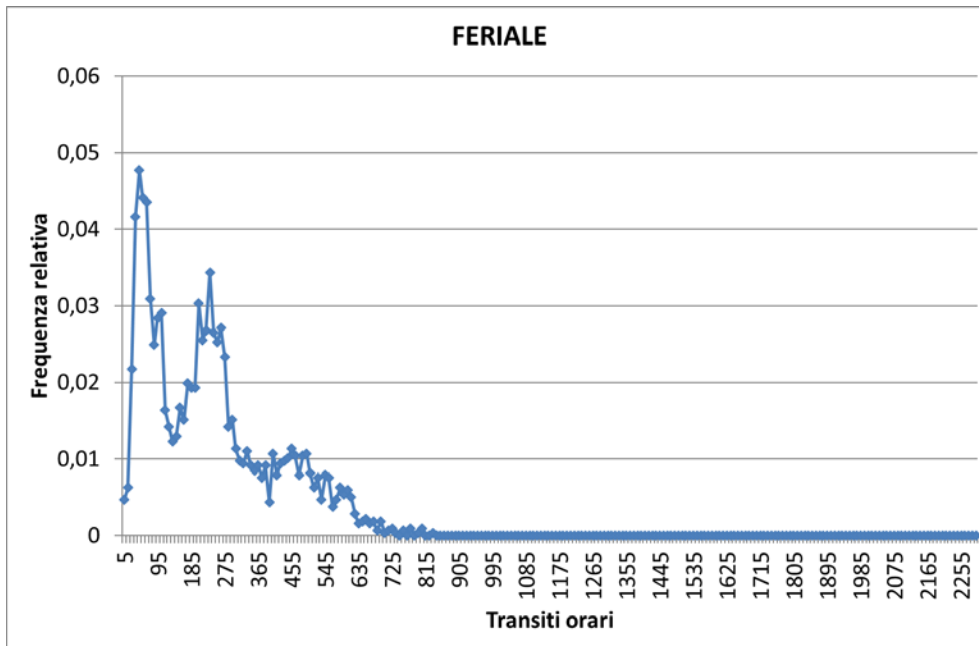


Figura 94: intensità del flusso veicolare (1 ora di rilevazione) nel giorno feriale

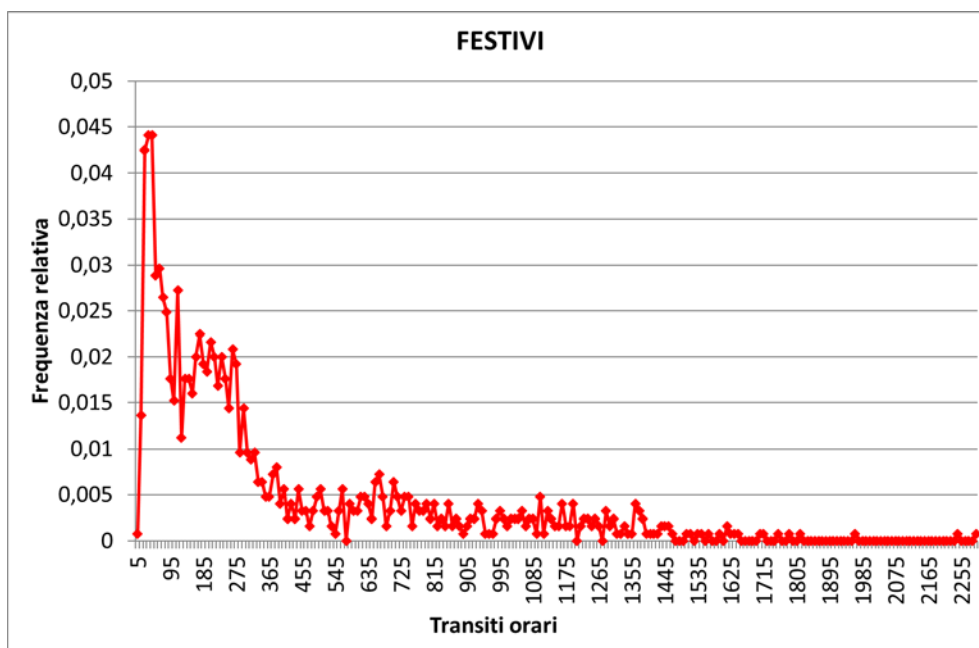


Figura 95: intensità del flusso veicolare (1 ora di rilevazione) nel giorno festivo

I dati di transito sono stati quindi condensati su intervalli omogenei di ampiezza 100, in modo da ottenere una rappresentazione più chiara e con lo scopo di restituire classi di densità veicolare dei transiti (riferiti alla generica canna) indirizzati al trattamento successivo e al calcolo delle code e delle frequenze attese incidentali specifiche per fasce di traffico. I grafici cumulati relativi sono di seguito riportati.

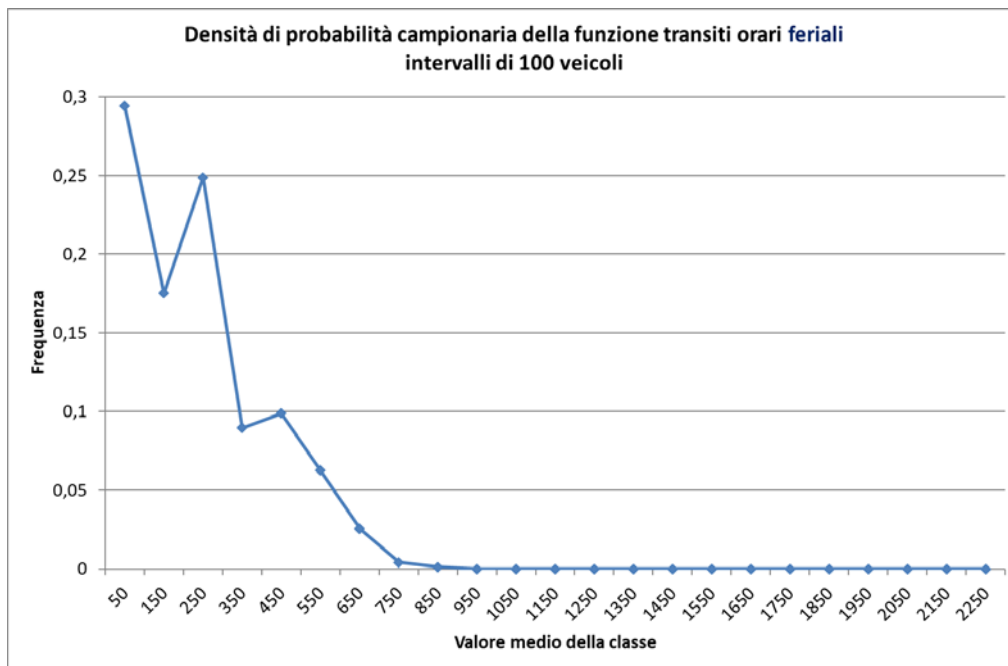


Figura 96: densità di probabilità campionaria della funzione transiti orari relativi al giorno feriale – classi di ampiezza 100 veicoli

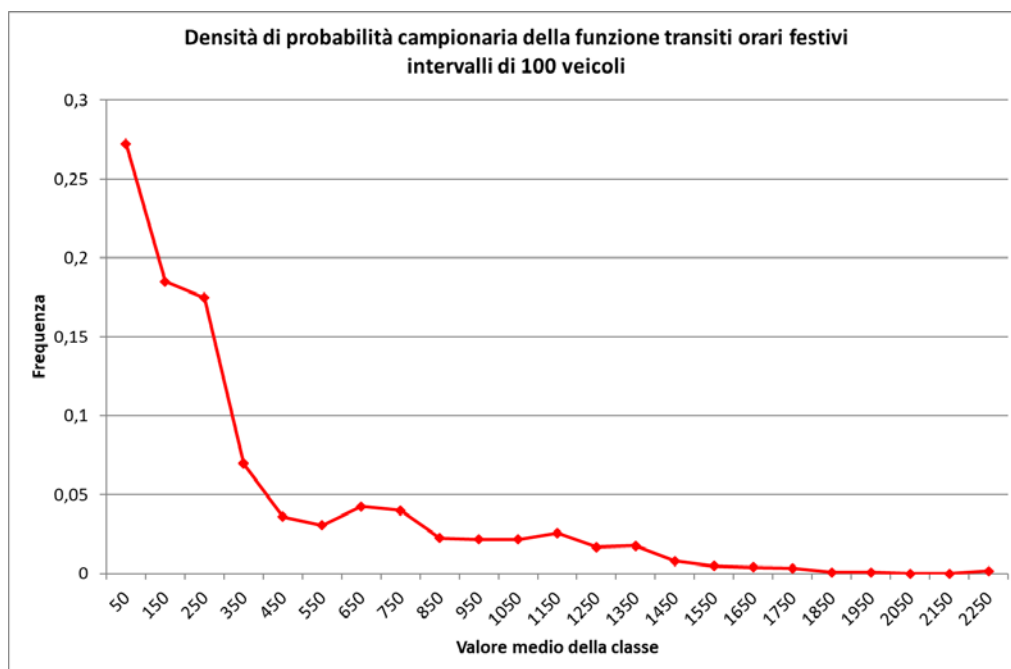


Figura 97: densità di probabilità campionaria della funzione transiti orari relativi al giorno festivo – classi di ampiezza 100 veicoli

Sulla base delle analisi proposte verrà assunto, con procedura razionale, il modello di formazione della coda di calcolo per quindi arrivare alla determinazione del numero di esposti e della loro distribuzione spaziale rispetto al punto di incidente. Si evidenzia infatti che, come dimostra l'articolo di Lu et al (2013) – e come d'altronde è evidente alla ragione - la distribuzione degli incidenti segue la distribuzione del flusso veicolare, essendo, almeno in prima approssimazione, equamente distribuita sull'occasione incidentale (corrispondente al numero di veicoli transitanti nell'unità di tempo).

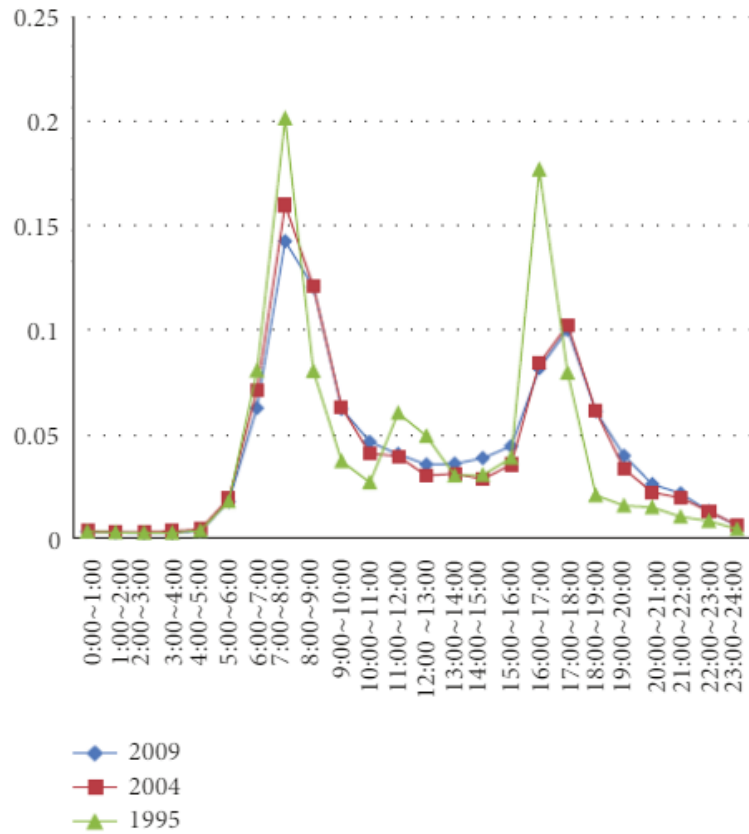


FIGURE 4: Hourly profiles of trips.

Figura 98: evidenza di Lu et al (2013) circa la corrispondenza tra intensità del flusso veicolare e accadimento incidentale (1)

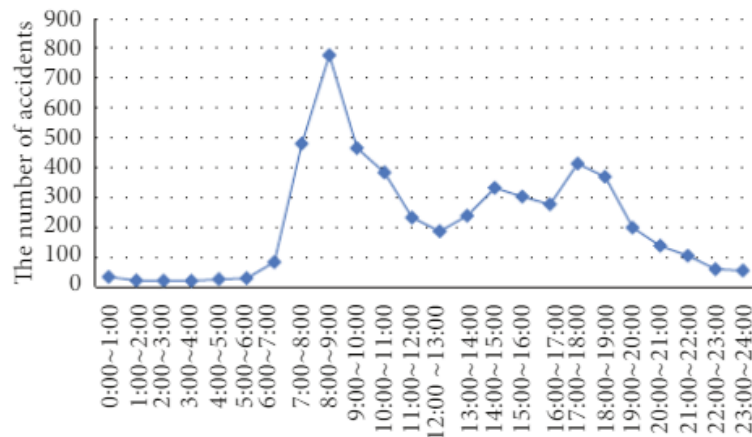


FIGURE 5: Hourly distributions of traffic accidents.

Figura 99: evidenza di Lu et al (2013) circa la corrispondenza tra intensità del flusso veicolare e accadimento incidentale (2)

Dal punto di vista analitico, infatti, è assunto che:

$$f_{i,j} = \frac{N_{veic,j}}{\sum_j N_{veic,j}}$$

Essendo j la fascia di condensazione dei transiti.

Da tale presupposto discende la tabella e il grafico di seguito riportati, che evidenziano la relazione tra la PDF dei transiti e quella dell'incidentalità in funzione delle fasce di intensità del traffico.

int. Traff	f(int.Traff.)	tot veicoli medi annui per classe di intensità	freq. Inc.
50	0,294	46600	0,063
150	0,175	83250	0,112
250	0,249	197000	0,266
350	0,090	99400	0,134
450	0,099	140850	0,190
550	0,063	108900	0,147
650	0,026	52650	0,071
750	0,004	9750	0,013
850	0,001	3400	0,005
950	0,000	0	0,000
1050	0,000	0	0,000
1150	0,000	0	0,000
1250	0,000	0	0,000
1350	0,000	0	0,000
1450	0,000	0	0,000
1550	0,000	0	0,000
1650	0,000	0	0,000
1750	0,000	0	0,000
1850	0,000	0	0,000
1950	0,000	0	0,000
2050	0,000	0	0,000
2150	0,000	0	0,000
2250	0,000	0	0,000
	1	741800	1

Tabella 47: tabella delle frequenze campionarie di intensità del traffico e di accadimento incidentale per fascia di intensità

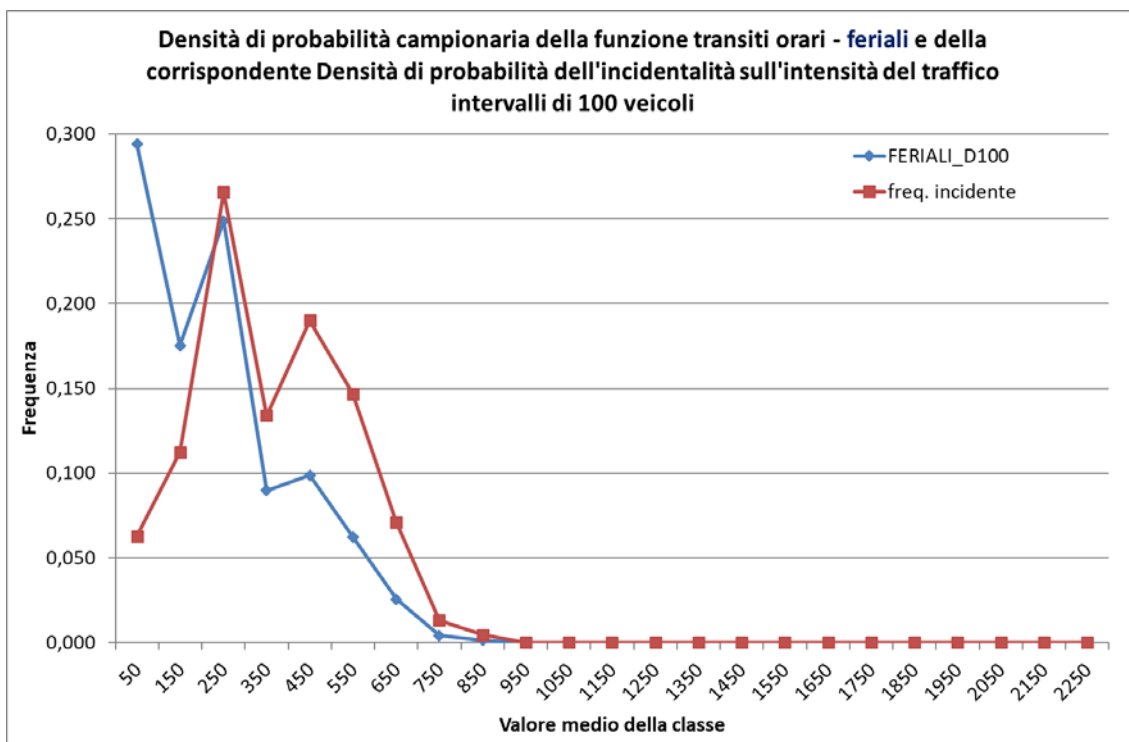


Figura 100: Confronto delle PDF delle funzioni intensità di traffico e frequenza attesa di incidente per classe di intensità del traffico

A seguito dell'incidente (sia esso tipico coinvolgente ADR, o incendio a mezzo qualunque) si determina quindi una coda di veicoli supporti impossibilitati al superamento della progressiva di incidente e composta da:

- veicoli già in entrati in galleria all'istante t_0 (istante di accadimento dell'incidente);
- veicoli in entrata successiva a t_0 e fino alla chiusura (efficace) dei fornici (con attivazione del rosso fisso dell'impianto semaforico).

5.4.2 Probabilità di incidente in galleria

Sulla base delle valutazioni proposte, considerando la quota di ripartizione tra tipologie di mezzi che compongono il traffico della struttura, e ipotizzando che nella quota pesante sia presente il 6.3% di veicoli trasportanti merci ADR, risultano individuate le frequenze attese annue di incidente rilevante in galleria, sia con riferimento allo scenario di incendio che con riferimento allo scenario di rilascio di materiale pericoloso.

In particolare, sarà quindi:

- $f_{y,s}(\text{incendio}) = f_{veic}(\text{incendio}) \times TGM_{corsia} \times N_{corsie} \times 365 \times L_s$
- $f_{y,s}(\text{incendio_rilevante}) = f_{y,s}(\text{incendio}) \times f_{ril}$
- $f_{y,s}(\text{incidente coinvolgente ADR}) = f_{veic}(\text{incidente grave}) \times \%_{pesanti} \times \%_{ADR} \times TGM_{corsia} \times N_{corsie} \times 365 \times L_s$

I valori ottenuti per la galleria Clap Forat sono riportati nella tabella di seguito.

Lunghezza galleria	1661
TGM per corsia	1655
Frequenza attesa di incidente grave al singolo veicolo transitante per Km	3,14E-07
Frequenza attesa di incendio del singolo veicolo transitante per Km	6,98E-08
fattore riduttivo (incendi rilevanti/incendi totali)	0,05
Frequenza attesa di incendio rilevante del singolo veicolo transitante per Km	3,49E-09
% di traffico pesante	29,31
% di traffico ADR su quota pesante	6,3
Frequenza attesa annua di struttura - incendio rilevante	1,40E-02
Frequenza attesa annua di struttura - incidente grave a mezzo ADR	2,33E-02

Tabella 48: attribuzione della frequenza attesa annua dell'incendio rilevante e dell'incidente grave a mezzo ADR

5.4.3 Alberi preliminari

Sulla base di tali valori sono quindi sviluppati due alberi principali, riferiti rispettivamente al caso di incendio generico e al caso di incidente a veicoli trasportanti merci ADR.

L'albero preliminari che individua la composizione degli scenari evoluti di incendio è riportato sotto.

		Mezzi coinvolti		Potenza di picco		Scenario finale	P
		una autovettura isolata		Q=10MW			
		71%				Incendio Q=10 MW	70,7%
Incendio				Q=30MW			
P=1				80,0%		Incendio Q=30 MW	23,4%
		Più autovetture o mezzi pesanti		Q=50MW			
		29%		14,5%		Incendio Q=50 MW	4,2%
				Q=100MW			
				5,5%		Incendio Q=100 MW	1,6%
Fonte:		Dati di composizione del traffico		Elaborazione PIARC			

Figura 101: albero preliminare per l'individuazione degli scenari evoluti di incendio in galleria

L'albero relativo all'evento incidentale occorrente a mezzi trasportanti ADR, stimati nella quota del 6.3% (dato medio nazionale pluriennale secondo ISTAT), è costituito dalla scenarizzazione *Destination* presentata nel capitolo 2.

Si determina quindi l'applicazione della ripartizione di scenario della tabella seguente.

Sostanza/ scenario	Tipologia contenitore	Evoluzione scenario	Perdita lieve	Perdita grave
1-A	pressurizzato	innesco immediato gas infiammabile	4,50E-03	5,00E-04
2-J	pressurizzato	dispersione gas comburente	9,00E-03	1,00E-03
3-K	pressurizzato	dispersione gas asfissiante	9,00E-03	1,00E-03
4-B	pressurizzato	innesco ritardato vapori infiammabili	1,80E-03	2,00E-04
4-L	pressurizzato	dispersione gas tossico	6,84E-03	7,60E-04
4-N	pressurizzato	rilascio in fase liquida	3,60E-04	4,00E-05
5-C	pressurizzato	innesco ritardato vapori infiammabili	3,15E-03	3,50E-04
5-D	pressurizzato	innesco immediato vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
5-E	pressurizzato	fire ball da vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
6-C	pressurizzato	innesco ritardato vapori infiammabili	3,15E-03	3,50E-04
6-D	pressurizzato	innesco immediato vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
6-E	pressurizzato	fire ball da vapori infiammabili	1,35E-03	1,50E-04
6-L	pressurizzato	dispersione gas tossico	3,15E-03	3,50E-04
7-J	atmosferico	dispersione gas comburente	9,00E-02	1,00E-02
8-K	atmosferico	dispersione gas asfissiante	9,00E-02	1,00E-02
9-F	atmosferico	innesco liquido infiammabile	7,20E-03	8,00E-04
9-N	atmosferico	rilascio in fase liquida	8,28E-02	9,20E-03
10-H	atmosferico	innesco immediato liquido infiammabile	3,60E-03	4,00E-04
10-I	atmosferico	innesco ritardato vapori infiammabili	3,60E-03	4,00E-04
10-N	atmosferico	rilascio in fase liquida	7,87E-02	8,74E-03
11-H	atmosferico	innesco immediato liquido infiammabile	3,60E-03	4,00E-04
11-I	atmosferico	innesco ritardato vapori infiammabili	3,60E-03	4,00E-04
11-M	atmosferico	dispersione gas tossico	4,14E-03	4,60E-04
12-F	atmosferico	innesco immediato liquido infiammabile	3,60E-03	4,00E-04
12-G	atmosferico	innesco ritardato vapori infiammabili	3,60E-03	4,00E-04
12-M	atmosferico	dispersione gas tossico	4,14E-03	4,60E-04
12-N	atmosferico	rilascio in fase liquida	7,87E-02	8,74E-03

Tabella 49: frequenza attesa degli scenari di dispersione (grave e lieve) di ADR, ad esito certo dell'incidente grave al veicolo trasportante materiale pericoloso

Nonostante *Destination* presenti un solutore completo, la scelta di calcolo si è orientata verso l'utilizzo di una applicazione degli scenari *Destination* all'interno dell'ETA di calcolo, in modo da poter ottenere, sulla molteplicità di scenari di rilevanza termo – chimica disponibili, una ulteriore molteplicità – di miglior dettaglio – in relazione agli scenari di esposizione calcolati in funziona dell'accodamento atteso.

Ai fini dell'analisi di rischio in galleria, il metodo considera 27 scenari maggiori, ciascuno dei quali qualificato in 2 livelli alternativi di dispersione.

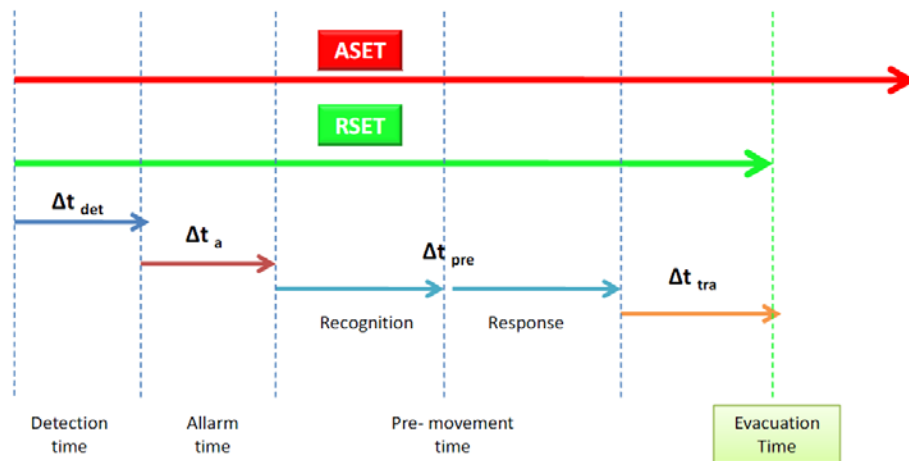


Figura 104: analisi dei tempi di evacuazione secondo la ISO/TR 16738:2009

Le simulazioni sono state condotte con l'assunzione di un *wake-up time* variabile tra 60 e 120 secondi (in funzione della rilevanza dell'incidente, e quindi con *wake-up time* ridotto in corrispondenza di incidente di maggiore gravità), e assumendo distribuzioni normali delle velocità di esodo attribuite agli agent tra 0.9 e 1.2 m/s. Tale assunzione è motivata in considerazione della buona capacità di mobilità media dell'utenza autostradale rispetto a quella, ad esempio, dell'utenza ferroviaria, per la quale il range è in genere allargato a comprendere velocità minime fino a 0.6 m/s, e considerando la relativamente breve distanza da percorrere a piedi, limitata per la presenza dei by pass a intervalli di 600 m circa.

I round simulativi, che per ogni scenario sono stati da un minimo di 3 a un massimo di 5, hanno portato alla verifica di valori di riferimento sufficientemente centrati per la stima della percentuale di letalità in funzione della potenza massima dell'incendio e della collocazione spaziale dell'incidente nella galleria. Il numero di round simulativi è stato variabile al fine di verificare la convergenza verso un range atteso di definizione del risultato in considerazione delle evidenze offerte dalle analoghe simulazioni in condizioni di funzionamento degli impianti diverse. Il valore attribuito alla funzione (una per ciascuna configurazione degli impianti rilevanti per l'autosoccorso, individuati nell'illuminazione di emergenza e nella ventilazione) è stato ottenuto dalla media dei risultati ottenuti nelle singole esecuzioni. Si è optato per questa scelta, rispetto all'alternativa disponibile di restituire funzioni approssimate sulla base dei campioni ottenuti, al fine di mantenere, per quanto mediata, la variabilità degli scenari.

A titolo esemplificativo si riporta sotto la tabella di letalità ottenuta per il caso dell'incendio di potenza di picco 100 MW.

Percentuale di letalità sul totale degli esposti in coda - incendio di 100 MW				
	ILL. OK	ILL. OK	ILL. KO	ILL. KO
Distanza dell'incidente dall'uscita più vicina [m]	VENT. OK	VENT. KO	VENT. OK	VENT. KO
50	0,68	1,13	1,89	2,27
150	1,29	2,14	3,57	4,28
250	3,00	5,00	8,34	10,01
350	4,00	6,66	11,10	13,32
450	7,35	10,50	16,20	17,10
550	12,60	13,35	18,60	23,40

Tabella 50: letalità (percentuale su esposti) ottenuta per il caso dell'incendio di potenza di picco 100 MW

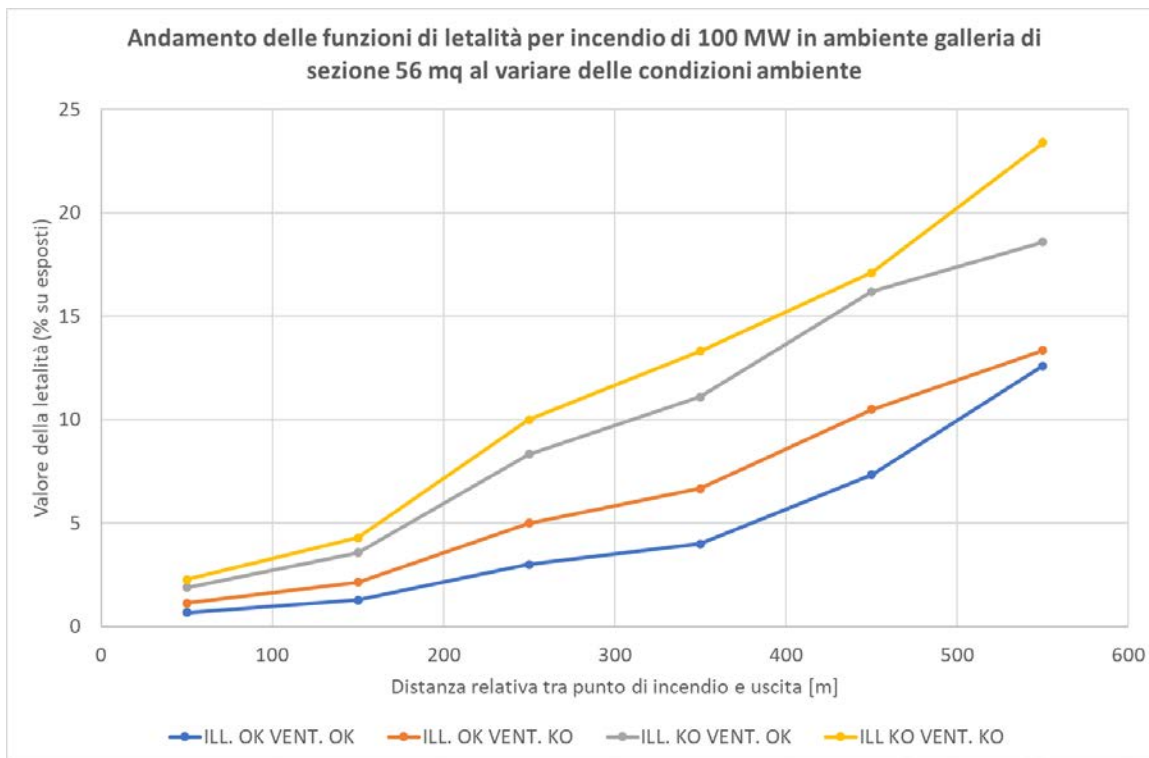


Figura 105: letalità (percentuale su esposti) ottenuta per il caso dell'incendio di potenza di picco 100 MW

5.6 Valori delle affidabilità e delle disponibilità attribuite ai sottosistemi rilevanti

L'analisi funzionale delle prestazioni dei sottosistemi è stata effettuata con approccio RAMS, conformemente a quanto evidenziato nel Capitolo 4, che comprende, a titolo esemplificativo, la stima dell'indisponibilità attesa dell'impianto di ventilazione, comprensiva dell'analisi di struttura (dai sensori agli attuatori).

Si evidenzia che le valutazioni sono state svolte sulla base degli schemi generali di impianto, e quindi attribuendo ai componenti – sulla base dell'effettivo schema funzionale del sistema – la corrispondente probabilità di guasto da l'elaborazione della banca dati disponibile (ove sufficientemente numerosi) o da letteratura (Thesaurus Oreda per IEEE, impianti elettrici, elettronici, elettronici programmabili).

L'analisi di disponibilità è stata condotta considerando l'effetto sull'impianto rilevante della disponibilità della FM e del guasto dell'impianto in se, compresa la stima dei guasti riconducibili alle cause comuni (CCF), secondo l'approccio proposto nel Capitolo 4.

Si evidenzia che gli impianti a peggiore performance presentano vulnerabilità principalmente dovuta ai tempi di intervento di manutenzione e ripristino, che sono stimati pari a 10 gg medi per l'accesso e 1 giorno medio per la riparazione, sulla base di un programma di accessi a fini di manutenzione che può avvenire solo in regime protetto rispetto al traffico veicolare.

Non risente di tale criticità la prestazione dell'impianto di illuminazione di emergenza in quanto la disponibilità di FM è garantita da doppia alimentazione e da funzione tampone di gruppi UPS e gruppi di continuità.

Sulla base delle valutazioni effettuate, con riferimento alle prestazioni attese in regime di funzionamento a chiamata, la disponibilità attesa degli impianti è risultata pari ai valori tabellati di seguito.

Chiusura imbocchi	
in 3 minuti	0,84
in 10 minuti	0,16
Disponibilità illuminazione	
Si	0,991
No	0,009
Disponibilità ventilazione	
Si	0,896
No	0,104

Tabella 51: Disponibilità degli impianti rilevanti nel condizionare l'esposizione (Sistema di chiusura imbocchi) o il flusso del pericolo (Sistema di illuminazione e sistema di ventilazione longitudinale)

Si evidenzia che in relazione ai tempi di esodo, nonché al carattere puntuale dell'installazione delle 3 coppie di ventilatori lungo la canna della singola galleria, si è ritenuto di non considerare il guasto del sistema di ventilazione indotto dalla termica dell'incendio, confidando inoltre sulla specifica previsione di norma (ex allegato 2 del D. Lgs. 264/2006) che impone un funzionamento efficiente fino a temperature ambiente di 400 °C.

5.7 Risultati

L'analisi condotta ha restituito, per la condizione effettiva studiata, una stima del Rischio Totale, o Danno Atteso, o VAD (Valore Atteso del Danno) pari a 6.54×10^{-3} vittime/anno.

La retrocumulata del danno ottenuta è rappresentata nel piano di Farmer (piano F-N) e confrontata con i criteri di accettabilità assoluta e condizionata di norma (cfr Allegato 3, D. Lgs. 264/2006).

Il risultato ottenuto è inoltre posto a confronto con la funzione F-N ricavata dagli eventi di elevata gravità effettivamente occorsi nelle gallerie autostradali del territorio italiano tra il 1980 e il 2018.

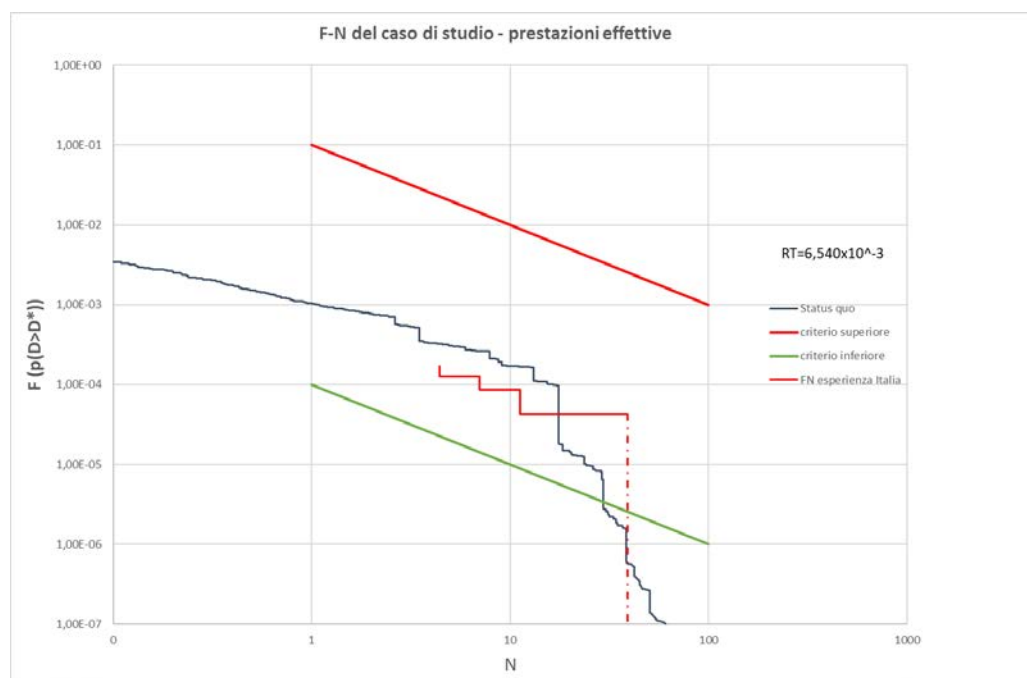


Figura 106: rappresentazione sul piano di Farmer della CCC (funzione retrocumulata del danno) e confronto con i criteri di accettazione / rifiuto e ALARP di cui al D. Lgs. 264/2006; confronto con la retrocumulata campionaria dell'esperienza italiana 1980 - 2018

L'andamento della funzione sul piano F-N segue l'inclinazione -1 dall'innesto nell'area di definizione del criterio (corrispondente alla probabilità cumulata pari a circa 10^{-3}) e fino al punto cadente corrispondente a circa $F=10^{-4}$. Nella parte successiva la retrocumulata presenta un andamento a pendenza elevata (circa -4 sul piano bilogaritmico) raggiungendo gli scenari di danno massimo atteso per il caso di studio (pari a 94 morti circa) per valori di F prossimi a 10^{-9} .

La retrocumulata interseca a valore di N circa 11 la retrocumulata campionaria.

L'andamento in parte sovrastante e in parte sottostante sembra coerente alle peculiarità della galleria trattata, che presenta una lunghezza superiore del 50% rispetto a quella della galleria media campionaria (si veda il Capitolo introduttivo); tale effetto è parzialmente compensato dalla bassa intensità di traffico della struttura; infine è da notare come, nonostante il TGM di corsia non sia elevato, la tratta in esame, e la galleria di conseguenza, presenta una quota di traffico pesante considerevole (pari a circa il 30%) con l'effetto di una corrispondente rilevanza della probabilità di accadimento degli eventi legati a dispersione di materiali pericolosi.

Il VAD ricavato può essere normalizzato sulle persone in transito annuale nella struttura, e così ricavare il valore dell'indicatore di Rischio Individuale (corrispondente alla probabilità di morte cui è soggetto il singolo utente nell'occasione del singolo transito in galleria). La tabella di seguito propone la stima in questione.

TGM di corsia [veic.]	2982
Transiti annui [veic.]	4353720
persone esposte nell'esercizio annuale [e]	9142812
Rischio individuale nel singolo transito [-]	7,15E-10

Tabella 52: Rischio individuale di struttura

Si evidenzia che tale valore, che costituisce il rischio individuale aggiunto che l'effetto galleria determina sulle persone in transito, si somma alla probabilità di morte per incidente stradale ordinario, che non è valutato per espressa previsione di norma nel caso dell'analisi delle gallerie.

Il tasso di mortalità stradale nella tratta in esame proposto dalle analisi AISCAT per l'anno 2018 è pari a circa 5×10^{-9} .

Operando una normalizzazione del rischio calcolato per la struttura al fine di un corretto confronto, risulta quindi che il rischio aggiunto determinato dalla galleria è pari al 17,8% del rischio stradale. Per la migliore comprensione del significato di tale rischio aggiunto si consideri che tale incremento certamente più che compensa quello che si avrebbe se la galleria non esistesse e il tracciato seguisse un percorso più lungo e tortuoso.

Vittime per veicoliKm - rischio aggiunto per tratta in galleria	8,91E-10
Vittime per veicoliKm - intera tratta [Bollettino semestrale 2/2018 AISCAT]	5,00E-09

Tabella 53: confronto tra tasso di mortalità per veic.Km nella tratta della A23 (dati 2018) e incremento del tasso di mortalità dovuto all'effetto galleria

Sulla base del modello di calcolo realizzato è stato inoltre possibile condurre una analisi esplorativa degli effetti sugli indicatori di rischio della variazione dei parametri caratterizzanti il sistema e delle prestazioni dei sottosistemi rilevanti.

L'analisi di elasticità del rischio è stata condotta per i parametri caratterizzanti:

- TGM: principale parametro di esposizione, oltre alla lunghezza, ma, a differenza di questa, variabile anno per anno;
- probabilità di incidente grave, cui risulta associata la probabilità dell'evento iniziatore relativo all'albero dispersione ADR;

- disponibilità ed efficacia dell'impianto di chiusura della galleria (semaforico di ingresso), che determina il numero degli esposti ai vari scenari di incidente;
- disponibilità dell'illuminazione di emergenza;
- disponibilità della funzione di ventilazione.

Ovviamente, per quanto detto al Capitolo 2, e per logica inevitabile, le variazioni di TGM – in quanto determinanti una proporzionale riduzione del moltiplicatore dei tassi di incidente calcolati per la tratta – determinano una proporzionale modifica della probabilità degli eventi iniziatori. La rappresentazione dell'effetto sul VAD della variazione di TGM è tuttavia utile a restituire un fattore di scala per commentare gli effetti dovuti alle variazioni degli altri parametri.

La tabella e il grafico di seguito riportano l'analisi di elasticità condotta.

VAD [10 ⁻³ N/Y]	delta - 20%	delta - 10%	RT Statu Quo	Delta + 10%	Delta + 20%
TGM	5,232	5,886	6,540	7,194	7,848
Incidentalità generica	5,657	6,099	6,540	6,982	7,424
U (sistema accessi)	6,375	6,458	6,540	6,623	6,706
U(illuminazione)	6,540	6,540	6,540	6,540	6,540
U(ventilazione)	6,481	6,511	6,540	6,570	6,600
variazione % del VAD	delta - 20%	delta - 10%	RT Statu Quo	Delta + 10%	Delta + 20%
TGM	-20,00	-10,00	0,00	10,00	20,00
Incidentalità generica	-13,50	-6,75	0,00	6,76	13,52
U (sistema accessi)	-2,52	-1,25	0,00	1,27	2,54
U(illuminazione)	-0,002	0,000	0,000	0,000	-0,002
U(ventilazione)	-0,91	-0,45	0,00	0,46	0,92

Tabella 54: analisi di elasticità del rischio in funzione del valore di alcuni parametri caratterizzanti il sistema galleria

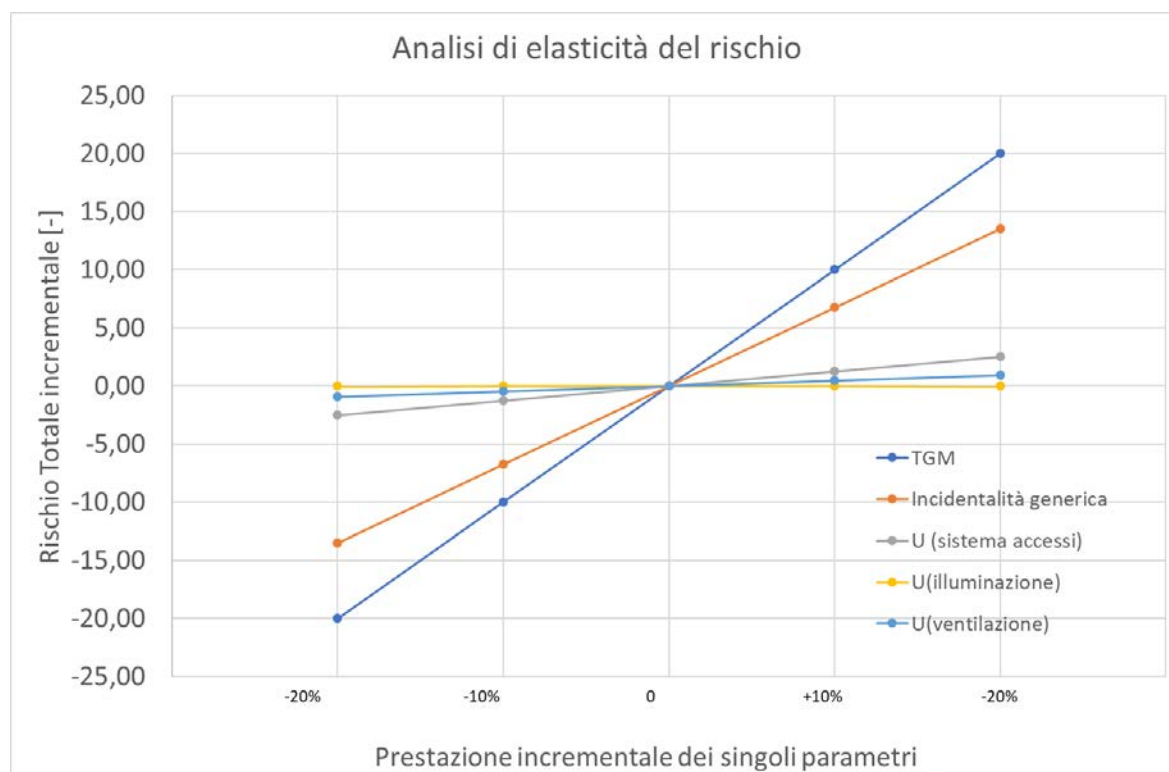


Figura 107: analisi di elasticità del rischio in funzione del valore di alcuni parametri caratterizzanti il sistema galleria

Risulta così evidente che, a parte l'ovvio effetto sul VAD del parametro di esposizione, l'efficacia incrementale che determina il miglior effetto riduttivo sul VAD è costituita dalla disponibilità (complemento a 1 della indisponibilità, U, graficata) dell'impianto semaforico di ingresso.

Si evidenzia altresì che una modifica del tasso di incidentalità tipica (nella quota grave) ha effetto rilevante sui rischi specifici della galleria in quanto determina un effetto proporzionalmente riduttivo su tutti gli scenari determinati dalla dispersione di materiali ADR.

5.8 Dichiarazione dei limiti di validità

Al fine di una qualificazione preliminare dell'affidabilità dei risultati ottenuti dall'applicazione del metodo al caso di studio, sono esplicitati i limiti di modellazione dell'analisi svolta.

Nel dettaglio, in ordine di rilevanza attesa sui risultati ottenuti:

1. L'adozione del metodo *Destination* al caso dell'ambiente confinato richiederebbe una verifica di taratura con riferimento alle distanze caratteristiche di danno riportate nel modello; la scelta del metodo per la valutazione di QRA è motivata, tuttavia, dalla possibilità di una chiara e trasparente adozione delle valutazioni di scenario ADR all'interno del sistema strutturato di QRA, e di ETA in particolare, adottato;
2. rispetto all'assunzione dei valori di velocità attribuiti agli esposti all'incendio, e quindi con riferimento all'affidabilità delle simulazioni di evacuazione (accoppiate a quelle TFD) svolte, si evidenzia che l'analisi non ha compreso esposti su mezzi collettivi (bus), e che in generale, sarebbe necessario operare una analisi di dettaglio del comportamento di questa particolare utenza che, per logica interna, risulta particolarmente esposta al rischio incendio del mezzo proprio; va osservato infatti che, in relazione a questa componente di utenza stradale, l'approccio all'esodo in caso di incidente in galleria impone la preliminare uscita ordinata dal mezzo e solo successivamente l'allontanamento dal luogo pericoloso, in analogia a quanto avviene per l'utenza ferroviaria in caso di incendio in galleria;
3. la stima degli indicatori è puramente orientativa, visto che i valori di frequenza attesa degli eventi iniziatori sono stati ricavati sulla base di dati incompleti e/o risalenti; tale vulnerabilità sarebbe rilevantissima nell'ipotesi di uno studio finalizzato ad orientare un giudizio di merito; l'effetto di tale vulnerabilità della stima non è tuttavia rilevante nelle valutazioni comparative di sistema, né nelle analisi di elasticità proposte, né tantomeno inficia lo scopo di applicazione esemplare di un modello, come nel caso in esame.

5.9 Conclusioni

L'analisi svolta dimostra che il livello di sicurezza della galleria analizzata è conforme alle richieste di norma, e presenta valori degli indicatori di rischio in linea con quanto accaduto (confronto con retrocumulata campionaria del caso italiano).

Il rischio aggiunto sul diritto alla salute e sicurezza del cittadino utente è inferiore al rischio di incidente stradale caratteristico della tratta di inserimento.

La galleria presenta prestazioni impiantistiche discrete, sostanzialmente (negativamente) condizionate dal tempo di intervento delle manutenzioni in caso di guasto. Su questi aspetti sarebbe auspicabile intervenire con opportuni miglioramenti organizzativi senza necessità di alcuna verifica di convenienza con approccio

analisi costi – benefici. Eventuali implementazioni di sistema rilevanti non sembrano, d'altronde, giustificate dalla firma di rischio del sistema.

Dal punto di vista strategico le indicazioni gestionali ricavabili dall'analisi svolta sono quindi le seguenti:

- la migliore riduzione del rischio specifico di galleria può essere ottenuta applicando alla tratta confinata le medesime strategie di prevenzione incidentale già in uso per i tronchi a cielo aperto; in particolare sarà ottenibile un beneficio tanto maggiore quanto più elevata risulterà l'incidentalità tipica della tratta; ciò indica l'ulteriore evidenza circa l'opportunità di applicare anche alle gallerie di rete TERN di lunghezza superiore a 500 m le misure di prevenzione incidentale previste dal D. Lgs. 35/2011, e in particolare il metodo fondato sul giudizio esperto attraverso ispezioni, come stabilite dal DM 2/5/2012 Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali; ciò significa che tutti gli interventi finalizzati ad una riduzione dell'incidentalità tipica generalmente validi (per quanto verificati sulla base della bibliografia disponibile e/o di dedicati studi di effetto *before-after*, costituiscono una ottima strategia di intervento;
- tra le varie prestazioni rilevanti nel determinare, in termini protettivi, efficaci effetti, la principale deve essere quella di ridurre al massimo la numerosità degli esposti agli incidenti; tale strategia, che corrisponde ad una prevenzione di secondo livello (dal punto di vista del sopraggiungente, il mancato accesso è una prevenzione alla partecipazione all'incidente), è tanto efficace quanto poco attuata, considerando che non risulta, ad oggi, alcun investimento rilevante né alcuno studio mirato finalizzato a restituire chiara efficacia al sistema di interdizione all'accesso, costituito semplicemente da semaforo all'ingresso e preceduto – non sempre – da pannelli a messaggio variabile, con l'effetto di un ragionevole superamento anche in condizione di rosso almeno da parte dei primi utenti sopraggiunti;
- per il miglioramento in genere della disponibilità delle prestazioni sarebbe fondamentale garantire un accesso in manutenzione con frequenza più elevata, considerato che la maggior quota dell'indisponibilità è proprio determinata dall'attesa dell'occasione di accesso all'impianto in guasto (nell'ordine della settimana);
- risultano d'altronde caratterizzati da elevata performance gli impianti di illuminazione, caratterizzati da elevata ridondanza nell'alimentazione e nella configurazione.

6 La rete stradale come Infrastruttura Critica

La definizione di rete stradale come infrastruttura critica ai sensi del D. Lgs. 61/2011 impone al gestore (Operatore) l'adozione di un Piano di Sicurezza che comprenda la valutazione del rischio a cui la infrastruttura è esposta, e le misure strategiche finalizzate all'incremento della resilienza.

Il presente capitolo ha quindi lo scopo di proporre, in via esplorativa, e in assenza di codificati metodi che consentano l'assolvimento degli obblighi previsti dalla norma, un metodo di analisi del rischio e della resilienza dei sistemi stradali complessi e dei singoli archi, allo scopo di verificare la possibilità di un coerente approccio tecnico a tutte le necessità di gestione della sicurezza relative alle infrastrutture stradali.

Allo scopo, si propone un preliminare inquadramento della tassonomia specifica e dei concetti ulteriori applicabili al caso e non compresi nel capitolo sui metodi di analisi di rischio, e si esplorano alcune funzioni di prestazione, di reti ed archi, con l'obiettivo di una qualificazione operazionalizzabile delle prestazioni delle reti stradali.

6.1 La Resilienza

In analogia al significato fisico, che definisce per resilienza la capacità di resistere ad un urto, un sistema si qualifica come resiliente in ragione della propria caratteristica resistenza all'impatto dinamico (sostanzialmente istantaneo, rispetto ai tempi tipici di adattamento richiesto). La resilienza (dal latino *resilire*, rimbalzare indietro) è la capacità di un sistema di rispondere, assorbire, adattarsi e riattivarsi in piena funzionalità a seguito di un evento distruttivo; il concetto comprende quindi la capacità resistente e la capacità di ripristino. Complemento logico del concetto di resilienza è quello di vulnerabilità. Nel dettaglio, intendiamo con vulnerabilità la suscettibilità di un sistema a un dato pericolo; tipicamente, dal punto di vista ingegneristico, il concetto è utilizzato per valutare la suscettibilità del sistema *pre-evento* e non tiene conto del processo di recupero.

Più specificamente, così come la misura del danno è specifica per un pericolo (e quindi la sicurezza è tale in relazione a specifici pericoli esaminati), allo stesso modo, dal punto di vista tecnico, la resilienza (e la vulnerabilità) sono specifiche per una perturbazione: ciò significa che un sistema può essere più vulnerabile o resiliente ad alcune perturbazioni piuttosto che ad altre.

La resilienza è stata introdotta per la prima volta nel mondo scientifico da Holling (1973), e successivamente il termine è apparso in altre discipline quali ecologia, psicologia e fisica, fino a tornare, con significato ampliato, all'ambito ingegneristico.

All'introduzione di nuove definizioni di resilienza hanno fatto seguito nuove ipotesi di costrutto di misura.

Nel caso applicativo riferito alle reti stradali, le prime proposte hanno visto l'ipotesi di una metrica della resilienza quale rapporto tra probabilità di guasto e misura del ripristino del sistema. Attoh-Okine (2009) ha successivamente proposto una modifica di questa formula utilizzando proprie funzioni e ha illustrato così la resilienza di una rete autostradale.

Omer (2009) utilizza una topologia di rete per proporre un approccio quantitativo per definire e misurare la resilienza di un sistema di cavi di telecomunicazione. Definisce la resilienza di base come un rapporto del valore di consegna della rete dopo l'interruzione e il valore di consegna della rete prima dell'interruzione, dove il valore di consegna è la quantità di informazioni che deve essere trasportata attraverso la rete. Tierney e Bruneau (2007) definiscono la resilienza ai disastri come la capacità delle unità sociali di mitigare i rischi, contenere l'effetto dei disastri quando si verificano e svolgere attività di recupero in modo di ridurre al minimo i disagi sociali e mitigare gli effetti di disastri futuri. Viene definito un triangolo di resilienza da un

grafico della qualità di un'infrastruttura in funzione del tempo, dove c'è improvvisa perdita di qualità seguita dal recupero nel tempo. Le misure di rafforzamento della resilienza mirano a ridurre le dimensioni di questo triangolo della resilienza.

Il primo documento che ha trattato questo concetto relativo all'infrastruttura critica è il *Critical Infrastructure Resilience: Final Report and Recommendations* (2009), ed a seguito delle definizioni accettate, si può dire che la resilienza, nel contesto dell'infrastruttura critica, rappresenta il livello di preparazione interna dei sottosistemi per eventi avversi ossia la capacità di questi sottosistemi di eseguire e mantenere le loro funzioni quando vengono influenzati negativamente da fattori interni e/o esterni, siano essi di carattere accidentali, dolosi o calamitosi.

La resilienza pertanto può essere considerata come l'opposto della vulnerabilità, cosicché sottosistemi resilienti non sono particolarmente vulnerabili e al contrario sottosistemi vulnerabili non sono particolarmente resilienti.

Dunque, durante le emergenze, i sistemi resilienti mostrano una minore diminuzione in termini di prestazioni e inoltre il tempo necessario per tornare al livello di funzionamento richiesto è indubbiamente più breve.

La resilienza di una infrastruttura critica deve essere intesa come un processo ciclico composto da quattro fasi: prevenzione, assorbimento, recupero e adattamento. La figura (Rehak, 2018) mostra un ciclo in cui si incrementa la resilienza dal suo livello iniziale (linea nera) a uno nuovo (linea rossa). La differenza tra questi due livelli, Δ , rappresenta il grado di rafforzamento della resilienza.

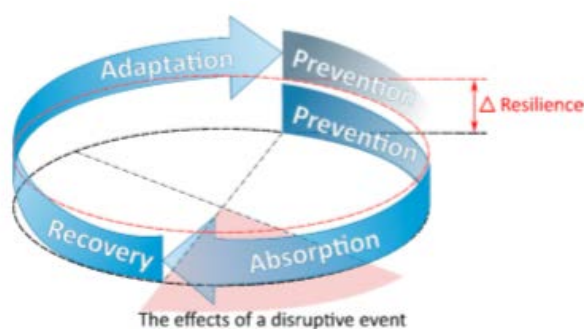


Figura 108: processo ciclico per rafforzare la resilienza dell'IC da (Rehak, 2018)

La prima fase del processo ciclico è la prevenzione: adottando misure preventive, il proprietario e/o l'operatore assicura che il sistema sia meno vulnerabile in caso di eventi futuri distruttivi. Quando si verifica un'interruzione il processo passerà dalla prevenzione all'assorbimento.

L'assorbimento consiste nella seconda fase del ciclo di resilienza. Tale fase si avvia dal momento che un sottosistema danneggiato produce un'interruzione del sistema a causa di un evento ed è determinato dalla robustezza del sottosistema dell'infrastruttura critica. La robustezza è definita come la capacità di un elemento dell'infrastruttura critica di assorbire gli effetti provocati dalla minaccia senza sostanziale alterazione del bene o servizio offerto.

Dopo che gli effetti di un evento sono esauriti, inizia la fase di recupero. Questa fase è caratterizzata dalla recuperabilità, ovvero la capacità di un sottosistema di ripristinare la sua funzione al livello richiesto di prestazione una volta dissipati gli effetti dell'emergenza. Il successo di ripristino dipende dalle risorse disponibili e dal tempo necessario per completare i singoli processi di recupero.

La fase finale del ciclo di resilienza dell'infrastruttura critica è l'adattamento, che è la capacità di un'organizzazione di adattare un sistema agli effetti di un evento dirompente, apprendendo dagli effetti degli eventi precedenti. Rappresenta quindi l'abilità di un sistema di adeguarsi ai cambiamenti. L'adattamento è determinato dai processi interni dell'organizzazione basato sul rafforzamento della resilienza, cioè in funzione della gestione del rischio e dei processi di innovazione e sviluppo.

6.1.1 Le variabili che determinano la resilienza

I fattori che determinano la resilienza degli elementi che costituiscono il sistema dell'infrastruttura critica si collocano in due aree fondamentali:

- La protezione tecnologica e fisica dei singoli elementi;
- La gestione dell'organizzazione.

La prima, nota come resilienza tecnica, dipende dalla robustezza e recuperabilità degli elementi del sistema. Queste due componenti sono condizionate da tre fattori:

- 1) La struttura tecnologica dell'elemento;
- 2) Le misure di sicurezza dell'elemento;
- 3) L'evento che influenza la resilienza.

La robustezza, come già accennato in precedenza, è la capacità di un elemento di assorbire gli impatti di un evento devastante. Questi impatti possono essere assorbiti attraverso le tecnologie utilizzate e/o la qualità strutturale dell'elemento, la robustezza strutturale, o tramite le misure di sicurezza. Le variabili che influenzano la robustezza sono le seguenti:

- Livello di preparazione alla crisi (piani, misure di protezione, e altre misure per incrementare la preparazione in caso di emergenze);
- Ridondanza (capacità di sostituire in breve tempo elementi danneggiati);
- Capacità di rilevamento (riconoscere in tempi brevi e con buona probabilità un'emergenza);
- Capacità di risposta (rispondere in tempi brevi all'emergenza e ridurre al minimo gli impatti).

La recuperabilità è la capacità di un elemento di ripristinare le sue funzioni al livello prestazionale richiesto in origine dopo che gli effetti dell'evento sono terminati. Nel caso dell'infrastruttura critica con il termine recuperabilità si intende la riparabilità degli elementi danneggiati o distrutti. Le variabili che influenzano la recuperabilità sono le seguenti:

- Risorse materiali (disponibilità dei componenti per la riparazione o sostituzione);
- Risorse finanziarie;
- Risorse umane (personale qualificato);
- Processi di recupero.

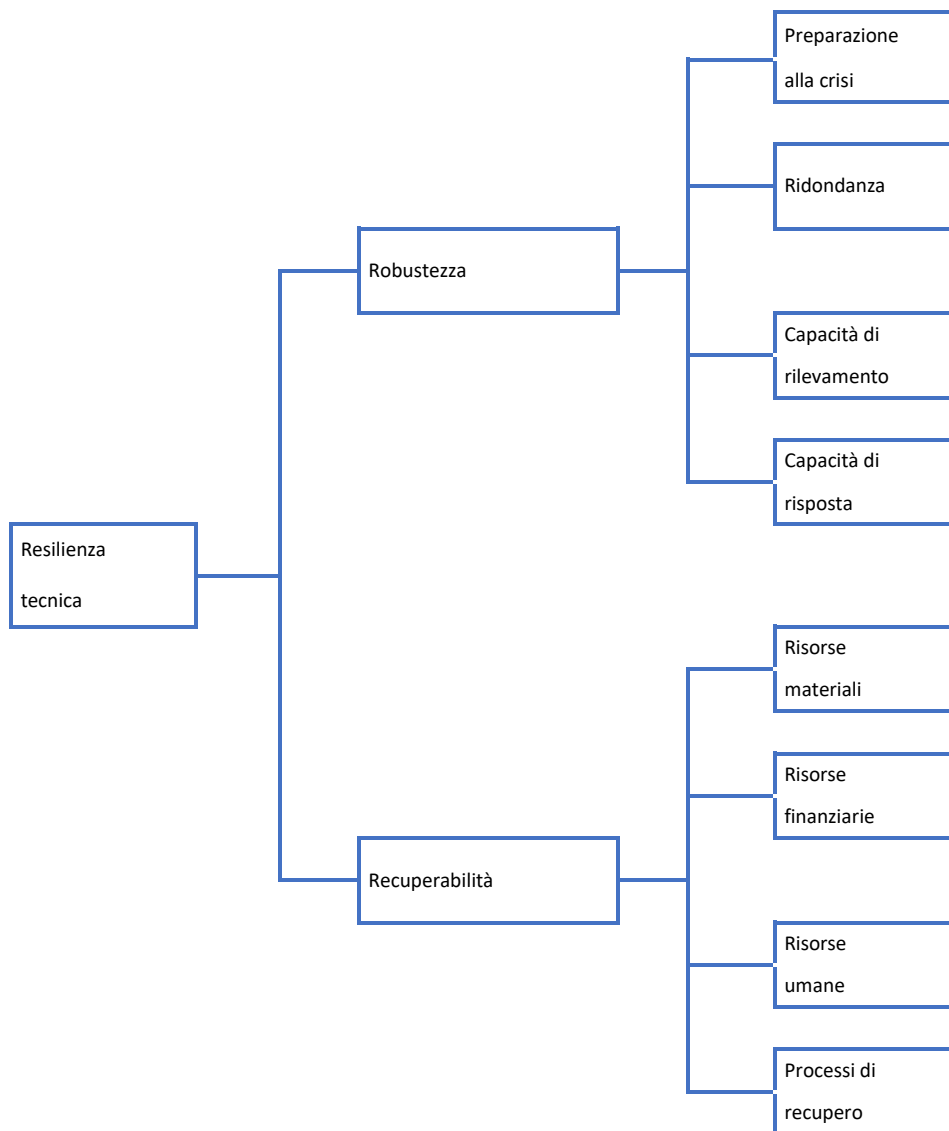


Figura 109: componenti e variabili della resilienza tecnica

La seconda area, nota come resilienza organizzativa, dipende invece dal livello dei processi interni di un'organizzazione con l'obiettivo di creare condizioni ottimali per l'adattamento degli elementi dell'infrastruttura critica alle emergenze. I processi che migliorano l'adattabilità di questi elementi sono:

- Gestione del rischio;
- Processi di innovazione;
- Processi di istruzione e sviluppo.

La gestione del rischio è un processo interno rilevante di un'organizzazione che risulta essere essenziale sia per garantire la sicurezza e protezione, sia per rafforzare la resilienza in fase di prevenzione. Il risk management consiste in attività coordinate per dirigere e controllare una qualsiasi organizzazione riguardo il rischio (ISO 31000) e il suo livello in relazione alla resilienza organizzativa si basa su due criteri:

- 1) L'esistenza del sistema di gestione del rischio e il livello di sviluppo (livello di adozione e utilizzo della metodologia, analisi dei rischi, controllo dei rischi, monitoraggio dei rischi);
- 2) Il grado di specificità degli scenari di emergenza (costituisce la base per sviluppare i piani di emergenza).

I processi di innovazione sono ulteriori processi interni che migliorano la resilienza degli elementi dell'infrastruttura critica nella fase di prevenzione e si basa su tre fasi fondamentali: invenzione, scienza e ricerca, implementazione.

Il livello dei processi di innovazione è determinato dai seguenti cinque criteri:

- 1) La struttura organizzativa;
- 2) Il potenziale di invenzione;
- 3) Il potenziale di ricerca scientifica;
- 4) Il marketing;
- 5) Le risorse finanziarie.

Gli ultimi processi che migliorano la resilienza organizzativa, ovvero migliorano la capacità dell'organizzazione di adattare gli elementi agli effetti derivanti dagli eventi dirompenti sono i processi di istruzione e sviluppo. Questi processi possono essere divisi in tre categorie: conoscenza, abilità, atteggiamenti.

Il livello dei suddetti processi dipende da:

- 1) Educazione del personale;
- 2) Formazione del personale.

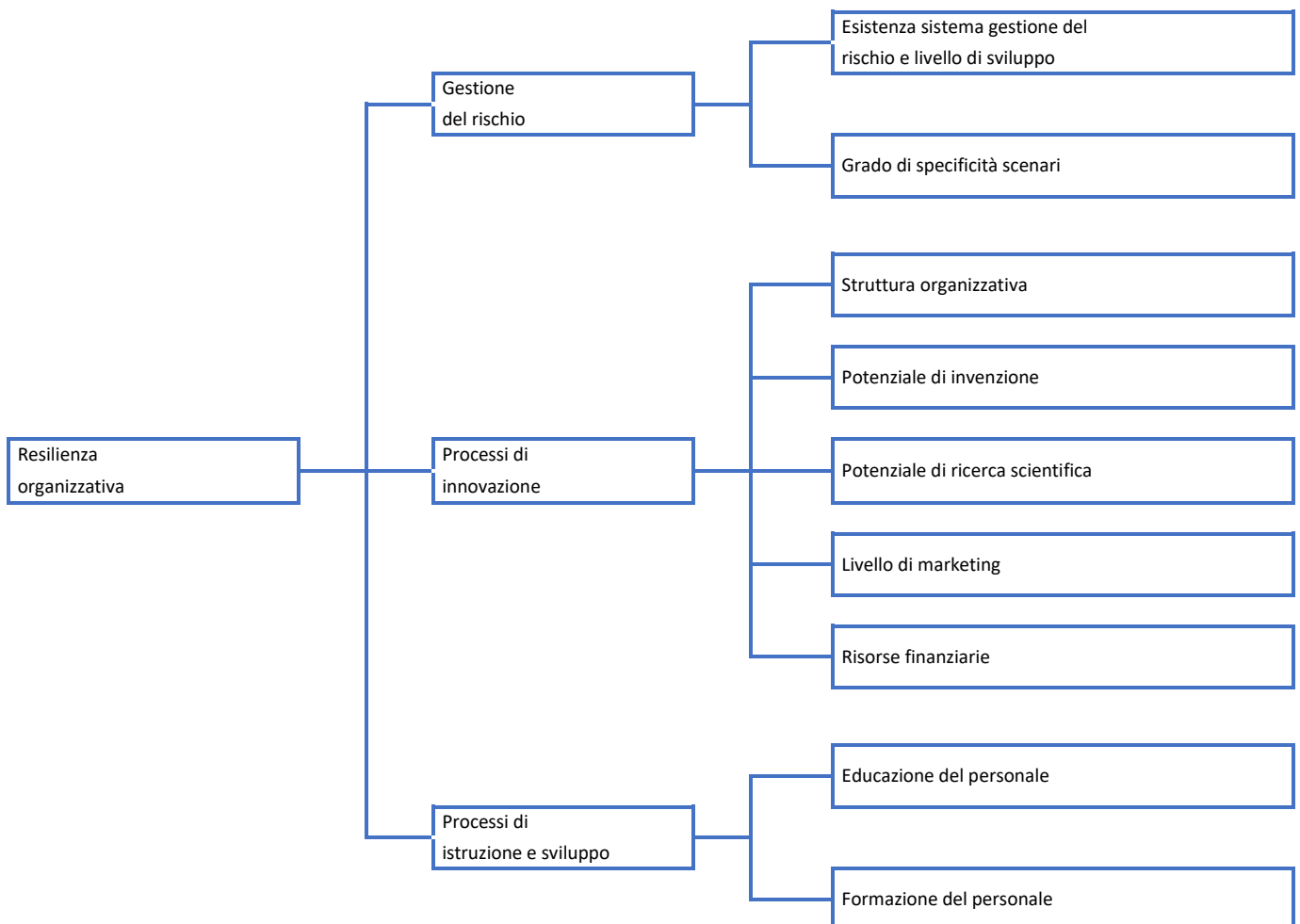


Figura 110: componenti e variabili della resilienza organizzativa

6.2 La rete stradale come collezione di archi e nodi

organizzazione di nodi e archi è proposta nel cap. 2 del DM 6792 del 11/5/2001 (Approvazione delle norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade), coerentemente al consolidato approccio tecnico.

L'approccio coerente all'applicazione dei costrutti dell'algebra topologica è inoltre alla base del Decreto Ministeriale 2/5/2012 Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.

L'organizzazione della rete in nodi e archi consente l'applicazione delle consolidate tecniche di ricerca operativa per la determinazione della prestazione attesa della rete. A questo scopo è necessario definire livelli di servizio effettivi, obiettivi di funzionalità e disponibilità dei singoli costituenti della rete e di loro articolazioni (totali o parziali), e procedere ad analisi del rischio (con riferimento ai pericoli endogeni – incidentali ed esogeni – naturali) censiti nell'area e con riferimento ai singoli costituenti.

L'approccio tipico di verifica della rete ha l'obiettivo di massimizzare la capacità di servizio, e quindi la capacità di una rete di rispondere alla domanda di trasporto, sia in termini di volumi che di velocità di servizio.

L'approccio proposto di verifica della rete ha invece lo scopo di misurare la probabilità di degradazione della rete, e quindi la probabilità di perdita totale della funzione di uno o più archi. Tale approccio consente di verificare il valore atteso dell'indisponibilità di parte della rete, riconoscere gli archi più fragili (quelli con indisponibilità attesa relativamente superiore agli altri), i nodi più fragili (quelli con massima probabilità di isolamento), la rete minima a massima disponibilità attesa (con ciò intendendo la rete che garantisce il collegamento tra tutti i nodi). Tale approccio consente di pianificare gli interventi di implementazione dei livelli di servizio con approccio alla rete stradale come infrastruttura critica, coerentemente alla lettera e allo spirito della Direttiva 2008/114/CE e del D. Lgs. 61/2011.

6.2.1 Resilienza del sistema: una metrica quantificabile dipendente dal tempo

Henry e Ramirez – Marquez (2012) propongono una strutturata analisi del concetto della metrica della resilienza. Sia $R(t)$ la resilienza di un sistema al tempo t . $R(t)$, nella sua forma base, rappresenta il rapporto tra il recupero al tempo t e la perdita subita dal sistema in un qualsiasi momento precedente nel tempo t_d , come indicato nella seguente equazione:

$$R(t) = \frac{\text{Recupero}(t)}{\text{Perdita}(t_d)}$$

Questa formula è coerente con il concetto della parola resilienza ed esprime la capacità di un sistema di "tornare indietro", infatti questo rapporto mostra che:

- se il recupero è uguale alla perdita, allora il sistema è completamente resiliente;
- se non avviene il recupero, allora la resilienza non è esibita.

Sia S il sistema di interesse. S sperimenta tre stati distinti:

- 1) Stato Originale (SO);
- 2) Stato Interrotto (SD);
- 3) Stato Ripristinato (SF);

e due transizioni:

- 1) Interruzione del sistema (dallo stato originale allo stato interrotto);
- 2) Ripristino del sistema (dallo stato interrotto allo stato ripristinato).

Ci sono due eventi che attivano queste due transizioni:

- 1) Un evento dirompente;

2) Un'azione di resilienza.

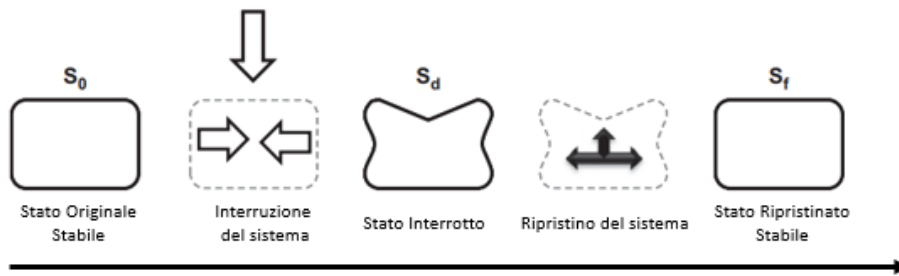


Figura 111: Stati del sistema e transizioni

La figura precedente mostra il sistema inizialmente in uno stato originale stabile (S₀), a cui fa seguito un evento distruttivo che innesca l'interruzione del sistema (dovuto a cause naturali o umane, intenzionali o non intenzionali), e infine lo stato interrotto (S_d). Viene quindi intrapresa un'azione di resilienza che avvia il ripristino, consentendo al sistema di raggiungere uno stato recuperato (S_f). Va notato che lo stato ripristinato (S_f) potrebbe essere lo stesso, simile o differente dallo stato originale (S₀) del sistema.

Per quantificare la resilienza introduciamo un nuovo parametro F che rappresenta la funzione di prestazione (*figure of merit – FOM*) del sistema dipendente dal tempo e quantificabile. Quindi F(t) è la base per il calcolo della resilienza.

Qualsiasi stato di S è caratterizzato da un corrispondente valore di F(t) e si assume che i due eventi (evento dirompente e azione di resilienza) influiscono direttamente sul suo valore.

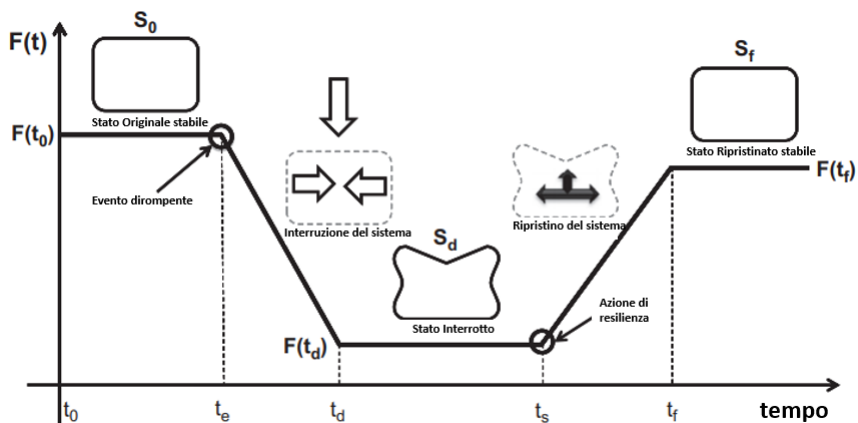


Figura 112: andamento valore funzione di consegna F

6.2.2 Le funzioni di prestazione

Come detto nel capitolo precedente, per calcolare la resilienza di un sistema è necessario definire una o più opportune funzioni di prestazione, descrittive del livello di servizio prestato dall'infrastruttura. Senza scopo di completezza, sono quindi proposte tre funzioni di prestazione esemplari, che potranno essere considerate nel loro insieme o in sottogruppi in relazione allo specifico scopo dell'analisi:

1) **Prestazione di collegamento (in tempo) tra il nodo O e il nodo T**

Questa funzione di consegna descrive il caso in cui sono preferibili valori più bassi, quindi in caso di stato interrotto si ottiene un valore più alto rispetto al valore in caso di stato originale in condizioni regolari. Per cui, al fine di calcolare correttamente la resilienza si considera:

$$G_{1,t} = \frac{OT_{min}}{OT_t}$$

dove

OT_{min} è la distanza del collegamento origine – destinazione preferenziale;

OT_t è la distanza del collegamento alternativo origine – destinazione, dipendente dal tempo in quanto nel tempo varia la configurazione della rete, inizialmente perfettamente funzionante, quindi collassata a causa dell'evento distruttivo e infine progressivamente ripristinata.

La funzione assume valori tra 0 (nessun collegamento alternativo disponibile tra O e T, con OT_t infinito) e 1 (rete perfettamente funzionante con archi totalmente disponibili).

2) Capacità di flusso massimo tra il nodo O e il nodo T

In questo caso sono preferibili valori più alti poiché la capacità giornaliera massima di ogni segmento stradale (arco) è utilizzata per calcolare il flusso massimo delle navette tra l'origine e la destinazione in un singolo giorno. Quindi questa funzione di consegna è calcolata come numero di viaggi al giorno.

$$G_{2,t} = \frac{CAP(OT_{min})}{CAP(OT_t)}$$

Dove

$CAP(OT_{min})$ è la capacità di flusso massimo giornaliero del collegamento origine – destinazione;

$CAP(OT_t)$ è la capacità di flusso massimo giornaliero del collegamento alternativo origine destinazione, dipendente dal tempo in quanto nel tempo varia la configurazione della rete, inizialmente perfettamente funzionante, quindi collassata a causa dell'evento distruttivo e infine progressivamente ripristinata.

La funzione assume valori tra 0 (nessun collegamento disponibile tra O e T) e 1 (rete perfettamente funzionante con archi totalmente disponibili).

3) Stato della rete

Va notato che alcuni eventi dirompenti potrebbero non influenzare tutte le funzioni di consegna. Per esempio, l'interruzione di un tratto stradale che non appartiene al percorso più breve tra il nodo O e il nodo T, non condizionerebbe la funzione di consegna 1 (FOM 1). Pertanto, nonostante un tratto stradale è fuori uso, la viabilità rispetto alla funzione di consegna 1 è buona come nel suo stato originale. Invece, la funzione di consegna 3 prevede che tali eventi siano presi in considerazione come interruzioni, ed è calcolata come:

$$G_{3,t} = \frac{\sum_{i=1; j=i}^n L_{ij,t}}{\sum_{i=1; j=i}^n L_{ij}}$$

Dove

L_{ij} sono i valori di lunghezza degli archi della rete perfettamente funzionante e collezionati nella matrice di adiacenza della rete;

$L_{ij,t}$ sono i valori di lunghezza degli archi della rete degradata al tempo t e collezionati nella matrice di adiacenza della rete.

La sommatoria estende l'operatore alla sola parte superiore della matrice.

La funzione assume quindi valori compresi tra 0 (condizione di degradazione assoluta della rete) e 1 (condizione di completa disponibilità di tutti gli archi della rete).

6.3 Analisi topologica di una rete

L'analisi della prestazione della rete stradale, intesa come infrastruttura critica, si basa sulla formulazione della metafora logica della rete attraverso l'utilizzo della consolidata tecnica del grafo, articolato in nodi e archi.

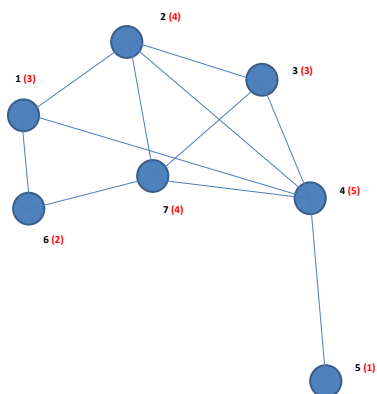


Figura 113: metafora grafica della rete stradale in archi e nodi

La figura precedente fornisce un esempio di grafo di rete, costituito da 6 nodi, connessi da 10 archi. Le connessioni possono essere riassunte in una tabella booleana di adiacenza come quella sotto.

Nodi/ Nodi	1	2	3	4	5	6	7
1		X		X		X	
2			X	X			X
3				X			X
4					X		X
5							
6							X
7							

Tabella 55: matrice di adiacenza di una rete

La indisponibilità attesa – e la disponibilità attesa, complemento ad 1 della indisponibilità – è calcolabile sulla base delle elaborazioni di QRA per ciascuno dei pericoli ipotizzabili (ad esempio: incidente stradale, e sua possibile evoluzione in incendio, e sisma).

La indisponibilità complessiva di ciascun arco è ottenuta dalla somma delle indisponibilità. Questo approccio assume una perfetta sovrapposizione degli effetti, che costituisce una approssimazione del tutto accettabile per il caso in esame. Dal punto di vista concettuale, la sommabilità sarebbe consentita solo ove fosse verificata una incompatibilità di accadimento dei pericoli (che si ha, con approccio rigoroso, solo in relazione all'incendio dato il sisma, e non nel caso di sisma dato l'incendio).

Assumendo i risultati di una applicazione esplorativa, si può ottenere la seguente tabella delle disponibilità.

Disponibilità [% in tempo] per gli archi - effetto congiunto di incidente e sisma

	1	2	3	4	5	6	7
1		0,999506		0,998801		0,999384	
2			0,998870	0,998457			0,997641
3				0,999829			0,998320
4					0,999201		0,999816
5							
6							0,999909
7							

Tabella 56: Disponibilità degli archi di una rete, attribuiti sulla base di una analisi di rischio con riferimento a fattori esogeni (sisma) ed endogeni (incidente)

Sulla base delle analisi svolte per l'attribuzione della disponibilità attesa del singolo arco è possibile esplorare la disponibilità di configurazioni specifiche di rete.

6.3.1 Analisi di disponibilità di rete minima a connessione totale: rete più performante

Uno dei problemi fondamentale della gestione di una rete stradale come Infrastruttura Critica è costituito infatti dall'analisi della disponibilità di reti minime, o ridotte, in relazione alle funzioni svolte dagli archi. Tale approccio è del tutto innovativo rispetto all'analisi classica del livello di servizio stradale, che è orientato all'analisi di disponibilità del singolo arco (e allo scopo della massimizzazione della sua resa in termini di servizio di trasporto).

Per valutare la disponibilità della rete minima che garantisca la connessione tra i nodi è necessario procedere all'identificazione della topologia minima caratterizzata da massima disponibilità.

Si evidenzia preliminarmente che, dati n nodi, la configurazione di connessione minima sarà costituita da $(n-1)$ archi. Ciò detto, considerando il nostro caso, la rete minima sarà costituita da 6 archi, e il problema può quindi essere visto come il problema di scelta di eliminazione di 5 archi su 11 inizialmente disponibili.

Dal punto di vista del calcolo combinatorio, le sestuple possibili estraibili da un campione di 11 elementi sono le combinazioni semplici di 6 elementi estratti da un campione di 11, e cioè:

$$C_{n,k} = \frac{D_{n,k}}{P_n} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad C_{11,6} = \frac{11!}{6! \cdot 5!} = 462$$

In realtà molte di queste combinazioni non restituiscono una configurazione di connessione tra tutti i nodi.

La rappresentazione completa più sintetica è ottenibile verificando quali archi della rete sono irrinunciabili. Nel nostro caso l'arco 4-5 è irrinunciabile. Ne discende che tutte le combinazioni (tra le 462 teoriche) che vedono l'eliminazione di questo arco sono non rispettose della proprietà di connessione dell'intera rete. In questo caso, quindi, visto che l'arco 4-5 è irrinunciabile, il problema combinatorio può ridursi nella ricerca delle combinazioni di 5 archi sui 10 disponibili, e quindi:

$$C_{10,5} = \frac{10!}{5! \cdot 5!} = 252$$

Ancora, tuttavia, molte di queste non restituiranno la configurazione minima di connessione tra tutti i nodi. L'individuazione della configurazione minima con approccio di calcolo combinatorio non è più così semplice, visto che non ci sono altri nodi (oltre il 5) a connessione singola.

Per verificare la numerosità delle combinazioni che rispettano la funzione è possibile sviluppare un albero di livello 5 (tanti quanti sono gli archi da eliminare). L'albero più semplice (di maggior sintesi) può essere sviluppato a partire dai nodi caratterizzati da un livello di connessione più basso. L'albero è sviluppato partendo dall'assunto che l'arco 4-5 è irrinunciabile.

Per verificare graficamente come operare le disconnessioni, è utile rappresentare la rete qualificando il grado di connessione di ciascun nodo, come di seguito rappresentato.

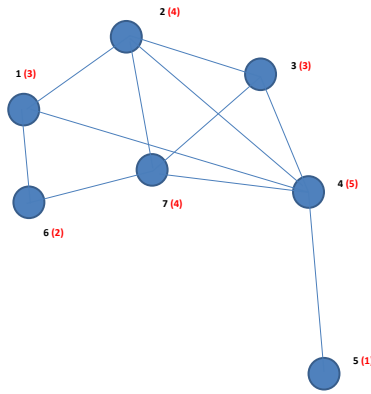


Figura 114: metafora grafica della rete stradale in archi e nodi

Una raccolta esemplificativa delle possibili disconnessioni è rappresentata nella tabella di seguito.

Lo schema di eliminazione progressivo deve essere letto a partire dall'ultima riga e risalendo. In particolare, si risale alla riga superiore e, se la cella è vuota, si scorre verso sinistra fino ad incontrare la prima cella con contenuto.

Livello 1	6_7									
Livello 2	1_4									
Livello 3	4_7			2_4						
Livello 4	3_7		2_7		3_4		4_7			
Livello 5	2_3	2_4	2_3	2_4	3_7	2_7	3_7	2_7	2_3	...

Tabella 57: collezione delle disconnessioni per esplorazione progressiva

Lo schema così rappresentato riproduce 9 esempi possibili di riduzione massima della rete (nel rispetto della connessione garantita a tutti i nodi).

In alternativa all'esplorazione estesa, è possibile procedere alla definizione della rete minima attraverso un ordinamento per disponibilità crescente degli archi della rete.

arco	Disponibilità
6_7	0,999908676
3_4	0,999828767
4_7	0,999815683
1_2	0,99950589
1_6	0,999383562
4_5	0,99920063
2_3	0,998870079
1_4	0,99880137
2_4	0,998457255
3_7	0,998319732
2_7	0,997641498

Tabella 58: disponibilità dei singoli archi in ordine crescente

La rete ridotta di disponibilità massima è costituita dai primi 6 archi dell'elenco. La verifica grafica conferma che tale rete ridotta consente la connessione tra tutti i nodi, ed è quindi la configurazione di rete ridotta a massima disponibilità cercata. La rete ridotta è di seguito rappresentata.

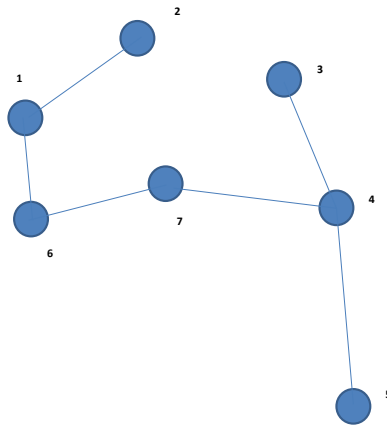


Figura 115: rete ridotta a disponibilità massima

6.4 Prestazione di un grafo stradale

Integrati i concetti della QRA già presentati con nuovi relativi alla vulnerabilità, alla resilienza e alle funzioni di prestazione ad essa legate, rimane definito un complesso di strumenti di misura nella disponibilità dell'ingegnere per la qualificazione delle caratteristiche prestazionali delle reti.

A questo scopo è infatti possibile applicare l'analisi di rischio della singola struttura (arco) finalizzata ad individuare la indisponibilità conseguente a fenomeni propri (come gli incidenti) o a eventi eccezionali esterni (tipicamente naturali).

Con riferimento al solo effetto delle minacce proprie ed interne, e quindi riferendoci alla vulnerabilità dell'infrastruttura agli incidenti rilevanti, tipicamente riconducibili a grandi incendi in galleria o dispersioni di materiale ADR, è possibile procedere alla stima delle frequenze di accadimento degli scenari di danno, ad essi associando, in luogo del numero di vittime conseguenti, l'indisponibilità conseguente in termini di giorni di fuori servizio. L'approccio di QRA è quindi sostanzialmente ristrutturato in una versione ad altro scopo, nella quale è indagata la variabile aleatoria indisponibilità quale danno di interesse.

Così operando è possibile ricavare, in perfetta analogia con la QRA tipicamente compilata, una analisi della indisponibilità, misurata in giorni, e da questa ottenere indicatori di indisponibilità in perfetta analogia con quelli viste nelle applicazioni di rischio ordinarie.

Risultano così individuati:

- indisponibilità totale (UT): definita come

$$UT = \sum p_i x u_i$$

avendo definito le p_i e le u_i di fine ramo dell'albero degli eventi; il valore così ottenuto costituisce la media ponderata (con pesi costituiti dalle probabilità degli scenari di fine ramo) di tutte le indisponibilità realizzabili in caso di incidente. Per questo motivo l'indisponibilità totale equivale all'indisponibilità attesa.

- **Funzione retrocumulata dell'indisponibilità:** esprime la probabilità annua, per un prefissato valore di indisponibilità U^* , di avere incidenti con un effetto di indisponibilità pari o superiore a U^* ²³:

$$P(U \geq u) = 1 - F_N(u)$$

A ciascuno scenario di disconnessione parziale può inoltre associarsi una matrice di incidenza che colleziona le funzioni di prestazione introdotte.

²³ La sua rappresentazione è, in analogia al rischio sociale, ottenuta sul piano di Farmer corretto

7 Linea guida per l'applicazione della procedura di analisi di rischio per le gallerie stradali ex D. Lgs. 264/2006

Alla luce delle valutazioni espresse nello sviluppo del lavoro, e delle evidenze, di partenza e di arrivo dell'elaborato, considerate le vulnerabilità tipiche del metodo, si propone di seguito una lettura critica dell'Allegato 3 arricchita di commenti finalizzati alla migliore applicazione dei concetti, allo scopo di ottenere una valutazione di rischio *completa, robusta e informativa*.

Il principio di *completezza*, che comprende quello di effettività, si riferisce all'obiettivo – da ottenere – di considerare nell'analisi applicata tutti e soli gli elementi rilevanti e condizionanti il rischio, il cui effetto va considerato con riferimento al concreto tempo di sviluppo degli scenari incidentali.

In quest'ottica tutte le caratteristiche della struttura potranno essere qualificate in:

- misure finalizzate alla prevenzione incidentale, e all'abbattimento del rischio alla radice (si pensi alla qualificazione della geometria della carreggiata, alle piazzole...);
- misure finalizzate a ridurre l'esposizione all'incidente (chiusura tempestiva dell'accesso alla galleria, prestazioni automatiche o semiautomatiche degli impianti di sorveglianza);
- misure finalizzate a favorire l'autosoccorso degli esposti e a tutelare la vita nel frangente dell'incendio o del fenomeno lesivo in ambiente confinato (impianti di illuminazione e ventilazione, caratteristiche dei percorsi di esodo);
- misure finalizzate a ridurre il danno alla struttura e favorire i soccorsi (caratteristiche di resistenza e reazione al fuoco della struttura, prestazioni riferite alla diffusione dei segnali radio in galleria...).

Con riferimento alla robustezza, l'analisi dovrebbe svilupparsi a partire da dati, proseguendo nella loro interpretazione, e completandosi nella assunzione di modelli inferenziali consolidati, espliciti e motivati. In questo senso la robustezza dell'analisi presuppone che alla struttura sia associata una completa raccolta dei dati di incidente, riferita almeno ai precedenti 5 anni, estesa a tutta la tratta di inserimento e alle altre gallerie della tratta presenti, allo scopo di ottenere una sufficiente base campionaria, attuale e popolata, per l'applicazione di una analisi per strati e specifica. Si evidenzia, incidentalmente, che nessuna analisi può proporsi in termini di migliore accuratezza dei dati su cui si fonda, e che, purtroppo, è piuttosto frequente verificare la cattiva qualità delle basi dati dell'ambiente stradale. Un ulteriore limite insuperabile è costituito dall'assenza di una tassonomia vincolante assoluta, di riferimento internazionale, come invece è in altri settori del trasporto, maggiormente aperti alla normalizzazione e all'internazionalizzazione, come quello navale, aeronautico e ferroviario.

Con riferimento alla informatività, l'analisi deve essere utilizzabile per verificare la necessità, l'opportunità o l'ininfluenza sostanziale di investimenti finalizzati a realizzare qualunque sistema / impianto o modifica di struttura, e a valutare, anche per quanto già installato, l'efficacia della prestazione nell'economia del rischio complessivo. In assenza di tale qualità, la valutazione del rischio non consente la gestione del rischio e quindi è sostanzialmente inutile.

7.1 L'analisi di rischio ex art. 13

L'art. 13 del D. Lgs. 264/2006 esplicita che:

1. *L'analisi di rischio viene effettuata da un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal gestore della galleria, con oneri a carico del gestore stesso.*

In merito a tale previsione, che costituisce una garanzia di terzietà nella valutazione della sicurezza dell'opera (da realizzare o esistente), va evidenziato che la misura è carente della previsione di competenza. Resta nella responsabilità del Gestore selezionare la professionalità più adeguata a realizzare lo scopo di analisi. D'altronde sarà interesse del Gestore ottenere una valutazione di qualità, e quindi completa, robusta e informativa. Vale inoltre la pena sottolineare che tra Gestore e analista incaricato è necessaria la più ampia collaborazione, allo scopo, innanzi tutti, della trasparente e completa fornitura dei dati necessari all'analisi.

2. L'analisi di cui al comma 1 riferita ad una determinata galleria tiene conto di tutti gli elementi inerenti alle sue caratteristiche progettuali e delle condizioni del traffico che incidono sulla sicurezza e segnatamente le caratteristiche ed il tipo di traffico, la lunghezza e la geometria della galleria, nonché il numero previsto di veicoli pesanti in transito giornaliero.

Il comma 2 individua, in anticipazione rispetto all'Allegato 3 che meglio esplicherà questi concetti, che l'analisi di rischio richiesta deve essere strutturata in modo adeguato a valorizzare informatività su pericoli e rischi contenute in alcuni parametri caratteristici della struttura. Tale previsione è perfettamente identica a quella della Direttiva madre.

Nel dettaglio emerge la rilevanza della quota dei veicoli pesanti in composizione di traffico, nonché il riferimento a generiche "caratteristiche" del traffico, che ragionevolmente sono costituite, in generale, dalle variazioni di intensità nel tempo che tanta influenza hanno sulla incidentalità tipica.

3. L'analisi di rischio deve essere svolta, secondo le modalità previste nell'allegato 3, per le gallerie esistenti che presentano carenze rispetto ai requisiti di sicurezza di tipo strutturale di cui all'allegato 2, ovvero per quelle gallerie che presentano caratteristiche speciali di cui all'articolo 4, comma 8. L'analisi di rischio deve dimostrare che opportune misure di sicurezza alternative o integrative, rispetto a quelle previste dall'allegato 2, siano tali da realizzare condizioni con livello di protezione equivalente o accresciuta rispetto agli obiettivi di sicurezza definiti dall'articolo 3, con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto, dei servizi di soccorso in genere e dei servizi resi dal Corpo nazionale dei vigili del fuoco.

L'analisi di rischio è quindi applicata alle sole gallerie speciali o non adeguate. Proprio in ragione di tale previsione, è evidente il carattere strategico della compilazione dell'analisi di rischio, che dovrebbe consentire l'analisi di casi dubbi, la misura comparativa e, infine, la misura assoluta del livello di sicurezza, e così orientare alla definizione del sistema conforme alle aspettative di sicurezza.

4. Il contenuto ed i risultati dell'analisi di rischio devono essere inseriti nella documentazione di sicurezza trasmessa alla Commissione.

5. La Commissione provvede a formare ed a tenere aggiornato il catalogo delle analisi di rischio approvate. Il catalogo è composto da due sezioni, una relativa alle verifiche di equivalenza con il criterio comparativo, per le gallerie esistenti che presentano carenze di requisiti di sicurezza di tipo strutturale e l'altra per le analisi integrative delle misure di sicurezza, per le gallerie che presentano caratteristiche speciali di cui all'articolo 4, comma 8.

6. La Commissione, in assenza di sufficienti e documentate garanzie di livello prestazionale, chiede, ove lo ritenga necessario e con oneri a carico del gestore, il collaudo tecnico dei sottosistemi adottati come misure di sicurezza alternative o integrative nelle analisi di rischio per la compensazione delle carenze di requisiti a carattere strutturale, al fine di accertare l'affidabilità e l'efficienza, che caratterizzano la loro prestazione.

Mentre il comma 4 e 5 individuano responsabilità amministrative (è certamente una occasione persa aver formulato il comma 4 prefigurando l'analisi come meramente "inserita" nella documentazione di sicurezza, piuttosto che "valorizzata" in essa, il comma 6 individua un potere in capo alla Commissione che dovrebbe costituire una misura di contenimento rispetto all'ipotesi di assunzioni irragionevoli e a sfavore di sicurezza. Va peraltro evidenziato che la mancanza di riferimenti RAMS per il settore infrastrutturale stradale comporta l'assenza di prestazioni di targa affidabili, e una certa inconsuetudine alla misura certificata.

7.2 Il Glossario di cui all'allegato I del D.Lgs. 264/2006

Il Glossario raccoglie le definizioni utili all'interpretazione, corretta e coerente, dei successivi allegati tecnici del Decreto. Assume quindi importanza fondamentale verificare, ed eventualmente chiarire, elementi di incoerenza o carenze definitorie eventualmente presenti.

Le definizioni che seguono sono finalizzate alla migliore comprensione del testo normativo a cui attengono. Sono altresì richiamate alcune terminologie di uso corrente relative alla normativa e agli standard tecnici stradali. Per le definizioni relative agli elementi costitutivi dello spazio stradale, si vedano le "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade"-D.M. 05/11/2001.

ALARP

Acronimo dell'espressione inglese *As Low As Reasonably Practicable* che individua la porzione del diagramma frequenza di accadimento - numero di fatalità compresa tra il livello di accettabilità ed il livello di tollerabilità del rischio entro la quale si applica l'analisi costi - benefici come criterio guida nell'assumere decisioni di gestione del rischio in presenza di incertezza per una data struttura. I livelli di accettabilità e di tollerabilità delimitano la regione di accettabilità condizionata del rischio.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, la zona ALARP è individuata quale spazio compreso tra i criteri di inaccettabilità assoluta e accettabilità condizionata del piano bilogaritmico F-N, sul quale è rappresentata la funzione F(D), curva cumulata complementare (CCC), o retrocumulata del rischio, ottenuta dall'integrale destro (da D in poi) della funzione di distribuzione di probabilità del danno.

ALBERO DEGLI EVENTI

Sequenza di eventi, ognuno caratterizzabile in termini di probabilità di accadimento condizionate dall'azione delle misure di prevenzione e protezione adottate.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, l'albero degli eventi è una struttura di algebra grafica caratterizzata dall'essere partitore di probabilità. L'albero è sviluppato da destra a sinistra e nella direzione del tempo crescente, e specifica l'analisi sequenziale di tutti i sottosistemi, funzioni, parametri e condizioni che determinano il flusso del pericolo verso gli esposti. Ogni livello di analisi richiede la definizione, con approccio effettivo, della disponibilità / efficacia della funzione rappresentata, e dovrà quindi essere sviluppata, per ciascun livello:

- L'analisi RAMS della disponibilità della prestazione, se trattasi di impianto che fornisce prestazione di mitigazione;
- La adeguata rappresentazione della complessità, con lo sviluppo di una metafora numerabile, ove si tratti di un livello che individua un parametro di distribuzione (come una distanza da percorrere o la collocazione spaziale di un fenomeno); il numero delle classi da considerare dipende dall'ampiezza del range del parametro da rappresentare, e sarà necessario aumentare il numero di classi in ragione dell'incremento di variabilità dell'effetto del parametro sul rischio; in caso di dubbi può essere accettabile, almeno in via provvisoria, utilizzare come punti di condensazione i valori medio, i quartili al 25° e al 75° percentile e due punti di condensazione sulle code, preferibilmente al 5° e al 95° percentile.

ANALISI DI RISCHIO

Metodologia finalizzata alla valutazione ed alla gestione del rischio associato ad un determinato sistema galleria rispetto alle conseguenze sulla popolazione esposta. La valutazione del rischio è un processo che comporta l'individuazione delle sorgenti di pericolo e la determinazione dell'esposizione della popolazione al pericolo ed include la stima delle incertezze connesse. La gestione del rischio è l'atto decisionale, susseguente alla valutazione del rischio, inerente la realizzazione di misure di sicurezza, in modo congruente alle caratteristiche del contesto sociale, economico, politico del paese nel quale è realizzata l'opera.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, e rinviando ulteriori elementi di riflessione alla lettura dell'Allegato 3, si evidenzia che la definizione di analisi di rischio comprende la stima delle incertezze connesse, e quindi propone una lettura inferenziale (e come tale inevitabilmente affetta da errore di stima) trasparente nelle assunzioni e che, in auspicio, dovrebbe dichiarare le principali vulnerabilità assunte, o imposte dalla materiale condizione di redazione. Il periodo successivo, laddove definisce il concetto di

gestione del rischio, propone una interpretazione sociopolitica del concetto di sicurezza perfettamente in linea con la definizione RAMS della sicurezza tecnica, evidenziando che la condizione di sicurezza corrisponde alla verifica favorevole di un criterio di accettazione / rifiuto la cui individuazione corrisponde alla definizione di rischio accettabile.

CONSEGUENZA

Risultanza dell'accadimento di un evento pericoloso sulla popolazione esposta, sulla struttura, sugli impianti, sull'economia, sull'ambiente.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, si evidenzia che il concetto di conseguenza è quindi comprensivo della misura del danno, cui corrisponde lo scopo strategico dell'analisi di rischio (in quanto le verifiche sono condotte su indicatori che si riferiscono a questa sola componente del danno), ma comprende anche le dimensioni di danno ai beni materiali e all'ambiente.

CURVA DI DEFLUSSO

Curva rappresentativa della variazione della velocità media della corrente veicolare in funzione della densità di flusso.

DENSITA' DI FLUSSO

Rapporto tra i veicoli equivalenti transitati in una sezione stradale rispetto ai veicoli equivalenti smaltibili nella stessa unità di tempo.

ESERCIZIO STRADALE

Fruizione dell'infrastruttura nel rispetto delle regole che disciplinano il comportamento degli utenti e il deflusso veicolare, atte a soddisfare le esigenze della domanda di traffico nel rispetto di predeterminati standard di sicurezza.

EVENTO ELEMENTARE

Singolo accadimento di una successione di eventi consequenziali.

EVENTO INIZIATORE

Accadimento all'origine di una catena di eventi successivi che determinano nel loro complesso uno scenario di pericolo caratterizzato da una specifica distribuzione di conseguenze che identificano il danno ad esso associato.

Si evidenzia che l'evento iniziatore, che corrisponde ad un evento incidentale di riferimento, estratto dal Gruppo Completo degli Eventi Incidentali costituenti, nel loro complesso, la partizione completa dello spazio del pericolo associato al sistema. A ciascun evento iniziatore segue una struttura ad albero, l'Albero degli Eventi, caratterizzato dall'essere partitore di probabilità. L'esito dell'applicazione di un albero di eventi ad un evento iniziatore è l'ottenimento, in luogo di questo, di un Gruppo Completo di Scenari Conseguenza, caratterizzati dall'essere partizione completa della probabilità associata allo stesso evento iniziatore di genesi; ciascuno scenario conseguenza è caratterizzato dalla probabilità di accadimento ottenuta dalla produttoria applicata alle frequenze nodali di monte e alla probabilità dell'evento iniziatore di genesi, e dal danno determinato, caso per caso, dalla specifica combinazione dei parametri di scenario.

EVENTO RILEVANTE

Evento caratterizzato da bassa probabilità di accadimento ed elevate conseguenze.

La definizione sembra in realtà riferirsi al termine Evento Catastrofico

FLUSSO VEICOLARE

Numero di veicoli transitati in una sezione stradale nell'unità di tempo conteggiati indipendentemente dalle loro caratteristiche tipologiche.

GALLERIA SPECIALE

Galleria alla quale sono associate caratteristiche geometriche, funzionali e ambientali che possono indurre condizioni di pericolo per gli utenti tali da richiedere, suffragata da analisi di rischio, l'adozione di misure di sicurezza integrative.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, si evidenzia che alle caratteristiche in questione sono associati livelli di pericolosità aggiunta e speciale rispetto a quella, propria e comune del tracciato in generale; la pericolosità aggiunta e singolare è infatti determinata da condizioni speciali di intensità di alcuni parametri di composizione del traffico (ad es. quota elevata di veicoli pesanti) o dei suoi movimenti (ad es. frequenti fenomeni di congestione del flusso) o di caratteristiche geometriche particolari (ad es. pendenza anomala rispetto ai valori tipici).

GALLERIA VIRTUALE

Galleria che possiede tutte le misure di sicurezza corrispondenti ai requisiti minimi obbligatori previsti dall'ALLEGATO 2 non affette da malfunzionamento.

Si evidenzia le caratteristiche della galleria virtuale sono costituite dalla sua perfetta conformità alle previsioni di classe d'appartenenza e al fatto che la disponibilità degli impianti rilevanti nel condizionare il flusso del pericolo è posta pari ad 1; a maggior ragione è evidente che l'approccio al calcolo della funzionalità degli impianti di galleria reale non può che essere condotto attraverso l'uso delle tecniche RAMS e conformemente alle previsioni della norma IEC 61508.

GESTORE DELL'INFRASTRUTTURA

Soggetto incaricato della realizzazione, della manutenzione dell'infrastruttura stradale e della gestione in sicurezza della circolazione.

INCIDENTE

Evento, o serie di eventi, non intenzionali che causano danni a persone, a cose e all'ambiente ovvero la disfunzione di un sistema o di un servizio.

INCIDENTALITÀ SPECIFICA

Numero di eventi incidentali verificatisi nell'unità di tempo e di sviluppo della strada rapportati ai veicoli transitati nella stessa sezione e nello stesso tempo

INDICE DI RISCHIO

indicatore quantitativo di rischio espresso in funzione della probabilità di accadimento di un evento incidentale e dell'entità delle conseguenze da esso derivanti

LIVELLO DI RISCHIO ACCETTABILE

Livello di rischio proprio della galleria virtuale.

LIVELLO DI RISCHIO TOLLERABILE

Livello di rischio associato al livello globale di sicurezza del sistema galleria rispondente ai requisiti minimi di sicurezza.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, si evidenzia che il rischio accettabile è quindi diverso per ciascuna struttura, e definito dinamicamente sui casi di realtà, ottenendo dalle gallerie reali le virtuali corrispondenti. Il livello di sicurezza della galleria reale adeguata corrisponde invece al livello tollerabile del rischio. Risulta quindi definita, per ciascuna struttura, una zona intermedia di riferimento, analoga a quella che sul piano F-N e per le applicazioni di analisi di rischio estesa e assoluta è definita ALARP, e però priva di tale concetto di gestione, in quanto è stabilito (a contrario) al comma 3 dell'art. 13 che le gallerie adeguate a tutti i requisiti minimi stabiliti per la classe di appartenenza non sono oggetto di analisi di rischio.

LIVELLO DI SERVIZIO

Condizione tipica di deflusso caratterizzata dalla densità veicolare e dalla velocità media di transito.

LIVELLO GLOBALE DI SICUREZZA

Livello di sicurezza del sistema galleria fornito dalle misure di sicurezza installate

LUNGHEZZA DI TRANSIZIONE

Sviluppo stradale di limitata estensione ove, in fase di esercizio, l'utente adegua la marcia a diverse situazioni geometrico-funzionali.

MALFUNZIONAMENTO

Condizione funzionale delle misure di sicurezza diversa dalle condizioni di progetto e caratterizzata da una specifica probabilità che essa possa determinare una condizione di pericolo ed un conseguente danno.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, si evidenzia che un malfunzionamento non necessariamente comporta una condizione evolutiva verso situazioni pericolose. In questo caso la "specifica probabilità" di evoluzione verso guasto pericoloso o incidente è pari a 0.

MANOVRE A RISCHIO

Manovre che il conducente del veicolo effettua in debito di sicurezza.

MANOVRE ILLEGALI

Manovre che il conducente del veicolo effettua in contrasto con i disposti legislativi e/o regolamentari che regolano l'esercizio stradale.

MANOVRE IN EMERGENZA

Manovre che il conducente del veicolo effettua per evitare l'incidente in situazioni critiche impreviste e/o imprevedibili

MISURE DI EQUIVALENZA

Provvedimenti adottabili per conseguire un livello globale di sicurezza equivalente quando non siano tecnicamente od economicamente realizzabili uno o più dei requisiti minimi caratterizzanti una classe di gallerie.

L'equivalenza è riferita all'indicatore di rischio selezionato. L'equivalenza dovrebbe essere dimostrata sempre sull'indicatore VAD.

MISURE DI SICUREZZA

Provvedimenti strutturali, impiantistici, gestionali mirati a ridurre la probabilità di accadimento e/o le conseguenze di eventi incidentali.

Le misure di sicurezza sono quindi di effetto preventivo e protettivo. Si ricorda, per generale previsione normativa (con ciò intendendo quanto espresso, conformemente, dalle massime di Cassazione ad interpretazione, sistematica e coerente, di leggi generali, che è attesa una priorità ordinale nell'applicazione delle misure di sicurezza, dovendo sempre preferirsi quelle preventive a quelle protettive, e quelle collettive a quelle individuali. Ne deriva che, anche nell'intervento progettuale, quanto nell'esercizio ordinario, dovranno essere adottate tutte le misure di sicurezza possibili e nell'ordine intervenendo con priorità sulle misure di sicurezza preventive collettive, preventive individuali, protettive collettive e infine protettive individuali.

MISURE DI SICUREZZA INTEGRATIVE

Provvedimenti complementari che integrano i requisiti minimi di sicurezza e sono finalizzati al perseguimento di un minore livello di rischio per le gallerie che presentano caratteristiche speciali rispetto ai parametri di sicurezza, tali da determinare condizioni di maggiore potenziale pericolo.

Le misure di sicurezza sono quindi di effetto integrativo in caso di adozione finalizzata a compensare rischio aggiunto identificabile in relazione alla presenza di caratteristiche speciali.

POPOLAZIONE ESPOSTA

Insieme costituito dagli utenti, dal personale di esercizio, dal personale addetto al soccorso.

La popolazione esposta al pericolo, qui identificata, non deve essere confusa con i soggetti esposti agli scenari pericolosi sviluppati e risolti nell'analisi del rischio. Gli esposti, infatti, costituiscono i soggetti virtuali in transito elementare nella struttura, e costituiscono la base di normalizzazione del rischio totale per il calcolo del rischio individuale, corrispondente alla probabilità di morte associata al singolo transito annuale nella struttura da parte del generico utente.

PREVENZIONE

Misure ed azioni intese a ridurre la probabilità di accadimento di un evento pericoloso.

PROBABILITÀ DI INCIDENTE

Sommatoria delle probabilità individuali di incidente estesa al flusso transitato su un tronco stradale in un definito arco temporale.

Nonostante le buone intenzioni che l'hanno generata, la definizione proposta in questo caso è particolarmente insoddisfacente, e determina una incomprensione profonda del fenomeno incidentale. La probabilità di incidente è in questo caso la frequenza attesa dell'accadimento incidentale in una struttura – galleria specifica e per un lasso di tempo specifico. In genere la frequenza attesa di incidente (con ciò intendendo un valore di probabilità ricavato per approccio frequentista, su base dati) è riferita all'anno. Non è corretto, dal punto di vista definitorio, individuare la probabilità di incidente come la sommatoria di caratteristiche individuali, essendo l'incidente anche un fenomeno di relazione veicolare, e quindi associato al traffico nel suo complesso, e non al singolo veicolo in quanto tale.

PROBABILITÀ INDIVIDUALE DI INCIDENTE

Sommatoria delle produttorie delle probabilità degli eventi elementari intercettati da ciascun percorso critico dell'albero degli eventi.

In questo caso la definizione, in se non comprensibile, potrebbe riferirsi ad una ipotetica ricostruzione ad albero delle cause (e non degli eventi) delle dinamiche generative dei singoli incidenti stradali. In questo caso, tuttavia, la diagrammatica logica di sostegno non è costituita dall'albero degli eventi, che è partitore di probabilità, quanto dall'albero delle cause, che è un compositore di probabilità.

PROBABILITÀ DI MALFUNZIONAMENTO

Rapporto normalizzato tra il numero di eventi anomali rispetto al totale degli eventi possibili nelle condizioni di ordinario funzionamento.

In questo caso si propone l'approccio frequentista per la stima del malfunzionamento di un sistema; si evidenzia tuttavia che l'adozione di indicatori di prestazione ricavati con approccio frequentista richiede la verifica preliminare della rappresentatività, completezza e sufficiente ampiezza del campione utilizzato per la stima. In relazione all'applicazione a impianti e dispositivi, l'approccio frequentista per la stima dell'affidabilità e della disponibilità presuppone l'adozione, a monte, di un sistema di monitoraggio completo, gestito e coerente. Il monitoraggio dovrebbe quindi risultare effettuato, per un tempo sufficientemente lungo (o su una popolazione sufficientemente ampia) con criteri di classificazione dei guasti e delle anomalie predefiniti, costituenti partizione completa dello spazio dei malfunzionamenti e operazionalizzabili. Le registrazioni di anomalie dovrebbero avere la misura del tempo di malfunzionamento, la diagnosi, il tempo di ripristino.

PROTEZIONE

Misure ed azioni intese a ridurre le conseguenze di un evento pericoloso.

QUALIFICAZIONE FUNZIONALE DELLA STRADA

Caratterizzazione dell'itinerario stradale in funzione della tipologia prevista dal CdS e dell'ambito territoriale attraversato.

REQUISITI DI SICUREZZA

Provvedimenti strutturali, infrastrutturali ed impiantistici previsti per un tracciato stradale in sotterraneo e finalizzati a ridurre il rischio d'esercizio agendo sia sulla probabilità di accadimento degli eventi incidentali, sia sulle possibili conseguenze.

REQUISITI MINIMI DI SICUREZZA

Provvedimenti strutturali, infrastrutturali ed impiantistici necessari a garantire il livello globale di sicurezza associato alla soglia di rischio tollerabile.

RISCHIO

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

In questo caso si propone una definizione di rischio ampio (che non esplicita la definizione di rischio come prodotto della probabilità e del danno in relazione ad uno specifico scenario), consentendo quindi in astratto l'adozione di una forma funzionale qualunque che legghi p e D ; in realtà l'applicazione concreta dell'analisi di rischio presuppone che la grandezza sia univocamente definita attraverso il prodotto $p \times D$. Ulteriormente si evidenzia che ciascuna attribuzione di rischio è affetta da inevitabili errori di stima. D'altro canto è sempre possibile migliorare accuratezza e precisione, sia con migliori strategie di modellazione dell'analisi ad albero degli eventi, che con precauzioni utili a contenere il difetto di stima.

SCENARIO

Una successione di eventi che descrive, a partire da un dato evento iniziatore, le modalità condizionate dalle misure di sicurezza adottate, che inducono determinate conseguenze.

Lo scenario è determinato dalla combinazione o successione di eventi intermedi, a partire dall'evento iniziatore; lo scenario è caratterizzato da una qualificazione specifica dei parametri e delle funzioni considerati rilevanti nel condizionare il flusso del pericolo; sulla base di tali elementi è quindi possibile procedere alla valutazione del danno ad esso associato, attraverso un approccio simulativo o di calcolo.

SISTEMA GALLERIA

E' il complesso costituito dagli elementi strutturali, dall'ambiente circostante l'opera, dal traffico, pertinente l'opera e l'ambiente, dalle dotazioni di sicurezza impiantistiche e dalle procedure di gestione che caratterizzano un tracciato in sotterraneo della strada.

La definizione del sistema galleria costituisce il presupposto necessario all'applicazione del concetto olistico di analisi di rischio; va tuttavia evidenziato che l'analisi d'insieme non può mascherare l'effetto specifico di singole rilevanti misure sul complesso del rischio, pena la perdita di informatività dell'analisi; il concetto di approccio olistico è quindi temperato da una struttura modulare, coerente e riconoscibile, delle singolarità della struttura.

SITUAZIONI CRITICHE

Condizioni strutturali, ambientali e/o funzionali che determinano un'elevata probabilità di accadimento e/a gravi conseguenze per un evento incidentale.

TASSO INCIDENTALE

Numera di eventi incidentali per unità di sviluppo

La definizione proposta non sembra in linea con le definizioni correnti del settore, laddove si intende con frequenza incidentale la normalizzazione degli eventi avversi sull'unità di lunghezza del tronco di interesse e per anno; mentre si intende per tasso incidentale la normalizzazione degli eventi avversi per le variabili di esposizione, costituite dalle percorrenze complessive, e quindi dai veicoli Km riferiti all'anno di esercizio.

TRONCO STRADALE

Sezione longitudinale di un itinerario stradale dello sviluppo di alcuni chilometri caratterizzata da omogeneità strutturali, di traffico o funzionali.

La definizione di tronco stradale riportata è perfettamente coerente alla definizione di cui al Decreto Ministeriale 2/5/2012 Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali

VALUTAZIONE DI EQUIVALENZA

Analisi di rischio atta a verificare in forma quantitativa l'equivalenza ai fini del perseguimento di un livello globale di sicurezza tra provvedimenti previsti in alternativa ad eventuali requisiti minimi non realizzati e/o non realizzabili.

La definizione si riferisce all'atto di misura e verifica che sottende all'approccio comparativo dell'analisi di rischio, e prevede che siano confrontati i livelli di sicurezza (sull'indicatore VAD) caratteristici di due strutture prese a riferimento.

VEICOLI EQUIVALENTI

Quantificazione del flusso veicolare nell'unità di tempo espressa riconducendo tramite l'adozione di opportuni coefficienti di equivalenza le diverse componenti di traffico ad un'unica tipologia veicolare.

ZONA DI APPROCCIO ALLA GALLERIA

Tratta stradale precedente l'ingresso in galleria ove le condizioni di esercizio possono influenzare la sicurezza della marcia in sotterraneo.

ZONA IN USCITA ALLA GALLERIA

Tratta stradale precedente l'ingresso in galleria ove le condizioni di esercizio possono influenzare la sicurezza della marcia in sotterraneo.

7.3 Le Misure di Sicurezza di cui all'Allegato II del D.Lgs. 264/2006

1. Criteri per decidere sulle misure di sicurezza

1.1. Parametri di sicurezza

1.1.1. Le misure di sicurezza da realizzare in una galleria devono basarsi su una considerazione sistematica di tutti gli aspetti del sistema consistenti nell'infrastruttura, l'esercizio, gli utenti e i veicoli.

1.1.2. Si tiene conto dei seguenti parametri quali:

- lunghezza della galleria,
- numero di fornice,
- numero di corsie,
- geometria della sezione trasversale,
- allineamento verticale e orizzontale,
- tipo di costruzione,
- traffico unidirezionale o bidirezionale,
- volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo),
- rischio di congestione (giornaliero o stagionale),
- tempo di intervento dei servizi di pronto intervento,
- presenza e percentuale di veicoli pesanti,
- presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose,
- caratteristiche delle strade di accesso,
- larghezza delle corsie,
- considerazioni relative alla velocità,
- condizioni geografiche e meteorologiche.

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

La previsione del punto 1.1.3 è condizionata dalla interpretazione della COMmissione permanente per le Gallerie Stradali, ai sensi del comma 8 dell'art. 4 del Decreto, essendo la commissione chiamata a definire le soglie di "specialità" dei parametri individuati. Al fine delle successive previsioni di calcolo secondo la procedura di cui all'Allegato 3, si evidenzia che l'adozione di un metodo conforme di analisi di rischio dovrebbe comportare la rilevanza di questi parametri nel calcolo, e quindi l'analisi di ciascuno in almeno uno dei sottomodelli di analisi che compongono la procedura complessiva.

A titolo d'esempio, per ciascuno dei parametri si restituisce contezza dell'effetto sulle singole fasi della stima, con riferimento alla procedura adottata nello studio corrente.

	Rilevanza			
	stima iniziatori	accodamento	evoluzione dello scenario di incendio	evoluzione dello scenario di dispersione ADR
- lunghezza della galleria,	x			
- numero di fornici,	x	x	x	x
- numero di corsie,	x	x		
- geometria della sezione trasversale,	x		x	x
- allineamento verticale e orizzontale,	x			
- tipo di costruzione,	x		x	x
- traffico unidirezionale o bidirezionale,	x	x	x	x
- volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo),	x	x		
- rischio di congestione (giornaliero o stagionale),	x	x		
- tempo di intervento dei servizi di pronto intervento,			x	x
- presenza e percentuale di veicoli pesanti,	x	x	x	x
- presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose,				x
- caratteristiche delle strade di accesso,	x		x	x
- larghezza delle corsie,	x	x	x	x
- considerazioni relative alla velocità,	x	x		
- condizioni geografiche e meteorologiche	x		x	x

[Omissis]

2.6. Drenaggio

2.6.1. Se il trasporto di merci pericolose è autorizzato, il drenaggio di liquidi infiammabili e tossici è effettuato tramite canali di scolo appositamente realizzati o altri dispositivi all'interno delle sezioni trasversali delle gallerie. Tale sistema di drenaggio deve essere progettato e mantenuto in funzione in modo da impedire incendi nonché il propagarsi di liquidi infiammabili e tossici all'interno di un fornice e tra i fornici.

2.6.2. **Se nelle gallerie esistenti non è possibile soddisfare tali requisiti, o è possibile soddisfarli solo a un costo sproporzionato, se ne deve tenere conto al fine di decidere se autorizzare il trasporto di merci pericolose, sulla base di un'analisi dei pertinenti rischi.**

La previsione del punto 2.6.2 è condizionata all'applicazione di una pertinente valutazione di rischio. In questo caso la valutazione in questione dovrà essere comparativa tra la galleria reale e quella virtuale. E' comunque possibile verificare il valore assoluto del rischio di struttura identificando l'eventuale carenza come parametro speciale e comporre quindi una analisi di rischio assoluta per verificare la congruenza tra il profilo di rischio della galleria reale e i criteri assoluti sul piano F-N. Si evidenzia comunque che l'obiettivo di verifica positivo è difficilmente ottenibile sia in un caso che nell'altro, considerando che ragionevolmente la struttura in termini di confronto con quella virtuale sarà evidentemente caratterizzata da un livello di rischio più elevato, difficilmente compensabile sugli scenari di riferimento. In termini generali si ritiene che, sul punto, previa valutazione oggettiva e terza da parte della migliore scienza oggi disponibile, la norma dovrebbe essere più orientata, evitando un inefficace rinvio sotto la responsabilità dei gestori.

7.4 Gli obiettivi di sicurezza e la metodologia di analisi di rischio ex Allegato III del D. Lgs. 264/2006

1. Premessa

La metodologia qui presentata si riferisce esclusivamente all'analisi degli eventi considerati critici nello specifico ambiente confinato delle gallerie vale a dire incendi, collisioni con incendio, sversamenti di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e nocive. Eventi propri dell'incidentalità stradale, connessi a caratteristiche geometriche dell'infrastruttura e non indotti dallo specifico ambiente galleria, che non comportino per l'utenza rischi aggiuntivi rispetto ai rischi connessi alla circolazione stradale, sono da considerarsi e da fronteggiarsi per la prevenzione nell'ambito della regolamentazione del traffico e della progettazione stradale. Le vittime di questi ultimi incidenti vanno contabilizzate nell'ambito dell'incidentalità stradale.

La previsione di una applicazione esclusiva del metodo ad eventi critici dell'ambiente galleria è certamente ragionevole, e determina in astratto una applicazione di misura del rischio incrementale di struttura rispetto a quello proprio del tronco. In concreto è comunque necessario tener sempre presente che l'ambito del pericolo di galleria ha, per quanto riguarda i generatori del pericolo, evidenti e rilevanti analogie con quelli delle tratte generiche: si pensi ad esempio all'incidentalità a mezzi trasportanti ADR, la cui stima passa attraverso la stima dell'incidentalità tipica della tratta. Questa evidenza dovrebbe portare a valorizzare, anche a carico dell'analista, misure di gestione del rischio complesse e comprendenti anche le misure di prevenzione incidentale, anche utilizzando l'apertura prevista dal decreto a soluzioni alternative rispetto a quelle enunciate. L'alternativa, tipicamente percorsa, è quella di compensare il rischio con misure di protezione ridondate, o sistemi ad intervento mitigativo: strategia questa che, oltre a non rispettare la tassativa previsione di norma generale che impone la preferenzialità per la prevenzione rispetto alla protezione, determina complessi sistemici dalle dubbie sinergie e, piuttosto, con criticità derivanti da effetti antagonisti (è il caso, ad esempio, dei sistemi di spegnimento più o meno automatizzati, che in caso di insuccesso – peraltro frequente quando l'incendio è rilevante – hanno l'effetto svantaggioso di determinare un raffreddamento dei fumi impedendone la stratificazione, con effetti deleteri sull'autosoccorso.

L'Analisi di Rischio Quantitativa è la metodologia analitica e ben definita identificata come idonea per determinare il livello di rischio proprio delle gallerie presenti sulla rete stradale italiana recependo le raccomandazioni contenute nella Direttiva 2004/54/CE inerente i Requisiti Minimi di Sicurezza per le gallerie presenti sulla rete stradale trans-europea (Rete TERN). L'Analisi di Rischio Quantitativa nelle gallerie stradali deve essere sviluppata adottando un approccio sistemico adatto allo specifico ambito del sistema galleria. **Il livello di dettaglio da adottare nell'applicazione della metodologia di Analisi di Rischio Quantitativa al sistema galleria stradale deve consentire la determinazione della salvabilità degli utenti per scenari derivanti dagli eventi incidentali considerati critici nello specifico ambiente "Galleria".**

Rispetto all'enunciazione evidenziata sono sottostanti i principi di completezza, robustezza e informatività dichiarati all'inizio.

Con riferimento ai dettami della Direttiva 2004/54/CE, per sistema galleria si intende il complesso costituito dagli elementi strutturali, dall'ambiente circostante l'opera, dal traffico, pertinente l'opera e l'ambiente, dalle dotazioni di sicurezza impiantistiche e dalle procedure di gestione che caratterizzano il tracciato in sotterraneo della strada. L'Analisi di Rischio deve essere mirata ad ottenere una misura quantitativa del rischio associato alla singola galleria su un fissato lasso temporale e con riferimento a ben definiti indicatori quantitativi.

Visto l'Articolo 13 del decreto e le raccomandazioni della Direttiva 2004/54/CE concernenti i parametri di sicurezza ed i requisiti minimi obbligatori (vedi ALLEGATO 2), **è possibile identificare i requisiti minimi obbligatori corrispondenti ad intervalli di valori dei parametri di sicurezza Lunghezza e Volume di Traffico.**

Un progetto di nuova galleria deve possedere tutti i requisiti minimi previsti nell'ALLEGATO 2.

Per una galleria esistente che non possieda tutti i requisiti obbligatori previsti in base ai suoi parametri si richiede un adeguamento con misure di sicurezza alternative che rendano il livello di sicurezza equivalente al livello di sicurezza proprio della galleria virtuale.

Tale previsione corrisponde all'evidenza di esistenza di classi omogenee di struttura per le quali sono identificati i requisiti minimi da garantire, in alternativa all'adozione dei quali è consentito il procedimento di deroga sostanziale costituito dall'approccio comparativo individuato all'art. 13 e quindi richiamato.

I requisiti minimi di sicurezza dell'Allegato II sono prevalentemente preposti a svolgere un ruolo specifico di protezione, mitigazione o inibizione del potenziale incremento di pericolosità dell'evento iniziatore (ad es. potenza termica del focolaio, velocità di propagazione dei fumi, etc.), nonché di facilitazione delle azioni di auto-soccorso per l'esodo (ad es. uscite di emergenza, visibilità, riduzione di opacità, comunicazione efficace, etc.) e di soccorso in condizioni di emergenza. Alcuni dei suddetti requisiti svolgono anche un ruolo generale di prevenzione in condizioni di esercizio.

L'evidenza del fatto che i requisiti minimi sono principalmente individuati tra le misure di mitigazione non dovrebbe costituire affatto un limite all'adozione di misure di contenimento dell'incidentalità tipica che, in quanto misure di prevenzioni, sono generalmente preferibili, tendenzialmente a basso costo, e verificabili con approccio *before – after* e sulla base di evidenze consolidate.

L'Analisi di Rischio deve essere sviluppata in tutte le circostanze indicate nel D. Lgs. ed in particolare per ogni galleria che, non ottemperando ai requisiti minimi obbligatori, necessita dell'adozione di misure di sicurezza alternative al fine di dimostrare che esse siano in grado di garantire un livello di sicurezza equivalente od accresciuto, ovvero, per ogni galleria che abbia caratteristiche speciali rispetto ai parametri di sicurezza individuati dalla stessa Direttiva.

2. Scopo

L'Analisi di Rischio ha lo scopo di misurare, nell'ambito di applicazione del presente decreto, il livello di rischio di una galleria stradale in termini di opportuni indicatori quantitativi.

Un'analisi di rischio quantitativa di tipo comparativo è richiesta per una galleria esistente che presenti un qualche deficit nei requisiti minimi ascritti al gruppo di appartenenza.

La galleria virtuale è la galleria identificata dagli stessi parametri di sicurezza della galleria in esame e che possiede tutti i requisiti minimi obbligatori del gruppo di appartenenza caratterizzati da specifiche prestazioni in assenza di malfunzionamento.

La comparazione, in termini di analisi di rischio, è condotta tra la galleria virtuale e la galleria reale con un adeguamento progettuale realizzato introducendo requisiti alternativi e/o misure di sicurezza compensative a parità di condizioni di funzionamento.

Le condizioni prestazionali sono definite in termini di affidabilità ed efficienza dei dispositivi e dei sottosistemi che realizzano le misure di sicurezza.

Una galleria considerata speciale rispetto ai parametri di sicurezza deve essere soggetta ad analisi prestazionale delle misure di sicurezza da adottare al fine della riduzione del rischio.

Già nella declaratoria dello scopo emerge l'inevitabile adozione di metodi quantitativi consistenti e consolidati per la misura delle prestazioni dei sottosistemi; come più volte coerentemente richiamato, tale previsione non può che comportare l'adozione dell'approccio di calcolo RAMS di cui alla norma tecnica IEC 61508. Nonostante, infatti, l'approccio RAMS non veda uno standard applicativo specifico per il settore delle infrastrutture stradali, non esistono alternative consistenti e consolidate al metodo. Si consideri inoltre che tale approccio è correntemente utilizzato per la progettazione della componente veicolare del sistema.

L'analisi di rischio, in questo caso, deve dimostrare che l'insieme delle misure di prevenzione, protezione, mitigazione o inibizione del potenziale incremento di pericolosità dell'evento iniziatore, nonché di facilitazione delle azioni di auto-soccorso e di soccorso, sia tale da assicurare che il livello di rischio della struttura ricada al di sotto del livello di rischio tollerabile considerando il malfunzionamento dei singoli sottosistemi.

3. Metodologia

La metodologia di Analisi di Rischio Quantitativa si deve riferire ad una galleria determinata e deve tener conto di:

- **incidentalità caratteristica della galleria, rilevata o di progetto;**
- **tutti gli elementi inerenti alle caratteristiche progettuali della stessa, come la lunghezza, la geometria e la pendenza;**
- **caratteristiche prestazionali dei requisiti di sicurezza di cui la galleria stessa è dotata;**
- **condizioni di traffico che incidono sulla sicurezza, quali il volume, la composizione ed il tipo di traffico, in particolare la percentuale di veicoli pesanti in transito giornaliero.**

La metodologia considera una galleria con le sue specifiche caratteristiche localizzata sul territorio ed in interazione con l'ambiente circostante.

Sulla base di tali assunzioni è necessario definire un metodo complesso che, attraverso moduli risolutivi specifici, consideri ogni aspetto e verifichi la possibilità di una specifica influenza di ciascuno nell'economia del calcolo complessivo. In tale accezione l'approccio olistico deve mantenere traccia dei contributi di calcolo determinati dagli specifici aspetti, e determinare una analisi completa, robusta e massimamente informativa.

I sottosistemi di sicurezza determinano la risposta del sistema alle condizioni di emergenza e conseguentemente definiscono le condizioni di pericolo per la **popolazione esposta** agli eventi critici possibili.

Si noti l'utilizzo incongruente (rispetto alla definizione di glossario) della popolazione esposta. In realtà, per coerenza di modello, il termine si riferisce in questo caso ai soggetti esposti al flusso di pericolo modellizzato, e non alla popolazione destinataria in astratto degli effetti dell'incidentalità.

Gli scenari incidentali e la loro evoluzione in galleria in termini di pericolosità sono rappresentati mediante modelli che includano come **elementi costitutivi l'albero delle cause, l'evento critico iniziatore e l'albero degli eventi**.

Resta così assolutamente identificato il metodo di Quantitative Risk Analysis riconducibile al cd bow-tie model.

L'evento critico iniziatore è caratterizzato in termini di probabilità di accadimento e pericolosità potenziale sulla base di evidenze statistiche per i sistemi galleria in generale, eventualmente integrate da dati disponibili per la singola galleria con riferimento ai tassi di incidentalità rilevati ed alle specificità progettuali della stessa.

La previsione circa la stima della probabilità specifica da assegnare all'evento iniziatore può essere letta come l'indicazione preferenziale all'utilizzo di dati di struttura, o di tratta. Resta, in caso di carenza di dati, la possibilità, con approccio critico (come ad esempio proposto nel corrente lavoro) di adottare tassi ricavati da gruppi omogenei di gallerie e procedere quindi a valutazioni campionarie allargate col principio di analogia. Resta la possibilità, infine, di procedere a stime quantitative di eventi a occorrenza 0, applicando la regola del tre (vedi capitolo 2, parte statistica) e produrre analisi per limite superiore dell'intervallo di confidenza. Tale approccio costituisce l'ultima ratio per la quantificazione di un evento non occorso nella galleria di interesse e stante l'impossibilità di adottare campioni aggregati di gallerie in base a verifica di analogia.

L'albero degli eventi e' caratterizzato in termini di probabilità di accadimento degli eventi critici iniziatori e di probabilità condizionate di evoluzione lungo i singoli specifici rami, come espressione dell'affidabilità e dell'efficienza delle misure di sicurezza installate o previste.

Gli eventi terminali dei rami dell'albero degli eventi, determinati in numero dalle combinazioni mutuamente esclusive delle azioni di condizionamento esercitate dalle misure mitigative previste, individuano gli scenari di fine emergenza possibili.

A migliore specificazione delle indicazioni fornite, l'albero degli eventi è una struttura di algebra grafica caratterizzata dall'essere partitore di probabilità. L'albero è sviluppato da destra a sinistra e nella direzione del tempo crescente, e specifica l'analisi sequenziale di tutti i sottosistemi, funzioni, parametri e condizioni che determinano il flusso del pericolo verso gli esposti. Ogni livello di analisi richiede la definizione, con approccio effettivo, della disponibilità / efficacia della funzione rappresentata, e dovrà quindi essere sviluppata, per ciascun livello:

- L'analisi RAMS della disponibilità della prestazione, se trattasi di impianto che fornisce prestazione di mitigazione;
- La adeguata rappresentazione della complessità, con lo sviluppo di una metafora numerabile, ove si tratti di un livello che individua un parametro di distribuzione (come una distanza da percorrere o la collocazione spaziale di un fenomeno); il numero delle classi da considerare dipende dall'ampiezza del range del parametro da rappresentare, e sarà necessario aumentare il numero di classi in ragione dell'incremento di variabilità dell'effetto del parametro sul rischio; in caso di dubbi può essere accettabile, almeno in via provvisoria, utilizzare come punti di condensazione i valori medio, i quartili al 25° e al 75° percentile e due punti di condensazione sulle code, preferibilmente al 5° e al 95° percentile.

La salvabilità degli utenti in una specifica galleria è determinata attraverso la quantificazione e la zonizzazione del flusso del pericolo all'interno della struttura. Le diverse zone del flusso del pericolo individuano le condizioni nelle quali si realizza il processo di esodo degli utenti dalla galleria.

La caratterizzazione del flusso del pericolo è ottenuta modellando l'evoluzione condizionata dai vincoli posti dalle misure di mitigazione previste dei fenomeni chimici e fisici che si instaurano in conseguenza dell'accadimento di eventi critici iniziatori.

La modellazione del flusso del pericolo è attuata con livelli di dettaglio diversi a seconda delle necessità ed utilizzando le migliori tecniche note e disponibili.

Tale indicazione richiede lo sviluppo di una struttura ad albero di eventi che sia completa nel cogliere l'intervento rilevante degli impianti condizionanti il flusso del pericolo e determini, per combinazione reciproca con la variabilità geometrica di luogo incidentale e uscite di sicurezza, una completa rappresentazione della variabilità degli scenari. E' compatibile con questo scopo solo una struttura ETA sufficientemente complessa, che come ordine di grandezza presenti 10^3 - 10^4 esiti finali, ottenuti introducendo le molteplicità necessarie in tutti i livelli ETA rilevanti e necessari alla stima.

I risultati della modellazione del flusso del pericolo costituiscono i dati di ingresso per la simulazione del processo di esodo degli utenti dalla struttura.

Il numero degli utenti coinvolti nel processo di esodo è determinato attraverso la formulazione e la soluzione di idonei modelli di formazione delle code nella galleria analizzata.

Lo specifico studio del processo di accodamento è condizione essenziale alla compilazione di una robusta valutazione simulativa. Si esplicita inoltre che l'accodamento non deve essere semplicemente modellizzato sulla base della condizione di traffico generica (considerando cioè l'evento incidentale caratterizzato da distribuzione uniforme sul tempo) ma deve invece comprendere uno studio concatenato che evidenzi:

1. La frequenza attesa di intensità del traffico;
2. La frequenza attesa dell'incidente sulle specifiche fasce di traffico individuate (ricordando che il principale fattore di esposizione incidentale è, oltre alla lunghezza della struttura, la quantità di veicoli in attraversamento;
3. La corrispondente coda determinata dalla specifica fascia di traffico corrispondente allo specifico scenario.

Per cogliere compiutamente il fenomeno, con approccio frequentista, è in genere necessario considerare una modellazione su 15-25 fasce di intensità di traffico; lo studio dell'accodamento è, di conseguenza, in genere il determinante dell'ETA a maggior grado di molteplicità.

I risultati dell'analisi di rischio sono utilizzati per costruire diversi indicatori quantitativi del rischio, a seconda delle necessità.

Il rischio connesso ad una galleria definito come valore atteso del danno ovvero come distribuzione delle probabilità di superamento di predeterminate soglie di danno (Distribuzioni Cumulate Complementari riportate sul cosiddetto piano F - N).

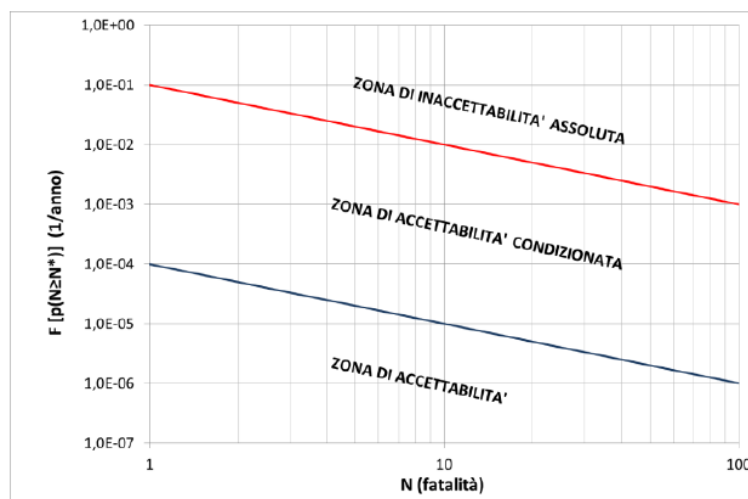
- **Il rischio come valore atteso del danno si ottiene come somma dei prodotti tra le probabilità dei singoli eventi critici iniziatori e le corrispondenti sommatorie delle probabilità degli eventi terminali dei singoli rami dell'albero degli eventi moltiplicate per i corrispondenti indicatori di danno espressi in numero di vittime normalizzato all'anno.**

Più correttamente: il rischio come valore atteso del danno si ottiene dalla sommatoria dei prodotti p_i e d_i associati a ciascuno scenario di fine ramo; le p_i corrispondono ai valori di probabilità di realizzazione dello specifico scenario sul periodo di riferimento, e sono ottenute applicando la produttoria alle frequenze di ripartizione dell'ETA nel percorso a ritroso tra lo scenario di fine ramo e l'evento iniziatore, moltiplicata per la probabilità di quest'ultimo.

- Il rischio come distribuzione delle probabilità di superamento di predeterminate soglie di danno è rappresentato graficamente sul piano F - N (dove F indica la probabilità di superamento della soglia e N il numero di fatalità) dalla distribuzione cumulata complementare (probabilità di superamento delle soglie di danno) ottenuta in corrispondenza dei valori degli indicatori di danno (soglie di danno) associati agli eventi terminali dei singoli rami dell'albero degli eventi.

4. Obiettivi di Sicurezza e Criteri di Accettabilità

Gli obiettivi di sicurezza ed i criteri di accettabilità del rischio per le gallerie stradali, da applicare ad ogni singola canna nel caso di gallerie a più fornici indipendenti, sono rappresentati dalle linee soglia riportate nella figura seguente.



Il livello di rischio accettabile rappresenta un riferimento utile per la Commissione permanente delle gallerie per la valutazione dei risultati dell'Analisi di Rischio effettuata secondo il criterio ALARP.

In tutti i casi previsti dal decreto, incluso il caso in cui si debba verificare il livello di rischio di una galleria con caratteristiche speciali, si deve direttamente confrontare la distribuzione cumulata complementare della galleria reale con il limite di rischio tollerabile.

Quando viene richiesta l'analisi di rischio quantitativa con criterio comparativo per la dimostrazione dell'equivalenza garantita da misure compensative, tale analisi deve essere condotta sulla galleria reale dotata di requisiti integrativi verificando che il valore atteso del danno della galleria in esame sia uguale o inferiore a quello della galleria virtuale a parità di condizioni di funzionamento dei sottosistemi.

Ai fini dell'analisi di rischio dovranno essere usati dati tratti dalla Banca Dati prevista nell' articolo 13, ovvero provenienti da fonti ufficiali o reperibili in letteratura e ritenuti significativi dalla Commissione permanente per le gallerie.

La Commissione, dopo un opportuno periodo di osservazione, si riserva, in base all'evoluzione ed alla previsione del traffico e dell'incidentalità specifica delle gallerie, di modificare i termini di applicazione della presente procedura.

7.5 Proposta del metodo esperto di analisi di rischio quantitativa conforme allo spirito e alla lettera del D. Lgs. 264/2006

Operata una lettura sistematica della norma, ed evidenziati – e meglio dichiarati – i presupposti e gli obiettivi sottostanti, risulta verificata l'ipotesi di applicare al caso l'approccio proposto nel presente lavoro, e che è definito nell'intero elaborato, e applicato nel Capitolo 5.

Il lavoro ha preso spunto dalle criticità evidenziate in premessa, a partire dall'opportunità di individuare un processo di armonizzazione e migliorata sinergia tra gli strumenti di misura, valutazione e gestione rischio in uso nei vari ambiti della sicurezza delle infrastrutture stradali, sostanzialmente definiti da 3 distinte Direttive e dei 3 corrispondenti strumenti attuativi nazionali.

Per uno dei tre ambiti – quello delle gallerie TERN di lunghezza superiore ai 500 m – il legislatore italiano ha previsto l'ambizioso obbligo alla gestione della sicurezza sulla base di analisi del rischio quantitativa (QRA). Per l'ambito TERN complementare, sono invece in uso sistemi complessi di valutazione esperta che vedono metodi di minore ambizione ma di sicura efficacia, finalizzati alla riduzione dell'incidentalità tipica. Per la valutazione di rischio richiesta dalla norma con riferimento all'analisi di resilienza delle strade come Infrastrutture Critiche non esiste, infine, un riferimento specifico di sicuro affidamento.

Il lavoro svolto ha evidenziato che:

1. l'analisi di rischio quantitativa correntemente applicata alle gallerie stradali in applicazione del D. Lgs. 264/2006 presenta caratteristiche di qualità non all'altezza degli scopi che ne hanno determinato l'adozione;
2. è possibile irrobustire il processo di valutazione, e giungere ad un metodo conforme alle previsioni di norma, caratterizzato da completezza, robustezza e informatività, procedendo ad analisi di maggiore respiro dell'incidentalità di tronco e del gruppo di gallerie omogenee, selezionate sulla base dei parametri ex punto 1 dell'Allegato 3 del D. Lgs (parametri rilevanti) e sulla base delle valutazioni di specie con riferimento ai parametri rilevanti ai sensi delle Linee guida adottate col DM in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali del 2 maggio del 2012; così operando una convergenza tra tecniche di analisi e norme inopportuna definite per compartimenti stagni;
3. è certamente auspicabile che le previsioni di intervento finalizzato alla prevenzione incidentale ex D. Lgs. 35/2011 siano estese a tutte le gallerie; in assenza di ciò è possibile introdurre una politica attiva di prevenzione incidentale per le gallerie di rete TERN sopra a 500 m solo in via interpretativa (per quanto con forti argomenti a favore) ai sensi delle previsioni generali del D. Lgs. 264/2006;
4. il costruito di analisi di rischio proposto è sufficientemente strutturato da poter essere adottato, in via esplorativa, e col supporto di strumenti di misura ricavati da applicazioni di teoria dei grafi e ricerca operativa, allo scopo dell'analisi di rischio delle infrastrutture viarie come infrastrutture critiche; così chiudendo il tema in una visione sinergica e coerente di scopi, strumenti di analisi, misura e gestione.

Elementi di rilevante significato, ed evidenze suscettibili di essere proposte come principi generali sono stati inoltre ricavati dall'applicazione della procedura esperta al caso di studio; in termini sistemici:

1. l'approccio RAMS si propone quale unico strumento in grado di corrispondere alle previsioni di stima della disponibilità ed efficacia impiantistica prevista dalla norma;
2. la qualità dei dati disponibili nel settore è bassa, e in genere le banche dati ottenute per aggregazione progressiva di più fonti (Gestori) diverse sono affette da diverso taglio della piramide degli incidenti; questo grave problema (che inevitabilmente si riflette sulla qualità delle analisi ottenibili) può essere superato con maggiori controlli attivi da parte delle strutture amministrative sorveglianti e dalla definizione, che sarebbe opportuno fosse fatta al più alto livello possibile, di una tassonomia univoca, chiara e definitiva sull'incidentalità, le sue tipologie e i suoi strati;

3. le vulnerabilità cui è esposto il metodo di analisi di rischio richiederebbero, oltre alla garanzia di indipendenza del redattore, anche una ragionevole certezza di competenza di questi, sia verso la responsabilità professionale che instaura col committente – Gestore, sia (a maggior ragione) verso la collettività per la delicatezza degli effetti delle valutazioni che propone; tale garanzia di competenza minima è d'altronde prevista per la qualificazione degli esperti ex DM in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali del 2 maggio del 2012.

Con riferimento alle linee di intervento sulla prestazione di sicurezza delle gallerie stradali, in termini specifici:

1. la migliore riduzione del rischio specifico di galleria può essere ottenuta applicando alla tratta confinata le medesime strategie di prevenzione incidentale già in uso per i tronchi a cielo aperto; in particolare sarà ottenibile un beneficio tanto maggiore quanto più elevata risulterà l'incidentalità tipica della tratta; ciò indica l'ulteriore evidenza circa l'opportunità di applicare anche alle gallerie di rete TERN di lunghezza superiore a 500 m le misure di prevenzione incidentale previste dal D. Lgs. 35/2011, e in particolare il metodo fondato sul giudizio esperto attraverso ispezioni, come stabilite dal DM 2/5/2012 Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali; ciò significa che tutti gli interventi finalizzati ad una riduzione dell'incidentalità tipica generalmente validi (per quanto verificati sulla base della bibliografia disponibile e/o di dedicati studi di effetto *before-after*), costituiscono una ottima strategia di intervento;
2. tra le varie prestazioni rilevanti nel determinare, in termini protettivi, effetti efficaci, la principale deve essere quella di ridurre al massimo la numerosità degli esposti agli incidenti; tale strategia, che corrisponde ad una prevenzione di secondo livello (dal punto di vista del sopraggiungente, il mancato accesso ad una galleria sede di incidente è una prevenzione alla partecipazione allo scenario pericoloso) è tanto efficace quanto poco attuata, considerando che non risulta, ad oggi, alcun investimento rilevante né alcuno studio mirato finalizzato a restituire chiara efficacia al sistema di interdizione all'accesso, costituito semplicemente da semaforo all'ingresso e preceduto – non sempre – da pannelli a messaggio variabile, con l'effetto di un ragionevole superamento anche in condizione di rosso almeno da parte dei primi utenti sopraggiunti;
3. per il miglioramento in genere della disponibilità delle prestazioni sarebbe fondamentale garantire un accesso in manutenzione con frequenza più elevata, considerato che la maggior quota dell'indisponibilità patita dagli impianti è proprio determinata dall'attesa dell'occasione di accesso all'impianto in guasto (in generale, per quanto verificato in più occasioni, nell'ordine dei 7-10 giorni medi).

9.1 Principali norme analizzate

1. DPR 151/2011 (2011). Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4 -quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122. (GU n. 221 del 22-9-2011)
2. D, Lgs. 61/2011, (2011). Attuazione della Direttiva 2008/114/CE recante l'individuazione e la designazione delle infrastrutture critiche europee e la valutazione della necessità di migliorarne la protezione. (GU Serie Generale n.102 del 04-05-2011)
3. D. Lgs. 264/2006 (2006). Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea. (GU Serie Generale n.235 del 09-10-2006 - Suppl. Ordinario n. 195)
4. D. Lgs. 35/2011 (2011). Attuazione della direttiva 2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture. (GU n. 81 del 8-4-2011)

9.2 Principali pubblicazioni analizzate

5. AA.VV. IEC 61508 (2014). Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza
6. AA.VV., (2014) H2020 Coordination and Support Action, Topic: MG-8.1b-2014 "Smarter design, construction and maintenance" Grant Agreement number: 652821.
7. Aashto. (2010). Highway Safety Manual, 1st edn. Washington, DC, USA.
8. AAVV. (1983). Technical Committee on Road Tunnel. Sidney: PIARC.
9. AAVV. (1993). Road Safety in Tunnels . PIARC.
10. AAVV. (1995). Road Safety in Tunnels. PIARC, ISBN- 2-84060-036-6.
11. AAVV. (1995). Technical Committee on Road Tunnel. Montreal: PIARC.
12. AAVV. (2002). Safety Standards for Road Design and Redesign. Final Report. SAFESTAR.
13. AAVV. (2003). Thematic Network Fire in Tunnels. General Report, Thematic network on fires in tunnels (FIT).
14. AAVV. (2006). Norway Tunnel Safety. Oslo: OECD Studies in Risk Management.
15. AAVV. (2006). US vehicle fire trends and patterns. National Fire Protection Association.
16. AAVV. (2008). Human factors and road tunnel safety regarding users. PIARC Technical.
17. AAVV. (2009). The road safety of motorway tunnels. Leidschendam, the Netherlands: SWOV Fact Sheet.
18. Abdel-Aty, E. &. (2000). Modeling traffic accident occurrence and involvement. Accident Analysis and Prevention, 32(5): 633–642.
19. Abdelwahab, H. T.-A. (2002). Artificial neural networks and logit models for traffic safety analysis of toll plazas. Transportation Research Record, 1784(1), 115-125.
20. Åkerstedt, T. C. (2008). Predicting road crashes from a mathematical model of alertness regulation—The Sleep/Wake Predictor. Accident Analysis & Prevention, 40(4), 1480-1485.
21. Ale, B. J. M. (2005). Tolerable or acceptable: A comparison of risk regulation in the United Kingdom and in the Netherlands. Risk analysis, 25(2), 231-241.
22. Amundsen, F. H. (1994). Studies of driver behaviour in Norwegian road tunnels. Tunnelling and underground space technology, 9(1), 9-15.
23. Amundsen, F. R. (2000). Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 15 (1), 3–11.
24. Amundsen, F. H. (2009). Studies on Norwegian Road Tunnels II: an analysis on traffic accidents in road tunnels 2001-2006.
25. Aven, T., & Heide, B. (2009). Reliability and validity of risk analysis. Reliability Engineering & System Safety, 94(11), 1862-1868.
26. Azeredo Lopes, J. C. (2011). Accident Prediction Models for Rural Junctions on Four European Countries. ERA-NET ROAD, Brussels, Belgium and SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, the Netherlands.

27. Bahr, N. J. (2014). System safety engineering and risk assessment: a practical approach. CRC Press.
28. Beard, A. &. (2012). Handbook of tunnel fire safety. ICE publishing.
29. Brannvesen, S. F. (2011). Brann i Oslofjordtunnelen. Oslo: Utvidet.
30. Cafiso S, D. G. (2010). Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables. . *Accident Analysis and Prevention* , 42(4): 1072–1079.
31. Caliendo C, G. M. (2007). A crash-prediction model for multilane roads. *Accident Analysis and Prevention*, 39(4): 657–670.
32. Caliendo, C. &. (2012). Evaluation of traffic and fire accidents in road tunnels, and a cost-benefit analysis. . *Int. J. Civ. Eng. Res*, 3(3), 201-222.
33. Caliendo, C. D. (2013). A crash-prediction model for road tunnels. *Accident Analysis & Prevention*, 55, 107-115.
34. Caliendo, C. &. (2014). A new bivariate regression model for the simultaneous analysis of total and severe crashes occurrence. *Journal of Transportation Safety & Security*, 6(1), 78-92.
35. Caliendo, C. D. (2016). Comparison and analysis of road tunnel traffic accident frequencies and rates using random-parameter models. . *Journal of Transportation Safety & Security*, 8(2), 177-195.
36. Caplan, R. J., Pajak, T. F., & Cox, J. D. (1994). Analysis of the probability and risk of cause-specific failure. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*, 29(5), 1183-1186.
37. Carbone, T. A., & Tippett, D. D. (2004). Project risk management using the project risk FMEA. *Engineering Management Journal*, 16(4), 28-35.
38. Carroll, R. J., Ruppert, D., Stefanski, L. A., & Crainiceanu, C. M. (2006). Measurement error in nonlinear models: a modern perspective. CRC press.
39. Ceder A., &. L. (1982). Relationships between road accidents and hourly traffic flow I: analyses and interpretation. *Accident Analysis & Prevention*, 14(1), 19-34.
40. Ceder, A. (1982). Relationships between road accidents and hourly traffic flow II: Probabilistic approach. . *Accident Analysis & Prevention*, 14(1), 35-44.
41. Chin, H. C. (s.d.). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 35(2), 253-259.
42. Commandeur, J. J.-H. (2013). On statistical inference in time series analysis of the evolution of road safety . *Accident Analysis & Prevention*, 60, 424-434.
43. Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Nucleo Investigativo Incendi, Capannelle – Roma, “Gli incendi di natura elettrica”
44. Cox Jr, L. A. T. (2009). Game theory and risk analysis. *Risk Analysis*, 29(8), 1062-1068.
45. David J. Smith, Kenneth G. L. Simpson (2001) “Safety Critical Systems Handbook”, Third Edition, Elsevier Ltd.
46. David J. Smith (2011) “Reliability, Maintainability and Risk”, Eighth Edition, Elsevier Ltd.
47. Deublein, M. S. (2013). Prediction of road accidents: A Bayesian hierarchical approach. *Accident Analysis & Prevention*, 51, 274-291.
48. Dietze M, E. D. (2008). Safety Performance Function - Deliverable D.10. Bergisch Gladbach, Germany: RiPCORD–iSEREST Consortium, Bundesanstalt für Straßenwesen.
49. Direttiva 2004/54/CE del Parlamento europeo e del Consiglio (2004). Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Rete stradale transeuropea (GU L 167 del 30.4.2004
50. Direttiva 2008/96/ce del parlamento europeo e del consiglio del 19 novembre 2008. Gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali
51. Ditlevsen, O. (2003). Decision modeling and acceptance criteria. *Structural Safety*, 25(2), 165-191.
52. Domenichini, L. L. (2017). Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: a driving simulator study. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(2), 216-238.
53. Donnell, E. T. (2006). Predicting the frequency of median barrier crashes on Pennsylvania interstate highways. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 590-599.
54. Eirik Bjorheim Abrahamsen, Terje Aven. Why risk acceptance criteria need to be defined by the authorities and not the industry? *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 105, September 2012, Pages 47-50
55. El-Basyouny, K. &. (2009). Accident prediction models with random corridor parameters. . *Accident Analysis & Prevention*, 41(5), 1118-1123.
56. Elvik, R. (2004). To what extent can theory account for the findings of road safety evaluation studies? *Accident Analysis & Prevention*, 36(5), 841-849.

57. Elvik, R. (2005). Speed and road safety: synthesis of evidence from evaluation studies. *Transportation Research Record*, 1908(1), 59-69.
58. Elvik, R. (2008). The predictive validity of empirical Bayes estimates of road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 40(6), 1964-1969.
59. Enrico Zio, Nicola Pedroni (2012) "Uncertainty characterization in risk analysis for decision-making practice", *Les cahiers de la sécurité industrielle*, Foundation for an Industrial Safety Culture, luglio 2012, Tolosa, Francia
60. Erik Vanem. Ethics and fundamental principles of risk acceptance criteria. *Safety Science*, Volume 50, Issue 4, April 2012, Pages 958–967
61. Fernandes, A. &. (2013). An approach to accidents modeling based on compounds road environments. . *Accident Analysis & Prevention*, 53, 39-45.
62. Fridstrøm, L. I. (1995). Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accid. Anal. Prev.*, 27, 1–20.
63. González, M. P. (2020). Interregional inequality and road accident rates in Spain. *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105347.
64. Guarascio, M., Lombardi, M. S., Rossi, G., & Sciarra, G. (2007, June). Risk analysis and acceptability criteria. In *The Second International Conference on Safety and Security Engineering*.
65. Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi, G. (2007). L'Analisi di Rischio nel Quadro Normativo. In: *Sicurezza in galleria: normativa, progetti nuove tecnologie (S.I.G.)*. Genova, 27-28 MARZO 2007.
66. Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi, G., Sciarra, G. (2009). Risk analysis and reliability based design in tunnel fire safety - *Facoltà di Ingegneria, Università di Roma La Sapienza SAFE 2009*.
67. Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi, G., Sciarra, G., Lamendola, S. (2009). Analisi di rischio quantitativa probabilizzata per le gallerie stradali secondo le Linee guida ANAS. *Convegno scientifico nazionale – "Sicurezza nei sistemi complessi" – Bari 2009*.
68. Haack, A. (2001). Technical Report-Part 1-Design Fire Scenarios. *Fires in tunnels (FIT)*.
69. Haack, A. (2002). Current safety issues in traffic tunnels. . *Tunnelling and underground space technology*, 17(2), 117-127.
70. Hadi, M. A. (1995). Estimating safety effects of cross-section design for various highway types using Negative Binomial regression. *Transp. Res. Rec.*, 1500.
71. Hakim, S. S. (1991). A critical review of macro models for road accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 23(5), 379-400.
72. Hamid Jahanian (2014) "Generalizing PFD formulas of IEC 61508 for KooN configurations", Elsevier Ltd., *ISA Transactions* 55 (2015) pagg. 168–174
73. Hauer, E. (1997). *Observational before-after studies in road safety*. Oxford: Pergamon Press.
74. Hauer, E. (2001). Overdispersion in modelling accidents on road sections and in Empirical Bayes estimation. *Accident Analysis & Prevention*, 33(6), 799-808.
75. Hauer, E. (2004). Statistical road safety modeling. *Proceedings of the 83rd TRB Annual Meeting*, January 11–15. Washington, DC, USA.
76. Híjar, M. C. (2000). Risk factors in highway traffic accidents: a case control study. . *Accident Analysis & Prevention*, 32(5), 703-709.
77. Hirst, W. M. (2004). Sources of error in road safety scheme evaluation: a quantified comparison of current methods. *Accident Analysis & Prevention*, 36(5), 705-715.
78. Hiselius, L. W. (2004). Estimating the relationship between accident frequency and homogeneous and inhomogeneous traffic flows. *Accident analysis & prevention*, 36(6), 985-992.
79. Hiselius, L. W. (2004). Estimating the relationship between accident frequency and homogeneous and inhomogeneous traffic flows. *Accident analysis & prevention*, 36(6), 985-992.
80. Hoegberg, L. (1998). Risk perception, safety goals and regulatory decision-making. *Reliability Engineering & System Safety*, 59(1), 135-139.
81. Hokstad (2005) "Probability of Failure on Demand (PFD) - The Formulas of IEC 61508 with Focus on the 1oo2D Voting", SINTEF, Conference ESREL 2005
82. Holický, M. (2007). Risk criteria for road tunnels. In *Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication*. Stanford University.
83. Hui Jin (2013) "A contribution to reliability assessment of safety-instrumented systems", tesi di dottorato, Norwegian University of Science and Technology

84. Inger Lise Johansen, Marvin Rausand. Foundations and choice of risk metrics. *Safety Science*, Volume 62, February 2014, Pages 386-399
85. Jan Erik Vinnem. Risk analysis and risk acceptance criteria in the planning processes of hazardous facilities—A case of an LNG plant in an urban area. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 95, Issue 6, June 2010, Pages 662-670
86. Jones, A. P. (2003). The use of multilevel models for the prediction of road accident outcomes. *Accident Analysis & Prevention*, 35(1), 59-69.
87. Jonkman, S. N., Van Gelder, P. H. A. J. M., & Vrijling, J. K. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, 99(1), 1-30.
88. Jörg R. Müller, Tobias Ständer, Ekehard Schnieder (2009) "Improving System Safety Modelling in accordance to IEC 61508 by using Monte Carlo Simulations", 2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems DCDS'09, Bari, Italia, 10-12 giugno 2009
89. Joshua, S. C. (1990). Estimating truck accident rate and involvements using linear and Poisson regression models. *Transportation planning and Technology*, 15(1), 41-58.
90. Jundika C. Kurnia, Agus P. Sasmito, Arun S. Mujumdar, (2014) "CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces", Elsevier, *Applied Mathematical Modelling* 38 (2014) 3467–3484
91. K., L. (2000). Road safety in tunnel. *Transportation Research Record*, 1740, Paper No. 00-0155.
92. Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk analysis*, 1(1), 11-27.
93. Katharina Fischer, Edgar Virguez, Mauricio Sánchez-Silva, Michael H. Faber. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria. *Structural Safety*, Volume 44, September 2013, Pages 37-46
94. Kieselbach, R. (2004). Curious cases of failure. *Engineering Failure Analysis*, 11(4), 501-513.
95. Kircher, K. A. (2012). The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 47, 153-161.
96. Knuiman, M. C. (1993). Association of median width and highway accident rates. *Transp. Res. Rec.*, 1401.
97. Kwon, O. H. (2015). Application of classification algorithms for analysis of road safety risk factor dependencies. *Accident Analysis & Prevention*, 75, 1-15.
98. Kyriakidis, M., Hirsch, R., & Majumdar, A. (2012). Metro railway safety: An analysis of accident precursors. *Safety science*, 50(7), 1535-1548.
99. La Torre F, D. L. (2014). Transferability of the Highway Safety Manual freeway model to the Italian motorway network. *Transportation Research Record*, 2435, pp. 61–71.
100. La Torre, F. D. (2016). Development of a transnational accident prediction model. *Transportation research procedia*, 14, 1772-1781.
101. La Torre, F. M. (2019). Development of an accident prediction model for Italian freeways. *Accident Analysis & Prevention*, 124, 1-11.
102. Li, J. S. (2003). Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems. *Tunnelling and underground space technology*, 18(5), 435-452.
103. Lord, D. &.-M. (2008). Effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter of Poisson-gamma models for modeling motor vehicle crashes: A Bayesian perspective. *Safety Science*, 46(5), 751-770.
104. Lord, D. W. (2007). Further notes on the application of zero-inflated models in highway safety. *Accident Analysis & Prevention*, 39(1), 53-57.
105. Luis Barberá, Adolfo Crespo, Pablo Viveros, Fredy Kristjanpoller (2012) "RAM analysis of mining process: a case study of a Copper Smelting Process in the field of mining, Chile", 2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology Universidad de Sevilla, Siviglia, Spagna, 22-23 novembre 2012
106. Maher, M. J. (1996). A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. *Accident Analysis & Prevention*, 28(3), 281-296.
107. Malin, F. N. (2019). Accident risk of road and weather conditions on different road types. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 181-188.
108. Mara Lombardi, Massimo Guarascio, Giuliano Rossi (2014) "The management of uncertainty: model for evaluation of human error probability in railway system", *American Journal of Applied Sciences* 11 (3) pagg. 381-390

109. Martinelli F, L. T. (2009). Calibration of the Highway Safety Manual's accident prediction model for Italian secondary road network. *Transportation Research Record*, 2103, pp. 1–9.
110. Marvin Rausand, Arnljot Hoyland (2004) "System Reliability Theory. Models, Statistical Methods and Applications", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
111. Mary Ann Lundteigen, Marvin Rausand (2006) "Assessment of Hardware Safety Integrity Requirements", 30th ESReDA Seminar, Trondheim, Norvegia, 07-08 giugno 2006
112. Mashimo, H. (2002). State of the road tunnel safety technology in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(2), 145-152.
113. McCarthy, P. (2001). Effect of speed limits on speed distributions and highway safety: a survey of recent literature. *Transport Reviews*, 21(1), 31-50.
114. Meng, Q. &. (2012). Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels. *Accident Analysis & Prevention*, 48, 254-263.
115. Meng, Q. Q. (2011). Quantitative risk assessment modeling for nonhomogeneous urban road tunnels. *Risk Analysis*, 31(3), 382-403.
116. Miaou, S. L. (2003). Modeling traffic crash-flow relationships for intersections: dispersion parameter, functional form, and Bayes versus empirical Bayes methods. *Transport. Res. Rec.*, 1840, 31–40.
117. Miaou, S. P. (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. *Accident Analysis & Prevention*, 25(6), 689-709.
118. Miaou, S. P. (1994). The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions. . *Accident Analysis & Prevention*, 26(4), 471-482.
119. Miaou, S. P. (1996). Measuring the goodness-of-fit of accident prediction models. Miaou, S. P.: No. FHWA-RD-96-040.
120. Miaou, S. P. (2005). Bayesian ranking of sites for engineering safety improvements: decision parameter, treatability concept, statistical criterion, and spatial dependence. . *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 699-720.
121. Milton, J. &. (1998). The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies. *Transportation*, 25(4), 395-413.
122. Mitra, S. &. (2007). On the nature of over-dispersion in motor vehicle crash prediction models. *Accident Analysis & Prevention*, 39(3), 459-468.
123. Molak, V. (1997). Fundamentals of risk analysis and risk management (pp. 233-245). V. Molak (Ed.). New York: Lewis Publishers
124. Mountain, L. M. (1998). Improved estimates of the safety effects of accident remedial schemes. *Traffic Engineering+ Control*, 39(10), 554-8.
125. Mussone, L. F. (1999). An analysis of urban collisions using an artificial intelligence model. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 705-718.
126. Nævestad, T. O. (2012). Vehicle Fires in Norwegian Road Tunnels 2008-2011. Oslo: TØI report 1205.
127. Ng, K. S. (2002). An algorithm for assessing the risk of traffic accident. . *Journal of safety research*, 33(3), 387-410.
128. Ng, J. C. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218-227.
129. Norsk Olje & Gass (2004) "070 - Norwegian Oil and Gas application of IEC 61508 and IEC 61511 in the norwegian petroleum industry"
130. Nussbaumer, C. (2007). Comparative analysis of safety in tunnels . Young Researchers Seminar. Brno.
131. Oh, J. W. (2006). Accident prediction model for railway-highway interfaces. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 346-356.
132. Okamoto, H. &. (1989). A method to cope with the random errors of observed accident rates in regression analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 21(4), 317-332.
133. Ove Ditlevsen. Decision modeling and acceptance criteria. *Structural Safety*, Volume 25, Issue 2, April 2003, Pages 165-191
134. Page, Y. (2000). A statistical model to compare road mortality in OECD countries. *Accident Analysis & Prevention*, 33(3), 371-385.
135. Payne, R. W. (2000). The guide to Genstat. VSN International Limited.

136. Per Hokstad (2014) "Demand rate and risk reduction for safety instrumented systems", SINTEF Safety Research, Trondheim, Norvegia; Reliability Engineering System Safety Luglio 2014"
137. Per Hokstad, Kjell Corneliusen (2004) "Loss of safety assessment and the IEC 61508 standard", Department of Safety and Reliability, SINTEF Industrial Management, Reliability Engineering and System Safety 83 pagg. 111–120
138. Persaud, B. D. (1993). Accident prediction models for freeways. *Transp. Res. Rec.*, 1401, 55–60.
139. Persaud, B. L. (2002). Calibration and transferability of accident prediction models for urban intersections. . *Transportation Research Record*, 1784(1), 57-64.
140. Persaud, B. R. (2000). Guidelines for the identification of Hazardous Highway Curves. *Transp. Res. Rec.* , 1717, 14–18.
141. Piccinini, N. (1985). Affidabilità e sicurezza dell'industria chimica (Vol. 1). Institut d'Estudis Catalans.
142. Qin, X. I. (2005). Hierarchical Bayesian estimation of safety performance functions for two-lane highways using Markov chain Monte Carlo modeling. *Journal of Transportation Engineering*, 131(5), 345-351.
143. Rattei, G. L. (2014). How frequent are fire in tunnels-Analysis from Austrian tunnel incident statistics. *Proceedings from the Seveth International Conference on Tunnel Safety and Ventilation*, (p. pp. 5-11). Graz, Austria.
144. Raymond Freeman, Angela Summers (2015) "Evaluation of Uncertainty in Safety Integrity Level (SIL) Calculations", Spring Meeting of the AIChE 11 Global Congress on Process Safety Austin, TX; Process Safety Progress, Dicembre 2016"
145. Reurings M, J. T. (2007). Accident Prediction Models and Road safety Impact Assessment: Results of the Pilot Studies. Internal report D2.4. . Bergisch Gladbach, Germany: RiPCORD–iSEREST Consortium.
146. Richard Bartoni, Alfonso Capasso, Fabio Garzia, Massimo Guarascio, Mara Lombardi, Giuliano Rossi (2018) "La trazione ferroviaria. I sistemi a guida vincolata", Cap.2 "Affidabilità e Sicurezza", Società Editrice Esculapio.
147. Rinalducci, E. J. (1979). An assessment of visibility at the entrance of a long vehicular tunnel. *Human Factor*, 21(1), 107-117.
148. Rolison, J. J. (2018). What are the factors that contribute to road accidents? An assessment of law enforcement views, ordinary drivers' opinions, and road accident records. . *Accident Analysis & Prevention*, 115, 11-24.
149. Rychlik, I., & Rydén, J. (2006). Probability and risk analysis. Springer
150. Sagberg, F. (1999). Road accidents caused by drivers falling asleep. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 639-649.
151. Salvisberg, U. A. (2004). Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes. Bern: BFU.
152. Santos-Reyes, J. &. (2017). An analysis of the emergency response system of the 1996 Channel tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 65, 121-139.
153. Satria, R. &. (2016). GIS tools for analyzing accidents and road design: a review. *Transportation research procedia*, 18, 242-247.
154. Schlüter, P. J. (1997). Ranking and selecting motor vehicle accident sites by using a hierarchical Bayesian model. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 46(3), 293-316.
155. Shankar, V. M. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(3), 371-389.
156. Sharmin Sultana (2015) "A new approach of uncertainty treatment in the verification of safety integrity level of safety instrumented system", tesi di master, University of Stavanger
157. Siamak Alizadeh , Srinivas Srinamula (2018) "Impact of Common Cause Failure on Reliability Performance of Redundant Safety Related Systems Subject to Process Demand", School of Engineering, University of Aberdeen
158. Soyeon Chung, Sunghee Kim, Youngsoon Yang (2015) "Use of hazardous event frequency to evaluate safety integrity level of subsea blowout preventer", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 8 (2016) pagg. 262-276, Elsevier
159. Stallen, P. J. M., Geerts, R., & Vrijling, H. K. (1996). Three conceptions of quantified societal risk. *Risk Analysis*, 16(5), 635-644.
160. Starr, C. (2001). Hypothetical fears and quantitative risk analysis. *Risk Analysis*, 21(5), 803-803.
161. Stein Hauge, Asa Snilstveit Hoem, Per Hokstad, Solfrid Habrekke, Mary Ann Lundteigen (2015) "Common Cause Failures in Safety Instrumented Systems", SINTEF

162. Stein Hauge, Solfrid Håbrekke, Mary Ann Lundteigen (2010) "Reliability Prediction Method for Safety Instrumented Systems – PDS Example collection", SINTEF A17956
163. Suddle, S., & Ale, B. (2005). The third spatial dimension risk approach for individual risk and group risk in multiple use of space. *Journal of hazardous materials*, 123(1), 35-53.
164. Sun, H. W. (2019). Spatialtemporal characteristics of tunnel traffic accidents in China from 2001 to present. *Advances in Civil Engineering*.
165. Terje Aven. On the critique of Beck's view on risk and risk analysis. *Safety Science*, Volume 50, Issue 4, April 2012, Pages 1043-1048
166. Terje Aven. Practical implications of the new risk perspectives. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 115, July 2013, Pages 136-145
167. Tunaru, R. (2002). Hierarchical Bayesian models for multiple count data. *Austrian Journal of statistics*, 31(2&3), 221-229.
168. V.M. Trbojevic. Another look at risk and structural reliability criteria. *Structural Safety*, Volume 31, Issue 3, May 2009, Pages 245-250
169. Vadlamani, S. C. (2011). Identifying large truck hot spots using crash counts and PDOEs. *Journal of transportation engineering*, 137(1), 11-21.
170. Valent, F. S. (2002). Risk factors for fatal road traffic accidents in Udine, Italy. *Accident Analysis & Prevention*, 34(1), 71-84.
171. Vanlaar, W. &. (2006). Perception of road accident causes. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 155-161.
172. Vapnik, V. (2006). *Estimation of dependences based on empirical data*. New York: Springer Science & Business Media.
173. Vapnik, V. (2013). *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer science & business media.
174. Vinnem, J. E. (2010). Risk analysis and risk acceptance criteria in the planning processes of hazardous facilities— A case of an LNG plant in an urban area. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6), 662-670.
175. Vose, D. (2008). *Risk analysis: a quantitative guide*. John Wiley & Sons.
176. Vrijling, J. H. K., Van Gelder, P. H., Goossens, L. H., Voortman, H. G., & Pandey, M. D. (2004). A framework for risk criteria for critical infrastructures: fundamentals and case studies in the Netherlands. *Journal of Risk Research*, 7(6), 569-579.
177. Vrijling, J. K., & Van Gelder, P. H. A. J. M. (1997). Societal risk and the concept of risk aversion. *Advances in Safety and Reliability*, 1, 45-52.
178. Vrijling, J. K., Van Hengel, W., & Houben, R. J. (1995). A framework for risk evaluation. *Journal of hazardous materials*, 43(3), 245-261.
179. Vrijling, J. K., Van Hengel, W., & Houben, R. J. (1998). Acceptable risk as a basis for design. *Reliability Engineering & System Safety*, 59(1), 141-150.
180. Wang, C. Q. (2013). The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction. *Safety science*, 57, 264-275.
181. Webster, D. C. (1996). *Review of traffic calming schemes in 20 mph zones*. London: TRL REPORT 215.
182. Wilmer Alberto Aguilar Martínez (2013) "Reliability Assessment of Safety Instrumented Systems with Imperfect Proof testing", Project thesis, Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology
183. Xie, Y. L. (2007). Predicting motor vehicle collisions using Bayesian neural network models: An empirical analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 39(5), 922-933.
184. Yanghou Chen (2011) "Reliability Analysis of a Fire Alarm System", 2011 International Conference on Advances in Engineering, *Procedia Engineering* 24 (2011) pagg. 731-736
185. Yannis, G. D. (2016). Use of accident prediction models in road safety management—an international inquiry. *Transportation research procedia*, 14, 4257-4266.
186. Yannis, G. D. (2017). Road traffic accident prediction modelling: a literature review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Vol. 170, No. 5, pp. 245-254.
187. Yannis, G. K. (2013). Effect of lighting on frequency and severity of road accidents. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Vol. 166, No. 5, pp. 271-281.
188. Yannis, G. P. (2016). Good practices on cost-effective road infrastructure safety investments. *International journal of injury control and safety promotion*, 23(4), 373-387.

189. Yau, K. K. (2004). Risk factors affecting the severity of single vehicle traffic accidents in Hong Kong. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 333-340.
190. Yau, K. K. (2006). Multiple-vehicle traffic accidents in Hong Kong. . *Accident Analysis & Prevention*, 38(6), 1157-1161.
191. Yiliu Liu (2014) "Discrimination of low- and high-demand modes of safety-instrumented systems based on probability of failure on demand adaptability", *Journal of risk and reliability*, vol. 228 (4) pagg. 409–418
192. Zegeer, C. R. (1987). Safety Effect of Cross-section Design for Two-lane Roads. vols. 1–2. Report FHWA-RD87/008 and 009. Federal Highway Administration, Department of Transportation, USA.
193. Zegeer, C. C. (1995). Safety Relationship Associated with Crosssectional Roadway Elements. Washington, D.C., USA: Transportation Research Record 1512.

Indice delle figure

Figura 1: Funzioni F-N prodotte da 6 diversi studi professionali in applicazione del D. Lgs. 264/2006 su gallerie di rete TERN italiane (Ing. Michele de Vito)	15
Figura 2: rappresentazione sul piano F-N ex Allegato 3 del D.Lgs. 264/2006 dei vvalori della funzione F-N ricavata per la galleria media autostradale relativa al periodo di osservazione 1/1/1980 – 31/12/2018	18
Figura 3: rappresentazione sul piano F-N delle retrocumulate presentate alla Commissione Gallerie Stradali e dei valori della funzione F-N ricavata per la galleria media autostradale relativa al periodo di osservazione 1/1/1980 – 31/12/2018	19
Figura 4: rappresentazione sul piano F-N dei criteri di verifica (non sempre cogenti) utilizzati negli altri Paesi europei	20
Figura 5: schema bow-tie per l'analisi di rischio quantitativa	21
Figura 6: danni conseguenti agli eventi incidentali occorsi in gallerie stradali nel mondo dal 1940 al 2007 (Panzavolta D., 2008).....	24
Figura 7: Sezione stradale per le gallerie ricadenti in strade di Tipo A (D.M. 5.11.2001)	26
Figura 8: Sezione stradale per le gallerie ricadenti in strade di tipo B (D.M. 5.11.2001)	26
Figura 9: Marciapiede gallerie ricadenti in strade di tipo D (D.M. 5.11.2001).....	27
Figura 10: Sezione stradale gallerie ricadenti in strade di tipo C e F (D.M. 5.11.2001)	27
Figura 11: Marciapiede galleria ricadenti strade di tipo E e F (D.M. 5.11.2001).....	27
Figura 12: sezione tipo della galleria monodirezionale di categoria A con allargamento in curva	29
Figura 13: Requisiti minimi strutturali ex Allegato I della Direttiva 2004/54/CE	31
Figura 14: Requisiti minimi impiantistici e gestionali ex Allegato I della Direttiva 2004/54/CE	31
Figura 15: Criteri di verifica sul piano F-N – D. Lgs. 264/2006	34
Figura 16: relazione delle responsabilità tra i soggetti responsabili previsti dal sistema normativo francese in attuazione della Direttiva 2004/54/CE.....	36
Figura 17: contenuto del dossier di sicurezza nelle previsioni normative francesi – gallerie superiori a 500 m di lunghezza e facenti parte del sistema di rete stradale TERN	37
Figura 18: regime delle procedure di approvazione delle misure di sicurezza e autorizzazione all'esercizio delle gallerie	37
Figura 19: Matrice di rischio utilizzata in Francia per la prima qualificazione della pericolosità della struttura (PIARC, 2013)	38
Figura 20: scenari di riferimento del modello EQR-MD (PIARC)	39
Figura 21: fattori determinanti il rischio di un sistema galleria stradale – TuRisMo (PIARC, 2013).....	42
Figura 22: classi di pericolosità della struttura in relazione al valore del danno atteso – Austria (PIARC, 2013)	43
Figura 23: criterio sul piano F-N adottato in Austria (PIARC, 2013).....	43
Figura 24: criterio di riferimento sul piano F-N adottato in Repubblica Ceca (PIARC, 2013).....	44
Figura 25: criterio orientativo sul piano F-N adottato in Olanda (PIARC, 2013)	44
Figura 26: Ciclo complessivo delle attività di controllo e ispezione previsto dal D. Lgs. 35/2011 (ex Allegato "Linee guida in materia di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali" al DM 2/5/2012)	47
Figura 27: indicatori di incidentalità da utilizzare ai fini della classificazione (ex pag. 33 LG, §2.2.2.1)	49
Figura 28: Tipologia di ispezioni (diffuse e puntuali) e caratteristiche specifiche delle attività (ex LG, § 4.2.1, pag. 89)	50
Figura 29: Scheda 1_ISP_PD_EXDC relativa all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata parte 1.....	51
Figura 30: Scheda 1_ISP_PD_EXDC relativa all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata parte 2.....	51
Figura 31: Scheda 1_ISP_PD_EXDC relativa all'Ispezione Periodica Diffusa in Ambito Extraurbano su Strada a Doppia Carreggiata parte 3.....	52
Figura 32: Elenco dei settori di ECI (Allegato I della Direttiva 2008/114/CE)	53
Figura 33: Estratto dell'Allegato 1 del DPR 151/2011.....	54
Figura 34: Procedure di prevenzione incendi per le tre categorie di attività	55
Figura 35: partizione logica dell'analisi di sicurezza di un sistema	59
Figura 36: tipologie di guasto in funzione del tempo di funzionamento	60
Figura 37: rappresentazione della funzione continua densità di probabilità di guasto	62
Figura 38: rappresentazione della relazione integrale tra $f(t)$, $Q(t)$ e $R(t)$	63
Figura 39: andamento della $R(t)$ nel modello esponenziale	64
Figura 40: schema elementare di collegamento in serie	65
Figura 41: schema elementare di collegamento in parallelo.....	65
Figura 42: configurazione di sistema complesso, non riducibile a collegamento serie o parallelo (Bridge).....	66
Figura 43: risoluzione dello schema bridge in schemi serie / parallelo	66
Figura 44: schema di collegamento funzionale dei cut set minimi della configurazione Bridge	67
Figura 45: Bow-Tie Model: flusso logico-sequenziale del pericolo	70
Figura 46: Albero degli eventi.....	74
Figura 47: esempi di rappresentazione sul piano F-N di funzioni retrocumulate del danno e confronto con il criterio di verifica.....	76
Figura 48: Criteri di accettabilità del rischio (Dlgs 264/06).....	77

Figura 49: esempio di piano Costi – Benefici (CB) con rappresentazione del criterio di accettabilità	79
Figura 50: esempio di piano Costi – Benefici (CB) per una attribuzione di valore convenzionale di vita umana diverso dal precedente: effetto di traslazione in y delle soluzioni tecniche.....	79
Figura 51: Rappresentazione ordinale delle soluzioni, in ordine decrescente di convenienza, e identificazione del punto di progettazione ottima e del progetto a massima sicurezza.....	80
Figura 52: flow-chart del processo di analisi della QRA esperta proposta	81
Figura 53: Rappresentazioni sul piano F-N di diverse retrocumulate rappresentative dello stesso sistema	85
Figura 54: Criteri di accettazione per IR e funzione retrocumulata del danno sul piano di Farmer	88
Figura 55: Criteri di accettazione sul piano FN	89
Figura 56: Criteri di verifica del RC utilizzati in letteratura	90
Figura 57: Criteri di verifica (non sempre cogenti) applicati al caso stradale nei vari Paesi Europei.....	90
Figura 58: Dinamica dell'incendio.	95
Figura 59: Curva HRR in funzione del tempo t.....	96
Figura 60: Curve HRR di sviluppo di incendio	97
Figura 61: schema di rappresentazione della logica di interpretazione fisica dei modelli a zone	98
Figura 62: Rappresentazione del modello di campo.	100
Figura 63: Dominio di calcolo in FDS.	103
Figura 64: Rappresentazione del formato di ogni agente.....	109
Figura 65: Il concetto di forza sociale secondo Helbing.....	110
Figura 66: Interazioni tra fattori.	111
Figura 67: Esempio di comportamenti gregari in caso di incendio.....	113
Figura 68: Tempi di evacuazione secondo la norma ISO 13571.....	117
Figura 69: rapporto di incidenza tra le cause di incidente tra gli ambiti generativi del pericolo - Highway Safety Manual, 2010	130
Figura 70: rappresentazione qualitativa della relazione tra il funzionale fS e il funzionale fD e del $MS = fS - fD$	131
Figura 71: rapporto tra frequenze incidentali in tratta a cielo aperto e in galleria – dati ASPI	150
Figura 72: pericolosità misurata in termini di tassi di incidenti lievi e gravi– dati Gestori (ex allegato 4).....	151
Figura 73: pericolosità misurata in termini di tassi di incendio – dati Gestori (ex Allegato 4).....	151
Figura 74: classificazione dei 60 eventi di incendio per classe di durata di interruzione conseguente (ex Allegato 3)	153
Figura 75: Wide Area Network collegata ad una LAN.....	158
Figura 76: Collegamenti in rame e in fibra tra diversi elementi nelle cabine	158
Figura 77: collegamenti tra LAN di cabina e altri componenti della cabina.....	159
Figura 78: Collegamenti tra SCADA e PLC.....	160
Figura 79: Collegamenti tra PLC ed elementi prossimi alla galleria	160
Figura 80: schema di collegamento dei componenti e ridondanze di progetto	165
Figura 81: schema di collegamento dei sensori e ridondanze specifiche 2oo5	166
Figura 82: tasso di guasto e intervallo tra due successive manutenzioni per i sensori.....	167
Figura 83: compositore di probabilità condizionata degli scenari funzionali complessi – illuminazione, illuminazione di emergenza e ventilazione.	170
Figura 84: esempio di DB operazionalizzato per il monitoraggio e l'analisi ex post della disponibilità e funzionalità dei sottosistemi rilevanti per la sicurezza	172
Figura 85: analisi della disponibilità effettiva dell'impianto TVCC.....	172
Figura 86: aerofoto della tratta comprendente la galleria	178
Figura 87: Vista interna canna direzione NORD.....	178
Figura 88: imbocco SUD della canna NORD.....	179
Figura 89: imbocco NORD della canna SUD.....	179
Figura 90: bypass interno e vista della coppia di ventilatori di testa.....	180
Figura 91: sviluppo della progressiva chilometrica della intera tratta e rappresentazione degli incidenti georiferiti disponibili	182
Figura 92: frequenza chilometrica di incidentalità delle singole tratte casello – casello – A23.....	184
Figura 93: tasso di incidentalità delle singole tratte omogenee – A23.....	185
Figura 96: intensità del flusso veicolare (1 ora di rilevazione) nel giorno feriale	189
Figura 97: intensità del flusso veicolare (1 ora di rilevazione) nel giorno festivo	189
Figura 98: densità di probabilità campionaria della funzione transiti orari relativi al giorno feriale – classi di ampiezza 100 veicoli.....	190
Figura 99: densità di probabilità campionaria della funzione transiti orari relativi al giorno festivo – classi di ampiezza 100 veicoli.....	190
Figura 100: evidenza di Lu et al (2013) circa la corrispondenza tra intensità del flusso veicolare e accadimento incidentale (1)	191
Figura 101: evidenza di Lu et al (2013) circa la corrispondenza tra intensità del flusso veicolare e accadimento incidentale (2)	191
Figura 102: Confronto delle PDF delle funzioni intensità di traffico e frequenza attesa di incidente per classe di intensità del traffico	192
Figura 103: albero preliminare per l'individuazione degli scenari evoluti di incendio in galleria.....	194
Figura 104: complessità ETA dello sviluppo dell'albero incendio rilevante in galleria	196

Figura 105: complessità ETA dello sviluppo dell'albero dispersione ADR in galleria	197
Figura 106: analisi dei tempi di evacuazione secondo la ISO/TR 16738:2009	198
Figura 107: letalità (percentuale su esposti) ottenuta per il caso dell'incendio di potenza di picco 100 MW	199
Figura 108: rappresentazione sul piano di Farmer della CCC (funzione retrocumulata del danno) e confronto con i criteri di accettazione / rifiuto e ALARP di cui al D. Lgs. 264/2006; confronto con la retrocumulata campionaria dell'esperienza italiana 1980 - 2018.....	200
Figura 109: analisi di elasticità del rischio in funzione del valore di alcuni parametri caratterizzanti il sistema galleria	202
Figura 110: processo ciclico per rafforzare la resilienza dell'IC da (Rehak, 2018)	206
Figura 111: componenti e variabili della resilienza tecnica	208
Figura 112: componenti e variabili della resilienza organizzativa.....	209
Figura 113: Stati del sistema e transizioni	211
Figura 114: andamento valore funzione di consegna F	211
Figura 115: metafora grafica della rete stradale in archi e nodi.....	213
Figura 116: metafora grafica della rete stradale in archi e nodi.....	215
Figura 117: rete ridotta a disponibilità massima	216
Figura 118: frequenza incidentale in galleria e tratte a cielo aperto – DB ASPI.....	245
Figura 119: frequenza incidentale in galleria e tratte a cielo aperto – DB ASPI.....	246
Figura 120: Rapporto tra frequenza incidentale in galleria e tratte a cielo aperto – DB ASPI	246
Figura 121: eventi di incidente tipico per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	248
Figura 122: eventi di incendio per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	248
Figura 123: feriti negli eventi di incidenti ed incendi per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	248
Figura 124: deceduti negli eventi di incidenti ed incendi per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015.....	249
Figura 125: eventi di incidente e incendio a mezzi pesanti trasportanti ADR per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	249
Figura 126: eventi di incidente e incendio a mezzi leggeri per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015.....	249
Figura 127: eventi di incidente e incendio a mezzi pesanti non ADR per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015.....	250
Figura 128: eventi di incidente tipico per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	250
Figura 129: eventi di incendio per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015.....	250
Figura 130: feriti per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007- 2015	250
Figura 131: deceduti per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007- 2015	251
Figura 132: Incidenti a mezzi pesanti ADR per TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015.....	251
Figura 133: Incidenti a mezzi leggeri per TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	251
Figura 134: Incidenti a mezzi pesanti per TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015	251
Figura 135: confronto fra distribuzione teorica e campionaria per classi di lunghezza degli eventi collezionati nel DB della Commissione	255
Figura 136: confronto fra distribuzione teorica e campionaria per classi TGM di corsia degli eventi collezionati nel DB della Commissione	255
Figura 137: Scarto quadratico normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di lunghezza	256
Figura 138: Scarto quadratico normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM.....	256
Figura 139: Scarto quadratico normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM - esclusa classe oltre 20000	257
Figura 140: Scarto semplice (in segno) normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM	257
Figura 141: Scarto semplice (in segno) normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM	258
Figura 142: classificazione dei 60 eventi di incendio per classe di durata di interruzione conseguente	261
Figura 143: distribuzione dei casi galleria per classi di lunghezza – sottocampione omogeneo DB gestori.....	264
Figura 144: distribuzione dei casi galleria per classi di TGM – sottocampione omogeneo DB gestori	264
Figura 145: eventi di incidente lieve, grave e di incendio registrati nelle gallerie, aggregate per tronchi autostradali – sottocampione omogeneo DB gestori	265
Figura 146: sinottico riassuntivo del tasso di incidente grave e lieve– tutte le tratte	277
Figura 147: sinottico riassuntivo del tasso di incendio – tutte le tratte	277

Allegato 1 Analisi annuari statistici del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

L'annuario statistico dei VVF raccoglie i dati degli interventi effettuati nell'anno di riferimento, suddivisi per tipologia. Tra le altre è disponibile la categoria di "Interventi per incidente stradale", la cui serie storica coerente e recente copre 5 anni, dal 2014 al 2018.

La tabella seguente riporta i dati estratti relativamente agli interventi generici effettuati, e, con riferimento a questi, la quota parte di interventi effettuati per incendi a veicoli.

anno	Interventi VVF per incidenti stradali [e]	- incidente generico [e]	% incidente generico sul totale [-]	incendi su incidenti generici [e]	% incendi su incidenti generici [-]
2018	45140	40330	89,34	41	0,153
2017	42246	37516	88,80	48	
2016	42434	37351	88,02	73	
2015	37389	33477	89,54	56	
2014	32241	27949	86,69	53	

Tabella 59: Interventi effettuati dai VVF per incidente stradale in galleria - annuari statistici 2016-2018

Gli stessi annuari, con riferimento ai soli anni 2016-2018 esplicitano il numero di interventi effettuati per incidenti stradali in galleria. Sul totale degli interventi effettuati in galleria si verifica che gli incendi hanno una incidenza relativa pari allo 0.49% degli interventi totali.

anno	Interventi VVF per incidenti stradali [e]	- in galleria [e]	% in galleria sul totale [-]	incendi in galleria [e]	% incendi su interventi in galleria [-]
2018	45140	121	0,27	1	0,493
2017	42246	124	0,29	0	
2016	42434	161	0,38	1	

Tabella 60: Interventi effettuati dai VVF per incidente stradale in galleria - annuari statistici 2016-2018

Con riferimento agli interventi effettuati dai VVF per incidenti stradali coinvolgenti mezzi trasportanti ADR, gli annuari presentano il dato rilevato a partire dal 2014. I valori estratti sono riportati nella tabella di seguito.

anno	Interventi VVF per incidenti stradali [e]	- ADR [e]	% ADR sul totale [-]	incendi ADR [e]	% incendi su interventi ADR [-]
2018	45140	297	0,66	0	0,511
2017	42246	253	0,60	2	
2016	42434	281	0,66	1	
2015	37389	282	0,75	2	
2014	32241	257	0,80	2	

Tabella 61: Interventi effettuati dai VVF per incidente stradale coinvolgente mezzo trasportante merce ADR - annuari statistici 2016-2018

A2.1 Il fattore galleria sull'incidentalità in genere

Sulla base dei dati di incidentalità complessiva, di intera tratta e in galleria, di ASPI e relativi agli anni 2012 – 2017 è stato possibile verificare l'ipotesi, largamente confermata in letteratura, che vede la galleria come ambiente a frequenza incidentale ridotta rispetto alle tratte a cielo aperto.

Al fine di operare un confronto tra dati omogenei, il necessario valore della percorrenza totale delle tratte in galleria per ciascun tronco è stato ricavato dal database gallerie e da banche dati accessibili quali www.lostberg.net/data/italia.

Le elaborazioni sono riportate di seguito, nella tabella e nel grafico corrispondente, e confermano gli ampi orientamenti coerenti reperiti in bibliografia. Non essendo disponibile il dato circa la gravità di tali eventi, non è possibile verificare ipotesi statistiche più strutturate, a partire dall'ipotesi che la gravità media degli incidenti in galleria sia significativamente più elevata rispetto a quella a cielo aperto.

Tratte autostradali	FI CA [e/Km]	FI GAL [e/Km]	Lungh. tratta [m]	Rapp. inc. CA/G
A12 GE-SE	1,26E+01	2,03E+00	48700	6,21
A10 GE-SA	1,56E+01	3,72E+00	45500	4,19
A7 GE-SERR	8,50E+00	2,77E+00	50000	3,06
A26 Gevo-AL	5,28E+00	3,78E+00	83700	1,40
A26 AL-GRAV	1,61E+00	6,57E-01	161200	2,45
A1 BO-FI	8,48E+00	5,45E+00	91100	1,56
A1 FI-RM t1	5,47E+00	6,72E-01	137600	8,14
A1 FI-RM t2	3,83E+00	5,58E-01	135300	6,85
A14 BO-AN	5,16E+00	2,26E+00	86200	2,28
A14 AN-PE	5,05E+00	1,50E+00	134100	3,37
A14 PE-CA	2,78E+00	4,36E+00	140500	0,64
A23 UD-TA	1,51E+00	4,37E-01	101200	3,45
Effetto galleria				
fattore di prevenzione incidentale medio		3,65		

Figura 116: frequenza incidentale in galleria e tratte a cielo aperto – DB ASPI

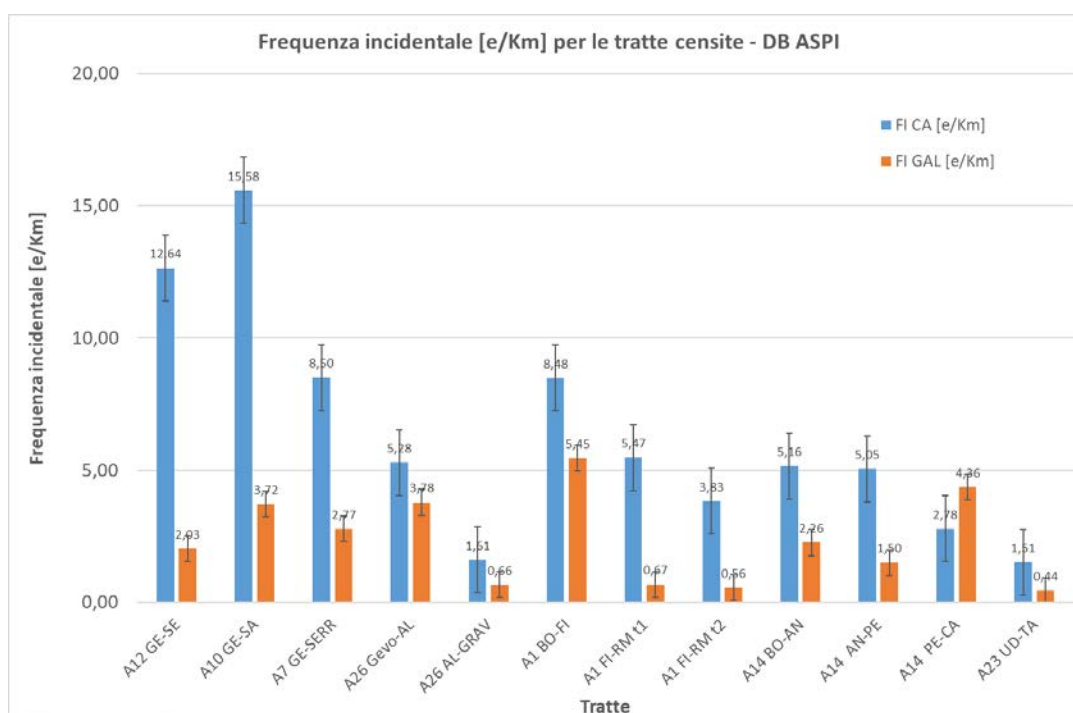


Figura 117: frequenza incidentale in galleria e tratte a cielo aperto – DB ASPI

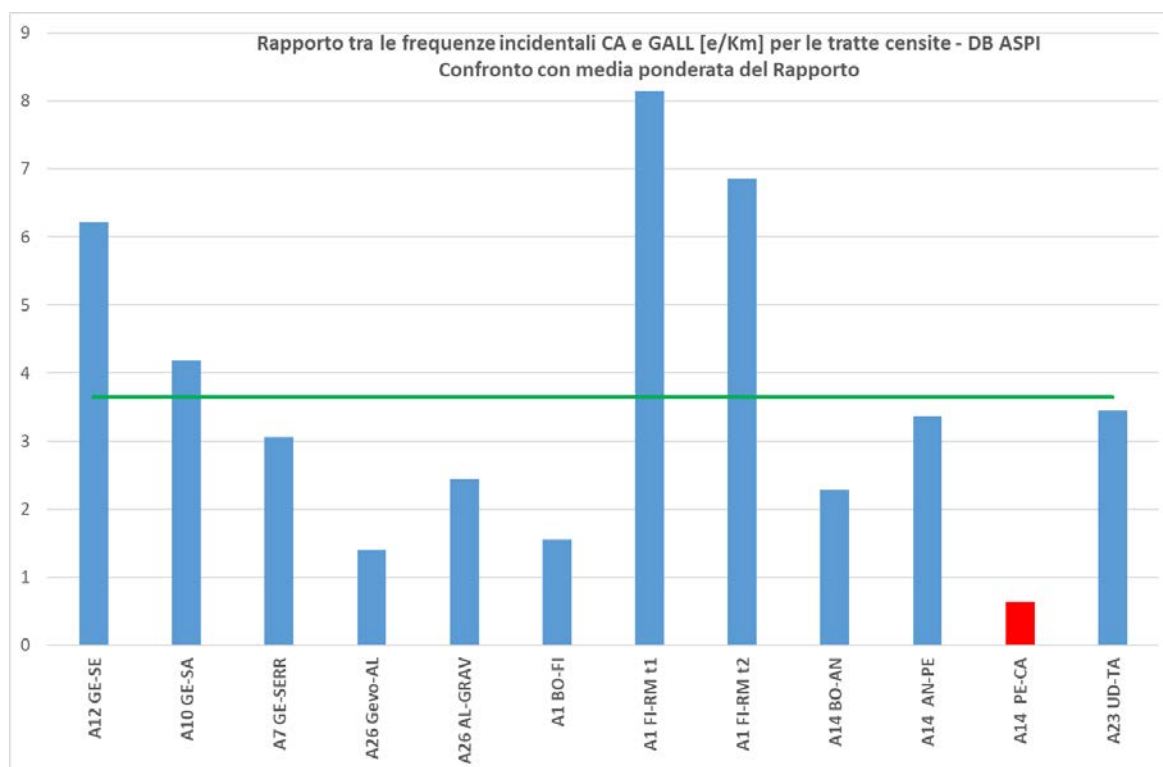


Figura 118: Rapporto tra frequenza incidentale in galleria e tratte a cielo aperto – DB ASPI

Si evidenzia che solo nel caso della A14, e specificamente per la tratta Pescara – Canosa, il rapporto incidentale è inferiore ad 1, e quindi le tratte in galleria risultano associate ad incidentalità più elevata delle contigue tratte a cielo aperto. Tale anomalia può essere spiegata dal fatto che le gallerie presenti nell'intero tronco sono, sostanzialmente, quelle che insistono sulla tratta in area urbana di Pescara, e quindi caratterizzate da RGM significativamente più elevato del resto della strada, e in generale caratterizzate da parametri di traffico certamente speciali.

In tutti gli altri casi si evidenzia un fattore superiore all'unità, con valore medio ponderato di 3.65.

Allegato 3 Banca Dati incidenti Commissione Gallerie Stradali presso il CSLPP

A3.1 Premessa

La banca dati incidentale trattata è istituita ai sensi del disposto congiunto della Direttiva 2004/54 e del D.Lgs 264/2006. Alimentata dalle comunicazioni di incidenti occorsi in galleria fornite dai Gestori di tratte stradali di rete TERN, la banca dati (o database, o BD) è gestita dalla struttura organizzativa istituita presso il Ministero delle Infrastrutture.

A3.2 Consistenza della banca dati

La banca dati colleziona, al 3/12/2015, 232 eventi incidentali avvenuti tra il 2007 e il 2015. La numerosità per anno è progressivamente aumentata, evidentemente per progressiva adesione alla procedura di comunicazione da parte dei Gestori. La tendenza alla crescita degli eventi annui registrati è ancora in corso (56 casi nel 2014, 68 nel 2015).

I 232 casi di incidente si sono realizzati in 99 delle 346 gallerie sorvegliate. Circa la metà degli incidenti totali si sono collocati in sole 25 gallerie.

I gestori e le tratte autostradali alle quale afferiscono le gallerie sorvegliate sono riportati nella tabella sottostante.

Parchi	Autostrada dei Parchi	A24, A25
Fiori	Autostrada dei Fiori	A10
Brennero	Autostrada del Brennero	A22
ASPI	Autostrade per l'Italia	A1, A4, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A16, A23, A26, A27, A30
SALT	Società Autostradale Ligure Toscana	A11, A12, A15
ATIVA	Autostrada Torino Ivrea Val d'Aosta	A4, A5
CISA	Autostrada della Cisa	A15
SITAF	Autostrada del Frejus	A32
ANAS		
BS-PD	Autostrada Brescia Verona Vicenza Padova	A4, A31
CAS	Consorzio autostrade siciliane	A18, A20

Tabella 62: gestori e tratte di appartenenza delle gallerie sorvegliate dalla Commissione Permanente per le gallerie stradali presso il CSLPP

Il carattere di progressivo allargamento della base campionaria costituisce, dal punto di vista della rappresentatività campionaria, elemento di criticità per la generalizzazione delle elaborazioni statistiche che possono essere ottenute dai dati. Allo scopo di verificare limiti e potenzialità del capitale informativo disponibile, sono state quindi esplorate le proprietà statistiche del gruppo di eventi selezionati.

I grafici seguenti descrivono il campione disponibile.

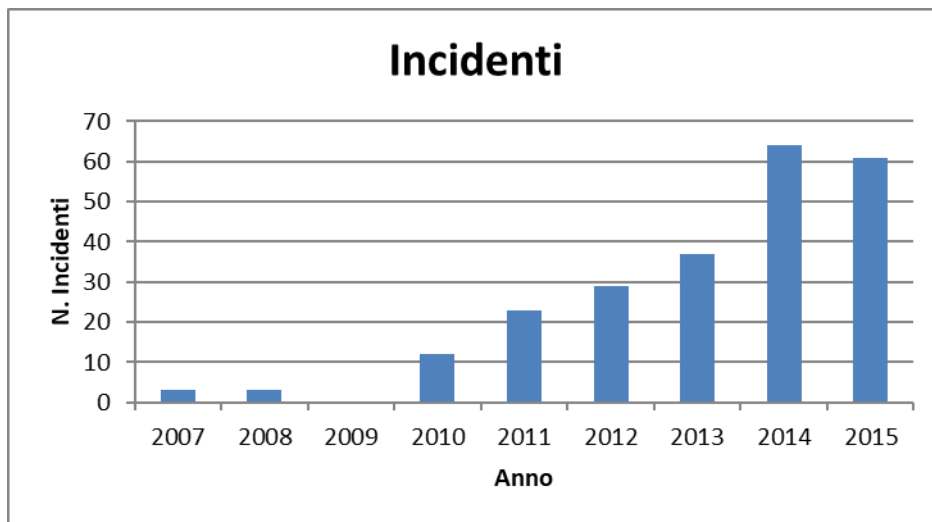


Figura 119: eventi di incidente tipico per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

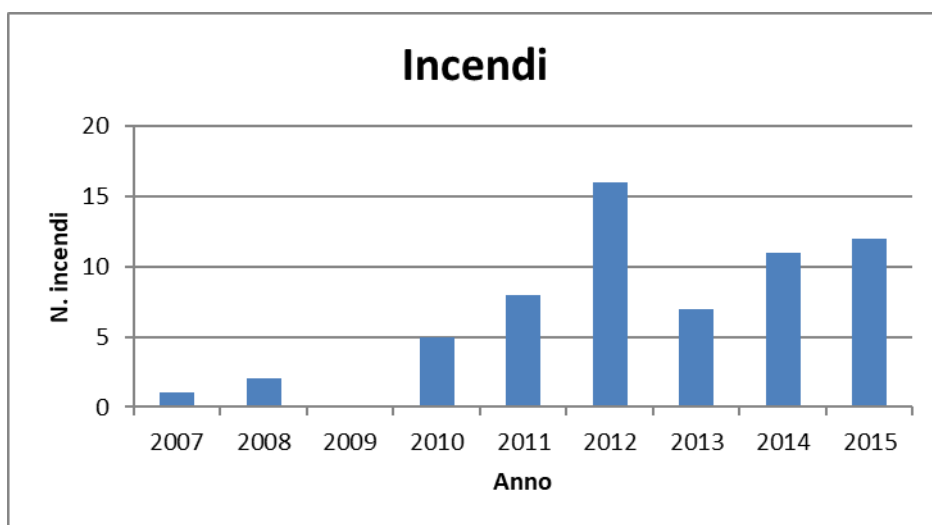


Figura 120: eventi di incendio per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

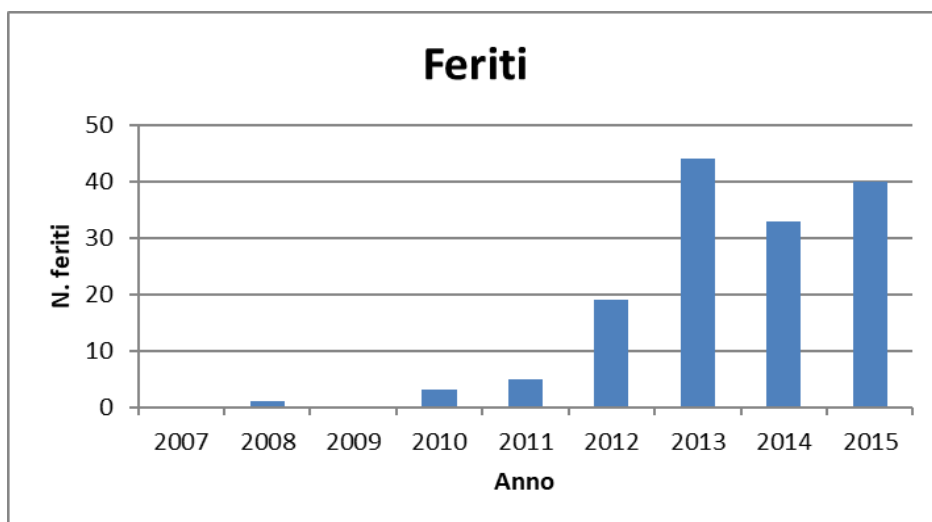


Figura 121: feriti negli eventi di incidenti ed incendi per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

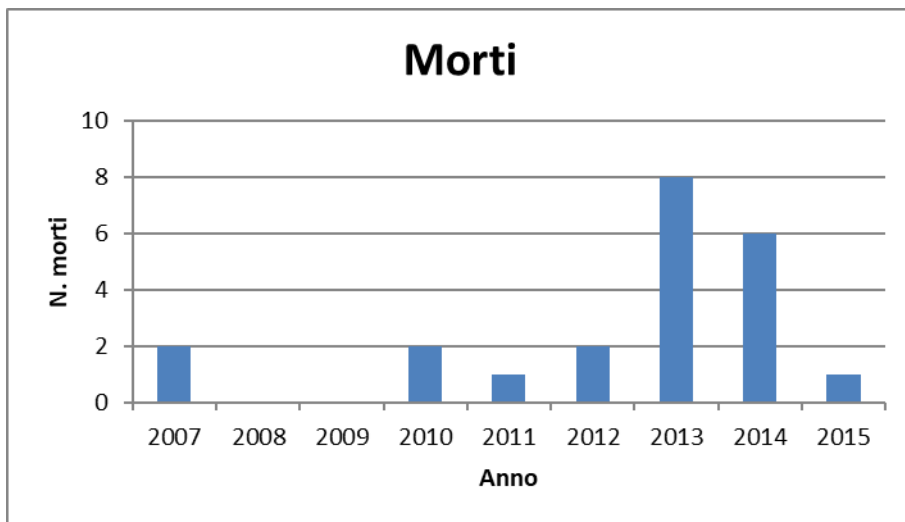


Figura 122: deceduti negli eventi di incidenti ed incendi per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

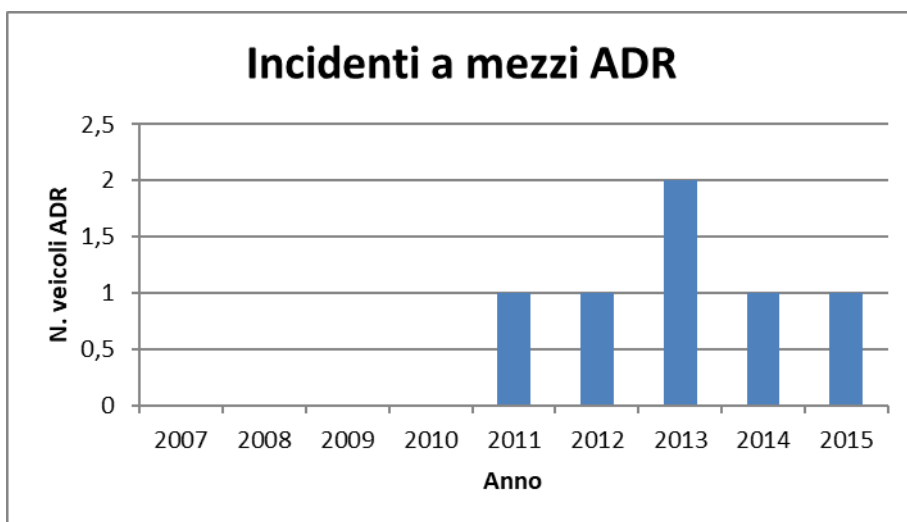


Figura 123: eventi di incidente e incendio a mezzi pesanti trasportanti ADR per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

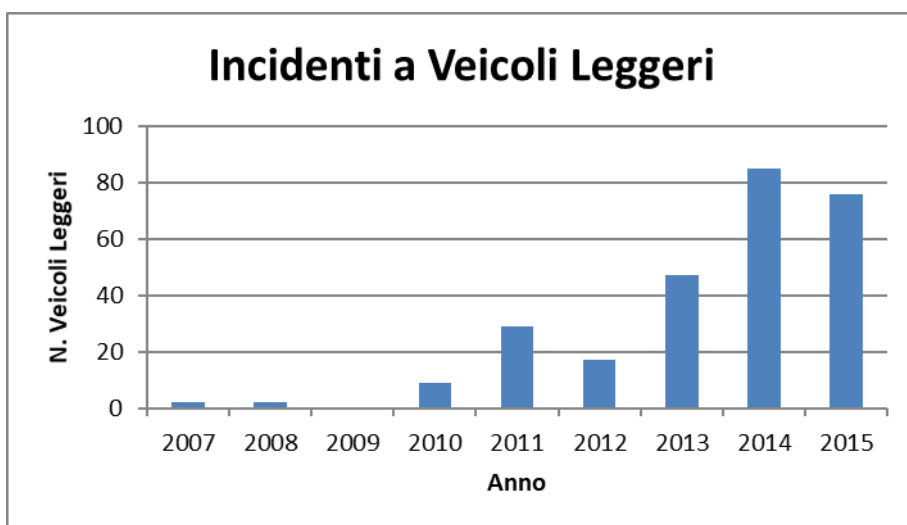


Figura 124: eventi di incidente e incendio a mezzi leggeri per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

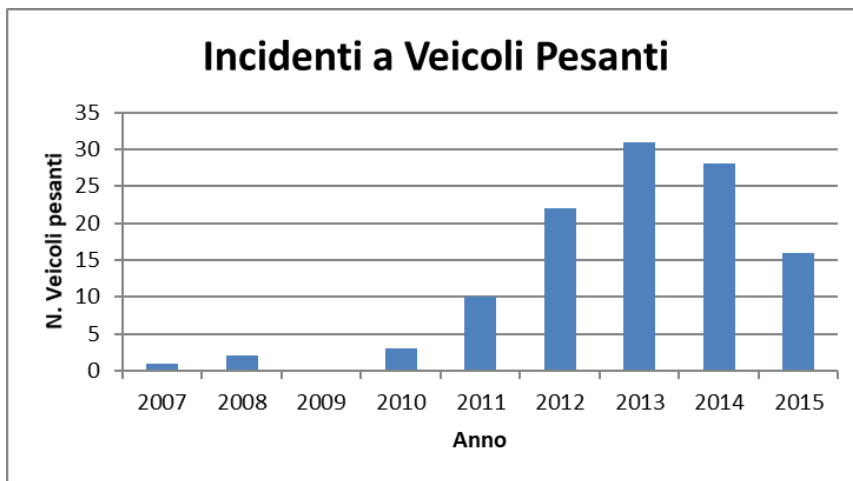


Figura 125: eventi di incidente e incendio a mezzi pesanti non ADR per anno di accadimento collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

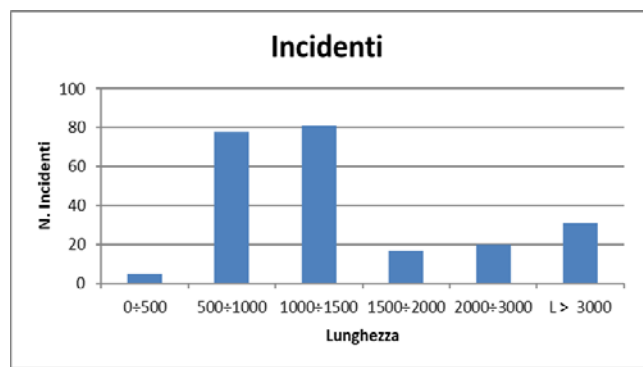
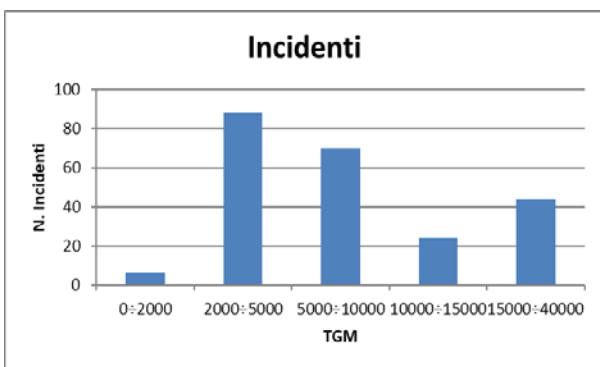


Figura 126: eventi di incidente tipico per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

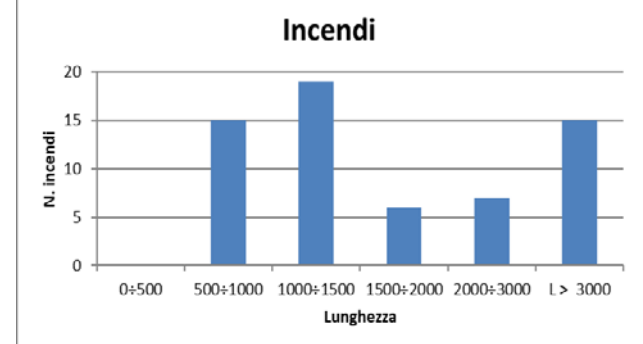
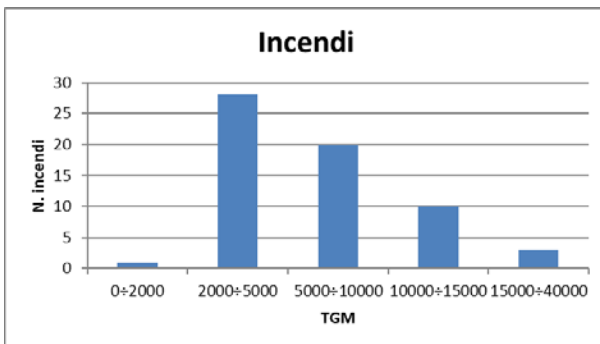


Figura 127: eventi di incendio per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

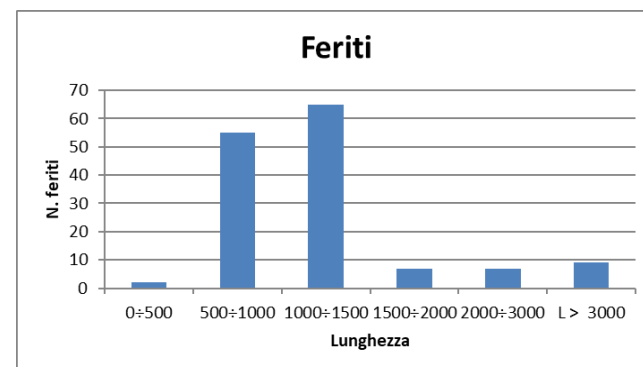
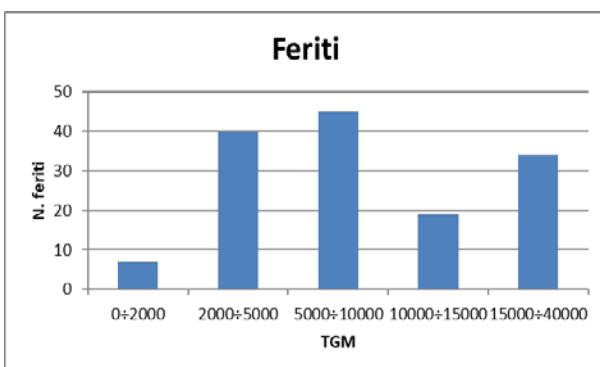


Figura 128: feriti per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007- 2015

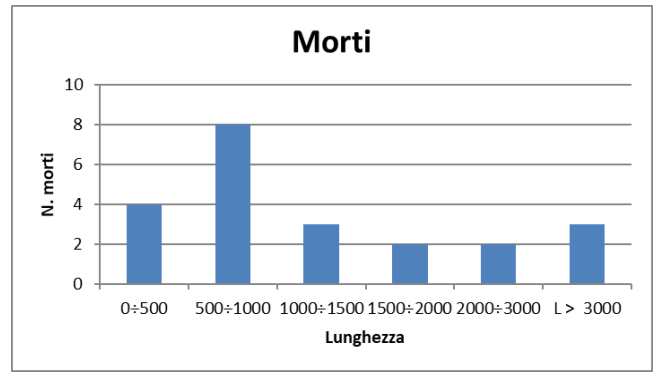
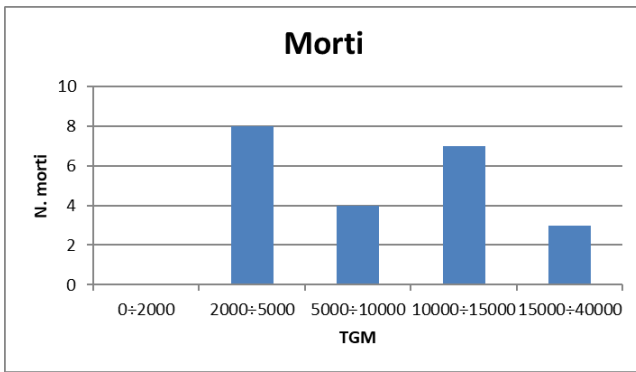


Figura 129: deceduti per classe di TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007- 2015

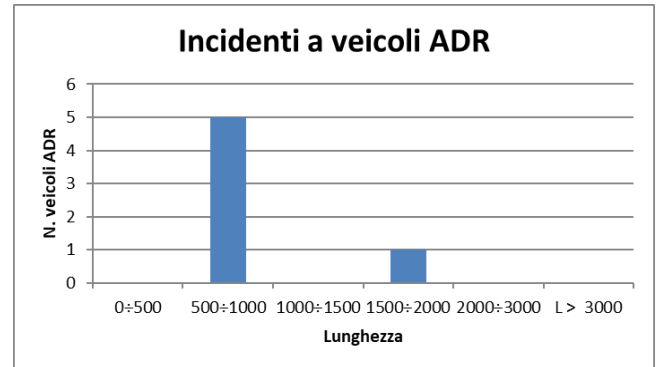
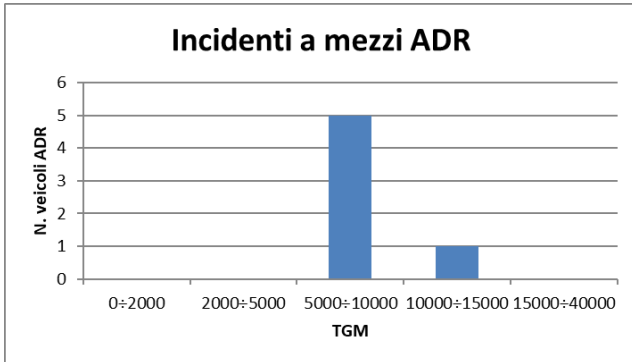


Figura 130: Incidenti a mezzi pesanti ADR per TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

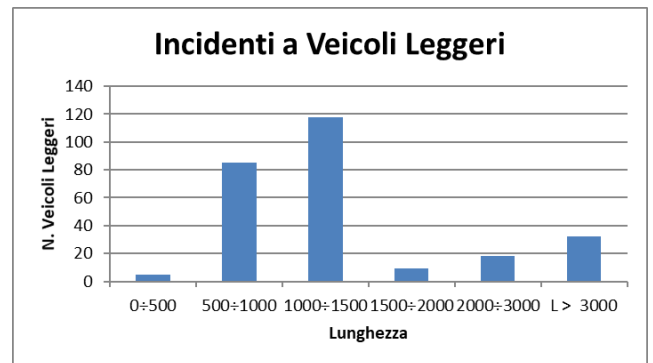
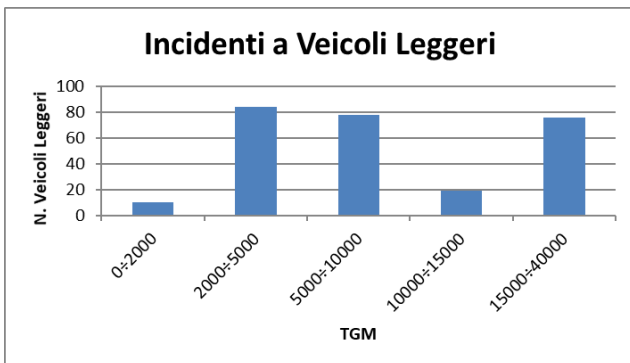


Figura 131: Incidenti a mezzi leggeri per TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

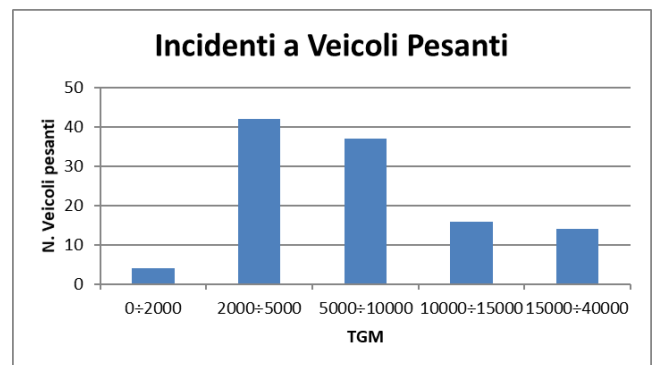
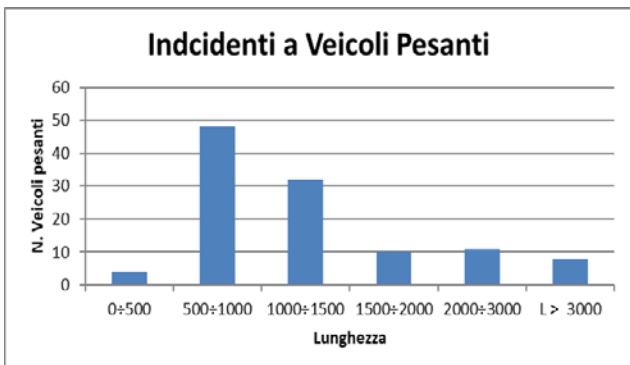


Figura 132: Incidenti a mezzi pesanti per TGM di corsia e lunghezza collezionati nel DB della Commissione – anni 2007-2015

A3.3 Prime analisi di consistenza sulla base dati degli incidenti in galleria

Il D. Lgs. 264/2006 indica, nell'allegato tecnico, quali parametri fondamentali di caratterizzazione del sistema galleria stradale, la lunghezza della struttura (L, lunghezza) e il volume di traffico che la impegna (TGM, traffico giornaliero medio per corsia).

L'antecedente logico a tale assunzione è costituito dall'ipotesi ragionevole che l'incidentalità tipica stradale di struttura sia direttamente correlata all'esposizione, e quindi ai transiti elementari di veicoli che attraversano la galleria (TGM) e alla percorrenza in galleria (L).

Per verificare la caratteristica statistica del dato collezionato si è proceduto al trattamento dei dati con il seguente approccio:

1. Sono stati discriminati gli incidenti per tipologia, distinguendo incidenti originari tipici stradali (perdita di controllo del veicolo e collisione contro altri veicoli o fissi) e incendi originari, e selezionando per questa trattazione i soli incidenti stradali tipici; gli incendi non originari, in quanto derivati da incidente stradale, sono ricompresi nella prima categoria;
2. E' stata ottenuta la distribuzione di frequenza campionaria del gruppo di incidenti tipici stradali per classi di L e la distribuzione di frequenza campionaria del medesimo gruppo per classi di TGM delle strutture;
3. E' stata calcolata la distribuzione di frequenza teorica dell'incidentalità tipica stradale assumendo l'ipotesi di diretta proporzionalità (linearità) tra pericolosità (e quindi incidentalità) e L e TGM;
4. E' stato discusso il confronto tra le coppie di distribuzioni (campionaria vs teorica per distribuzioni, rispettivamente, per classi di L e per classi di TGM).

A3.3.1 Definizione del campione di incidenti in galleria classificabili come incidenti stradali tipici

La discriminazione dei casi censiti col criterio proposto ha restituito un sottocampione operazionalizzabile di 171 eventi di incidente tipico. Solo uno dei casi censiti è costituito da un incidente originario tipico stradale successivamente evoluto in incendio.

Sono invece 61 i casi censiti di incendio originario, su un totale di 232 casi collezionati.

L'incidenza dell'evento di incendio secondario rispetto a quello originario è stimata quindi inferiore all'1,5%. Come evidenziato nella tabella seguente, il confronto con statistiche risalenti indica una netta diminuzione del fenomeno: a conferma, probabilmente, di una sempre migliore capacità di prevenzione dell'effetto domino nella progettazione e costruzione dei veicoli al passare del tempo.

Fonte	<i>XVIII World Road Congress [1987]</i>	<i>DB Gallerie</i>
Periodo	1979 - 1985	2008-2015
Quota [%] degli incendi non originari (a seguito di incidentalità tipica) sul totale degli incendi	5 %	1,4 %

Tabella 63: frequenza relativa degli incendi non originari su quelli originari

A3.3.2 Distribuzione di frequenza campionaria degli incidenti tipici stradali per classi di L e per classi di TGM

L'analisi è stata condotta attribuendo i singoli casi di incidenti censiti alle varie classi di lunghezza delle gallerie. Vista la disponibilità del dato relativo alla lunghezza della galleria sede di incidente, le classi di

lunghezza sono state definite per intervalli di 1000 metri, riconoscendo 11 classi (da 500 a 1000, da 1000 a 2000, ..., oltre 10000). Visto che nessuna struttura censita (346 gallerie censite sorvegliate) è risultata avere lunghezza compresa tra 6000 e 10000 metri, 4 delle 11 classi teoriche sono risultate vuote.

La numerosità degli incidenti per classe di lunghezza e la conseguente frequenza di incidente per classe di lunghezza sono riportate nella tabella seguente.

Classi di Lunghezza	N (incidenti) per classi di lunghezza	f (incidentale) campionaria per classi di lunghezza
<1000	68	0,398
1000<L<2000	73	0,427
2000<L<3000	13	0,076
3000<L<4000	0	0,000
4000<L<5000	12	0,070
5000<L<6000	3	0,018
6000<L<7000	0	0,000
7000<L<8000	0	0,000
8000<L<9000	0	0,000
9000<L<10000	0	0,000
L>10000	2	0,012
Tot	171	1,000

Tabella 64: distribuzione campionaria per classi di lunghezza degli eventi collezionati nel DB della Commissione

Discriminando per classi di TGM, per intervalli ampi 2000 veic., si è ottenuta la distribuzione di frequenza campionaria seguente.

Classi di TGM	N (incidenti) per classi di TGM	f (incidentale) campionaria per classi di TGM
<2000	5	0,029
2000<TGM<4000	49	0,287
4000<TGM<6000	15	0,088
6000<TGM<8000	16	0,094
8000<TGM<10000	31	0,181
10000<TGM<12000	10	0,058
12000<TGM<14000	1	0,006
14000<TGM<16000	3	0,017
16000<TGM<18000	2	0,012
18000<TGM<20000	0	0,000
TGM>200000	39	0,228
Tot	171	1,000

Tabella 65: distribuzione campionaria per classi TGM di corsia degli eventi collezionati nel DB della Commissione

A3.3.3 Distribuzione di frequenza teorica

Per ottenere la distribuzione di frequenza teorica per classi di TGM e per classi di lunghezza è stato introdotto e assegnato a ciascuna struttura delle 346 censite l'indice di pericolosità (IP) coerentemente individuato sulla base dell'ipotesi di lineare dipendenza della pericolosità da TGM e L. L'indice di pericolosità, o momento di pericolosità, costituisce l'antecedente principale (nell'ipotesi formulata) alla genesi incidentale.

$$IP_{galleria} = TGM_{galleria} \times L_{galleria}$$

Come tale, calcolando l'indice di pericolosità per le varie classi di TGM e di L (ottenuto dalla somma dell'indice di pericolosità delle singole gallerie afferenti alle varie classi discriminanti – per L o per TGM rispettivamente) è possibile ipotizzare la distribuzione di frequenza teorica incidentale.

$$f_{classi(incidentale)} = f_{classi(IP)} = \frac{\sum_{classe}(TGM_i \times L_i)}{\sum(TGM_i \times L_i)}$$

Le tabelle seguenti riportano le distribuzioni di frequenza teorica per L e per TGM.

Classi di Lunghezza	f(incidentale) ipotesi lineare traffico e lunghezza
<1000	0,440
1000<L<2000	0,401
2000<L<3000	0,104
3000<L<4000	0,018
4000<L<5000	0,020
5000<L<6000	0,005
6000<L<7000	0,000
7000<L<8000	0,000
8000<L<9000	0,000
9000<L<10000	0,000
L>10000	0,012
Tot	1,000

Tabella 66: distribuzione teorica per classi di lunghezza degli eventi collezionati nel DB della Commissione

Classi di TGM	f(incidentale) ipotesi lineare traffico e lunghezza
<2000	0,022
2000<TGM<4000	0,174
4000<TGM<6000	0,165
6000<TGM<8000	0,131
8000<TGM<10000	0,212
10000<TGM<12000	0,128
12000<TGM<14000	0,029
14000<TGM<16000	0,065
16000<TGM<18000	0,015
18000<TGM<20000	0,006
TGM>200000	0,051
Tot	1,000

Tabella 67: distribuzione teorica per classi TGM di corsia degli eventi collezionati nel DB della Commissione

A3.3.4 Confronto fra i dati reali e le distribuzioni teoriche

Il confronto tra le distribuzioni su classi di lunghezza, rispettivamente riferite ai dati reali e a quelli teorici, è riportato nel grafico seguente.

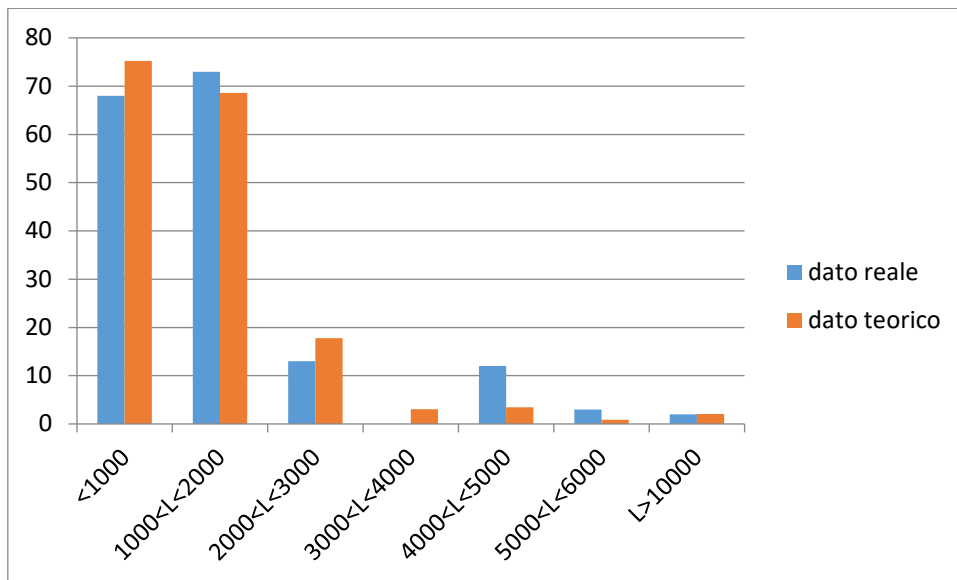


Figura 133: confronto fra distribuzione teorica e campionaria per classi di lunghezza degli eventi collezionati nel DB della Commissione

Analogamente si propone il grafico di confronto delle distribuzioni per dati reali e teorici sulle classi di TGM.

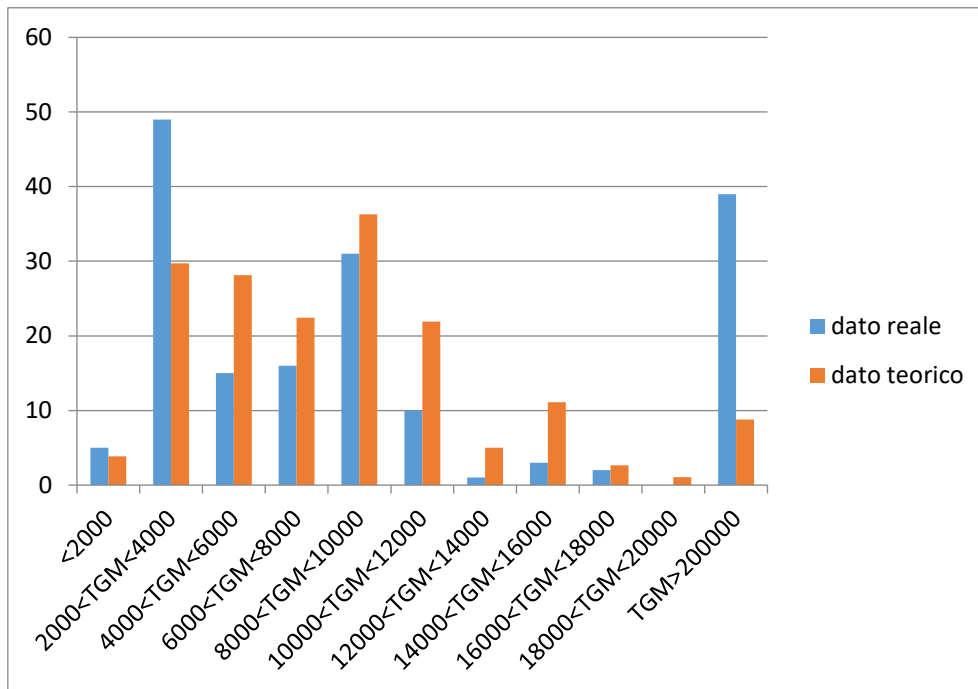


Figura 134: confronto fra distribuzione teorica e campionaria per classi TGM di corsia degli eventi collezionati nel DB della Commissione

L'applicazione del test esatto di Fisher alle due coppie di distribuzioni (teorica e campionaria), rispettivamente ottenute per discriminazione per classi di lunghezza e per classi di TGM, restituisce un esito di differenza statisticamente significativa tra le distribuzioni. In considerazione della sufficiente numerosità del campione disponibile, l'esito del test di Fisher conferma la natura concausale del fenomeno della pericolosità (e quindi della sua conseguenza misurabile, cioè l'incidentalità).

Ad una analisi di dettaglio, la serie degli scarti quadratici delle distribuzioni sulle classi di lunghezza (il cui grafico è di seguito riportato) evidenzia una singolarità rilevante nella classe tra 4000 e 5000 metri. La classe è popolata da 12 incidenti tipici, occorsi in sole 3 gallerie.

In relazione a tale evidenza, e non avendo definito per tale campione un criterio di riconoscimento di strutture *outliers* (evidentemente non rappresentativo per i caratteri di selezione già discussi), la distribuzione dei dati reali rispetto a quelli teorici con riferimento alla stratificazione per classi di lunghezza, può essere considerata *operativamente simile*.

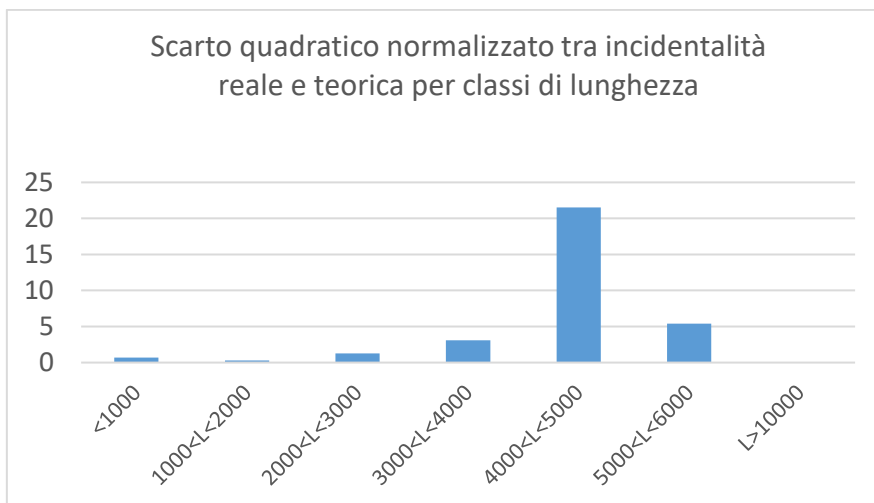


Figura 135: Scarto quadratico normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di lunghezza

Analogamente si propone di seguito l'analisi della serie degli scarti quadratici delle distribuzioni sulle classi di TGM.

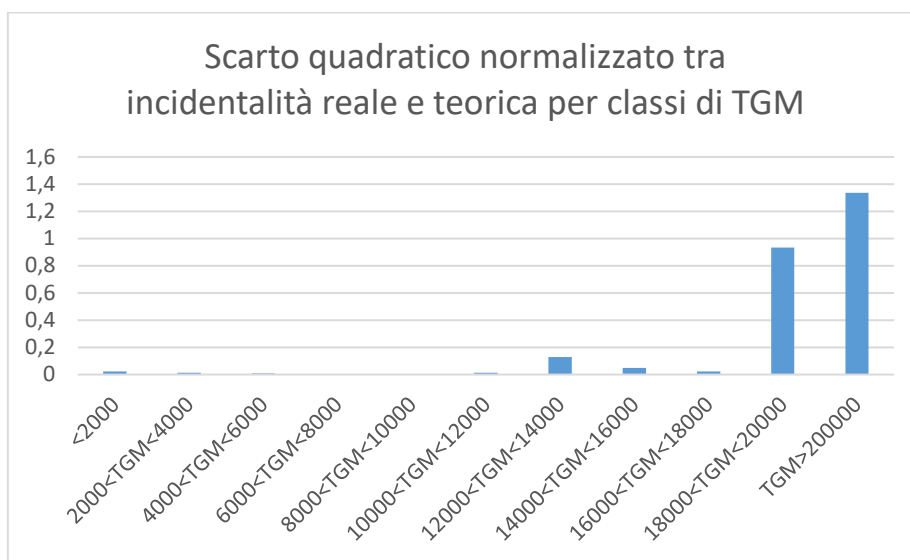


Figura 136: Scarto quadratico normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM

In questo caso si evidenzia una singolarità rilevante nella classe di TGM superiore a 20000. Le strutture comprese nella classe sono tutte gallerie del Grande Raccordo Anulare. Eliminando tale classe dall'analisi, la serie degli scarti evidenzia una dispersione dei valori a carico di varie classi.

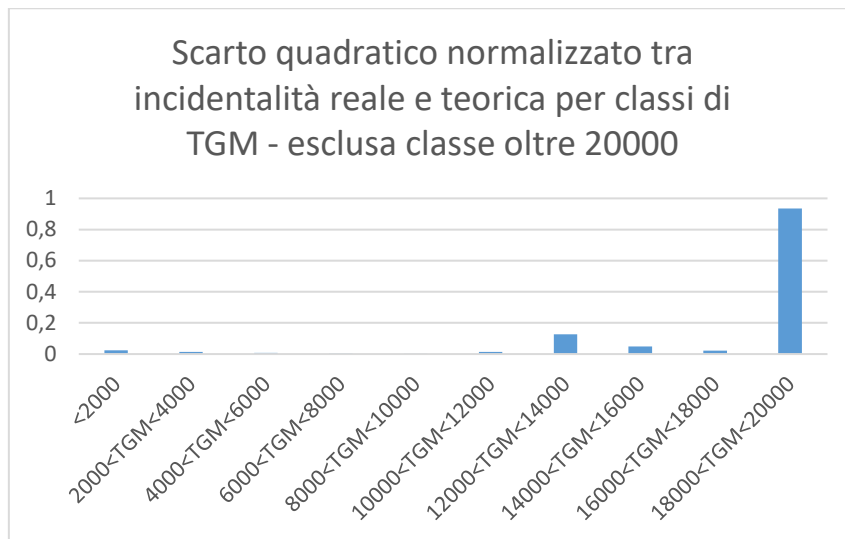


Figura 137: Scarto quadratico normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM - esclusa classe oltre 20000

Per verificare se l'ipotesi di linearità tra incidentalità e TGM può essere oggetto di una correzione orientata, si propone la serie degli scarti semplici, in segno, tra le due distribuzioni (reale e teorica). Resta esclusa dall'analisi la classe TGM>20.000 per le evidenze già richiamate.

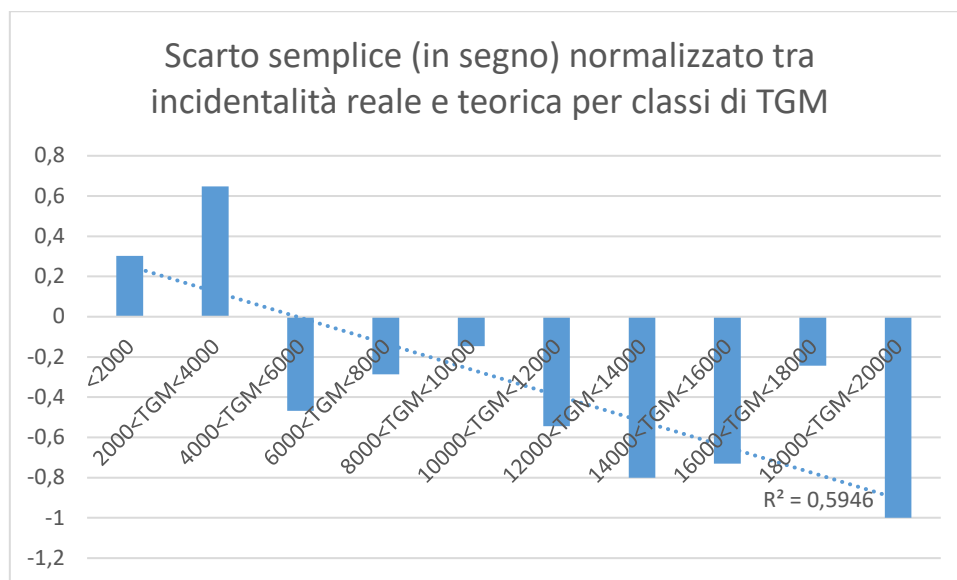


Figura 138: Scarto semplice (in segno) normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM

Si evidenzia che la distribuzione campionaria è sempre superiore a quella teorica per classi di TGM basse (classi 1 e 2, fino a TGM 4000) e sempre inferiore per le classi di TGM superiore.

Impostando una funzione di regressione di grado 1 si ottiene, con un R^2 di quasi 0.6, un risultato di interesse statistico: il TGM sembra correlarsi negativamente con la probabilità di incidente, e cioè l'incidentalità sembra favorita da valori di TGM bassi. Tale evidenza è conforme alle osservazioni di bibliografia, che evidenziano come la correlazione tra TGM e incidentalità presenti una discontinuità determinata dal passaggio dalla condizione di flusso libero alla condizione di flusso condizionato e fino al flusso congestionato

Per un ulteriore commento ai risultati si consideri che l'affidabilità della stima per TGM elevati tende a decrescere, diminuendo la base campionaria. A tale scopo sembra utile discutere l'andamento tendenziale fino a 10.000 di valore di TGM.

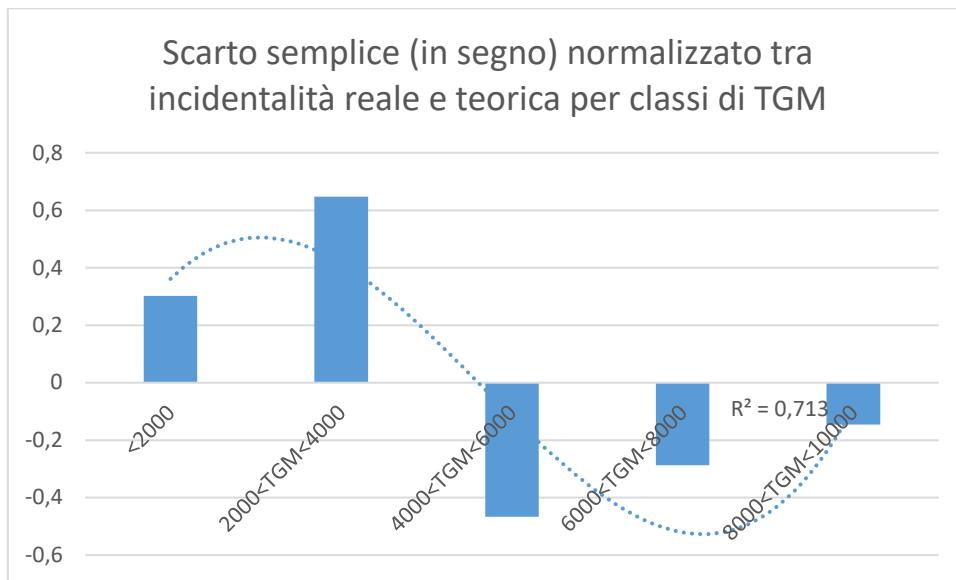


Figura 139: Scarto semplice (in segno) normalizzato tra incidentalità campionaria e teorica per classi di TGM

È d'altronde possibile che su questo fenomeno abbia influenza il tipo di allestimento delle gallerie, ipotizzando che nel parco gallerie esistenti quelle più risalenti abbiano lunghezze relativamente contenute, e che quindi queste presentino caratteristiche di tracciato e di allestimento tendenzialmente peggiori rispetto a quelle di più recente costruzione.

A3.4 Analisi statistiche di correlazione semplice ed esplorazione di ipotesi di regressione multipla lineare

Le analisi seguenti sono state condotte con software statistico SPSS di IBM, versione 15.

Utilizzando il costrutto di Kendall per variabili non normalmente distribuite, è stata verificata una correlazione statisticamente significativa tra TGM, L e numero di incidenti.

Il risultato è in linea con la bibliografia consolidata, e conferma come l'occasione di incidente sia, in via principale e fatti salvi effetti di modulazione ad opera delle altre variabili, direttamente proporzionale al TGM e alla lunghezza della galleria. La tabella di seguito riporta la tabella complessiva delle correlazioni, avendo evidenziato le correlazioni significative.

		Correlazioni					
		TGM	Lm	TGMxL	Incidenti_tot	Incendi	incidenti_ord
TGM	Coefficiente di	1,000	-0,051	,561(**)	,131(**)	0,082	,105(*)
	Sig. (2-code)	.	0,162	0,000	0,002	0,061	0,014
	N	346	346	346	346	346	346
Lm	Coefficiente di	-0,051	1,000	,391(**)	,153(**)	,223(**)	,098(*)
	Sig. (2-code)	0,162	.	0,000	0,000	0,000	0,022
	N	346	346	346	346	346	346
TGMxL	Coefficiente di	,561(**)	,391(**)	1,000	,240(**)	,240(**)	,178(**)
	Sig. (2-code)	0,000	0,000	.	0,000	0,000	0,000
	N	346	346	346	346	346	346
Incidenti_tot	Coefficiente di	,131(**)	,153(**)	,240(**)	1,000	,562(**)	,835(**)
	Sig. (2-code)	0,002	0,000	0,000	.	0,000	0,000
	N	346	346	346	346	346	346
Incendi	Coefficiente di	0,082	,223(**)	,240(**)	,562(**)	1,000	,154(**)
	Sig. (2-code)	0,061	0,000	0,000	0,000	.	0,003
	N	346	346	346	346	346	346
incidenti_ord	Coefficiente di	,105(*)	,098(*)	,178(**)	,835(**)	,154(**)	1,000
	Sig. (2-code)	0,014	0,022	0,000	0,000	0,003	.
	N	346	346	346	346	346	346

Tabella 68: test di correlazione (tau di Kendall per variabili non normali) tra le principali variabili generative della pericolosità e incidenti

Ulteriormente, l'analisi di correlazione ha evidenziato come la variabile TGMxL si correla agli eventi incidentali meglio (con significatività ancora più elevata) che non le variabili generatrici singolarmente considerate (TGM e L), a conferma della ipotesi che tale prodotto costituisca la principale variabile generativa dell'incidentalità, assumendo il ruolo principale di parametro di esposizione, in linea con l'ampia bibliografia in materia.

Una ipotesi esplorativa di regressione lineare tra tasso di incidenti (variabile dipendente) e variabili indipendenti, costituite, per logica interna e quindi sulla base di consolidate evidenze bibliografiche (cfr. capitolo dedicato) da TGMxL e percentuale di pesanti ha confermato le principali evidenze proposte dalla bibliografia consolidata. Si evidenzia, tuttavia, che la percentuale di pesanti non presenta, nel disegno complessivo, una adeguata significatività.

ANOVA(b)

Modello		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
1	Regressione	,000	2	,000	8,992	,000(a)
	Residuo	,000	64	,000		
	Totale	,000	66			

a Stimatori: (Costante), TGMxL, pesanti

b Variabile dipendente: Tasso_incid

Coefficienti(a)

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	Sig.
		B	Errore std.	Beta	B Errore std.	
1	(Costante)	2,13E-007	,000		3,991	,000
	TGMxL	-9,28E-012	,000	-,442	-4,000	,000
	% pesanti	3,48E-007	,000	,147	1,335	,187

a Variabile dipendente: Tasso_incid

Tabella 69: ANOVA per l'esplorazione della correlazione multipla tra tasso incidenti (vd) e TGMxL e % pesanti (vi)

Il modello è stato replicato per la verifica di una regressione esplorativa tra tasso di incendi, TGMxL e percentuale di pesanti, ottenendo risultati analoghi.

ANOVA(b)

Modello		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
1	Regressione	,000	2	,000	14,532	,000(a)
	Residuo	,000	30	,000		
	Totale	,000	32			

a Stimatori: (Costante), pesanti, TGMxL

b Variabile dipendente: Tasso_incendi

Coefficienti(a)

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	
		B	Errore std.	Beta	B Errore std.	Sig.
1	(Costante)	3,95E-008	,000		1,620	,116
	TGMxL	-2,46E-012	,000	-,341	-2,484	,019
	% pesanti	3,12E-007	,000	,513	3,730	,001

a Variabile dipendente: Tasso_incendi

Tabella 70: ANOVA per l'esplorazione della correlazione multipla tra tasso incendi (vd) e TGMxL e % pesanti (vi)

In questo caso la percentuale di pesanti presenta significatività adeguata.

I limiti di validità dei costrutti sono tuttavia evidenti, e sono costituiti dalla relativa modestia del campione in analisi (costituito dalle sole gallerie nelle quali, nel periodo di osservazione, è stato registrato un incidente) e dalla tendenziale non normalità delle variabili (seppure, con riferimento a queste selezionate, relativamente contenuta, e quindi con effetto limitato sulla sostenibilità del modello).

Tali evidenze confermano il costrutto stesso alla base della norma di gestione della sicurezza in galleria TERN (cfr Allegato III, D. Lgs. 264/2006), che vede le variabili L e TGM quali principali fattori della pericolosità dei tunnel.

Non è evidenziata la quota di varianza spiegata dal modello in quanto il campione, per i limiti evidenziati, non si qualifica della sufficiente qualità necessaria per una minima generalizzazione dei risultati.

A3.5 Analisi per gravità del sottocampione incendi

Premettendo che qualunque campione estratto dalla BD presenta inevitabilmente le medesime vulnerabilità della banca dati d'origine circa completezza e rappresentatività; è infatti evidente che la comunicazione dei casi da parte dei gestori avviene in via principale per gli eventi di maggiore gravità; tuttavia il criterio è, altrettanto evidentemente, diversamente applicato dai vari gestori, con l'effetto di rendere il campione nel suo complesso né rappresentativo né casuale.

È tuttavia ragionevole che i dati censiti siano caratterizzati da incompletezza inversamente proporzionale al danno. Ciò detto, alcune evidenze con qualche elemento di generalizzabilità (almeno operativa e condizionata) possono essere ricavate dall'analisi del sottocampione degli incidenti registrati, con specifico riferimento agli eventi per i quali è resa disponibile una descrizione temporizzata dell'andamento dell'emergenza determinatasi.

Con riferimento agli incendi in galleria, la categoria comprende fumi senza fiamme, piuttosto che piccoli focolai di scarso effetto, ma anche eventi maggiori caratterizzati da sviluppo completo dell'incendio (con raggiungimento del *flashover*). E', tra questi eventi, di primario interesse verificare la quota parte di incendi con effetto generalizzato, in quanto solo questi determinano le condizioni di emergenza in galleria capaci di pericolosità rilevante verso gli esposti e di danni maggiori alla struttura, con effetto di indisponibilità prolungate.

Allo scopo di tale analisi vengono quindi trattati i dati di incendio in galleria caratterizzati da disponibilità di dato sull'interruzione conseguente all'incendio.

Il totale degli eventi disponibili è 62 incendi; le ricostruttive incidentali hanno evidenziato che:

- Qualificazione preliminare: in 2 casi su 62 l'incendio è derivati da un incidente tipico; nei 60 casi restanti l'incendio è stato originato da guasto di varia natura;
- Qualificazione della gravità delle conseguenze: in 3 casi su 62 si sono registrati feriti a seguito dell'evento, e in 2 casi ulteriori ci sono stati morti; uno dei due casi di incidente mortale corrisponde ad un incendio determinatosi a seguito di incidente tipico;
- Qualificazione per tipologia di veicolo coinvolto: 35 casi sono relativi ad incendi a veicoli leggeri, 25 a veicoli pesanti (di cui 1 a veicolo pesante trasportante ADR), 2 a bus;
- Qualificazione del livello di sviluppo dell'incendio: i danni si sono limitati al veicolo in 27 dei casi censiti, mentre in 35 casi c'è stato danneggiamento della struttura;
- Qualificazione della reazione delle squadre di soccorso esterne: in 47 casi su 62 sono intervenuti i VVF.

In 60 dei casi censiti sono disponibili elementi descrittivi di dettaglio, utili ad una stima delle conseguenze. Dei 60 casi è proposta una classificazione in relazione alla durata dell'interruzione di servizio conseguente al danno, attribuendo gli eventi alle classi contigue di ampiezza pari ad 1 ora; i dati sono riportati e rappresentati di seguito.

Classe	Durata dell'interruzione		eventi [n]	f [-]
	da [minuti]	a [minuti]		
1	0	60	10	0,16666667
2	61	120	24	0,4
3	121	180	5	0,08333333
4	181	240	4	0,06666667
5	241	300	1	0,01666667
6	301	360	5	0,08333333
7	361	420	3	0,05
8	421	480	0	0
9	481	540	0	0
10	541	600	1	0,01666667
11	601	661	1	0,01666667
12	661	720	2	0,03333333
13	721	780	1	0,01666667
14	781	840	0	0
15	841	900	0	0
16	901	960	1	0,01666667
17	961	1020	1	0,01666667
18			1	0,01666667
frequenza relativa di incendi generalizzati [%]				5

Tabella 71: classificazione dei 60 eventi di incendio per classe di durata di interruzione conseguente

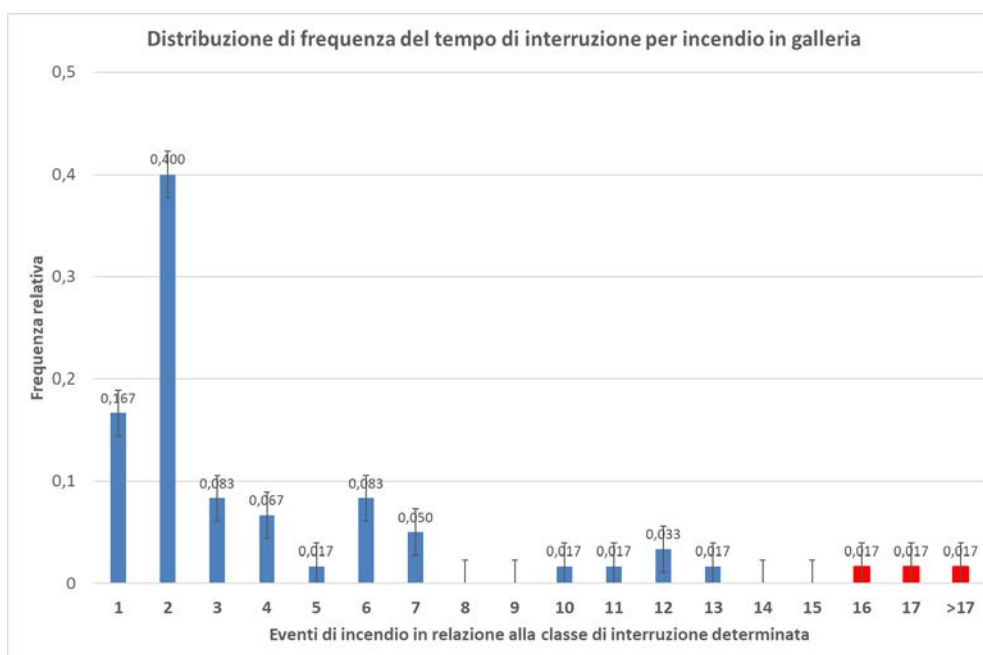


Figura 140: classificazione dei 60 eventi di incendio per classe di durata di interruzione conseguente

Solo 3 eventi sui 60 censiti hanno determinato interruzioni superiori a 13 ore, compatibili con una classificazione dell'evento quale incendio generalizzato. La frequenza relativa degli incendi generalizzati su quelli accaduti è quindi pari al 5%. Tale valore, considerata la tendenziale incompletezza campionaria più spiccata per le categorie di eventi con conseguenze lievi può essere considerata una stima per eccesso della frequenza relativa degli eventi di incendio generalizzato sul totale degli eventi di innesco, con o senza sviluppo di fiamma.

A4.1 Premessa

La base dati è costituita dagli eventi di incidente occorsi in 563 gallerie, identificate con nome, ID interno, ID gestore, fornice (destro o sinistro).

A differenza del campione costituito dagli eventi di incidente raccolti presso la Commissione Gallerie Stradali, in questo caso le gallerie costituenti la base dati non sono tutte gallerie TERN, né tutte si riferiscono a tratte autostradali, essendo invece presenti anche strutture che insistono su strade statali e su strade urbane, seppure di scorrimento.

Ciascuna galleria è caratterizzata per lunghezza (in metri) e riferita a tronco autostradale di appartenenza. Per ciascuna galleria è disponibile il dato relativo al numero di incidenti in ciascun anno del periodo di collezione (2006-2009) per tipologia di incidente. Le tipologie di classificazione incidentale sono:

- Incendi (119 eventi);
- Incidenti con coinvolgimento di persone (1082 eventi);
- Incidenti senza coinvolgimento di persone (2499 eventi);
- Anomalie (374 eventi).

Un sottogruppo di 488 eventi presenta elementi descrittivi dell'evento. Il sottogruppo è popolato da eventi riconducibili a:

incendi	17
incendi secondari	1
incidente con danni	122
incidenti senza danni	290
anomalie	58

Tabella 72: composizione sottocampione con elementi descrittivi aggiunti – DB Gestori

Il campo descrizione riporta elementi di conoscenza sulla dinamica dell'incidente, e/o sugli esiti. La lettura delle descrizioni evidenzia che la classificazione per tipologia incidentale non può essere considerata affidabile (es. alcuni *incidenti con danni* comprendono casi di incendio – ID 290_2007_5, come anche ID 555_2008_19). Ciò detto, le note aggiuntive che qualificano tale sottogruppo sono caratterizzate da bassa standardizzazione, determinando scarsa utilità delle informazioni aggiuntive.

A4.2 Identificazione di un sottocampione omogeneo e caratteristiche

È anzitutto necessario discriminare tra incidentalità in gallerie - fornici a doppio senso di marcia e a unico senso di marcia, in relazione alla differente qualificazione della pericolosità.

Sono stati inoltre individuati *outliers* con logica interna e logica esterna. Per logica interna sono stati espunti dal campione tutti i casi di gallerie bidirezionali e urbane. Per logica esterna sono stati espunti dal campione tutti i casi che mostravano un valore di $Z > 3$, essendo i punteggi Z – cioè valori normalizzati ottenuti per traslazione e scala della distribuzione campionaria ipotizzata normale – maggiori a 3 determinano l'appartenenza del caso ad una coda statistica di frequenza attesa inferiore all'1%.

Il campione così ridotto è costituito da 205 casi – galleria che contano complessivamente 101 incendi, 982 incidenti con danni a persone e 2249 incidenti lievi. Il campione così ottenuto presenta caratteristiche statistiche migliori di quello d'origine. Le variabili sono normali, o tendono alla normalità – con l'unica eccezione della lunghezza), come evidenziato nella tabella seguente.

Statistiche

		L	TGM_corsia	TGM_sezione	Esposizione	Pesanti	curv_max	Pendenza	Quota	Incidenti_gravi
N	Validi	195	195	195	195	195	195	195	195	195
	Mancanti	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Media		1301,77	6498,73	24647,12	26883,04	,2109	1,1907	1,2075	330,89	5,01
Mediana		959,00	5680,00	21852,00	20928,00	,2100	1,0000	1,3000	223,00	3,00
Deviazione std.		1085,697	3590,058	15588,743	19708,404	,06860	,92015	1,53152	289,642	5,390
Asimmetria		4,037	,792	1,256	1,740	,344	1,181	-,729	1,124	2,484
Errore std dell'asimmetria		,174	,174	,174	,174	,174	,174	,174	,174	,174
Curtosi		24,648	,236	3,867	3,777	-,423	2,240	1,448	,575	10,215
Errore std della curtosi		,346	,346	,346	,346	,346	,346	,346	,346	,346
Minimo		505	905	2636	3914	,07	,01	-4,07	22	0
Massimo		10176	18639	111836	116686	,42	5,00	4,58	1377	39

Tabella 73: caratteristiche statistiche del sottocampione ridotto omogeneo di gallerie – DB Gestori

I grafici di seguito descrivono le caratteristiche principali del campione trattato.

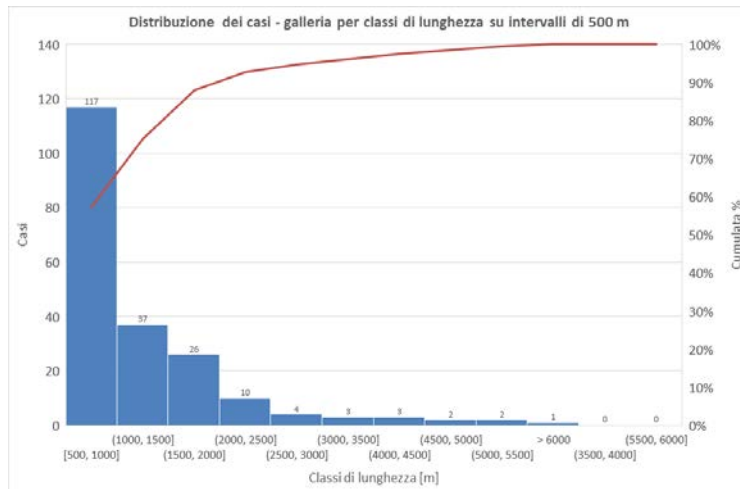


Figura 141: distribuzione dei casi galleria per classi di lunghezza – sottocampione omogeneo DB gestori

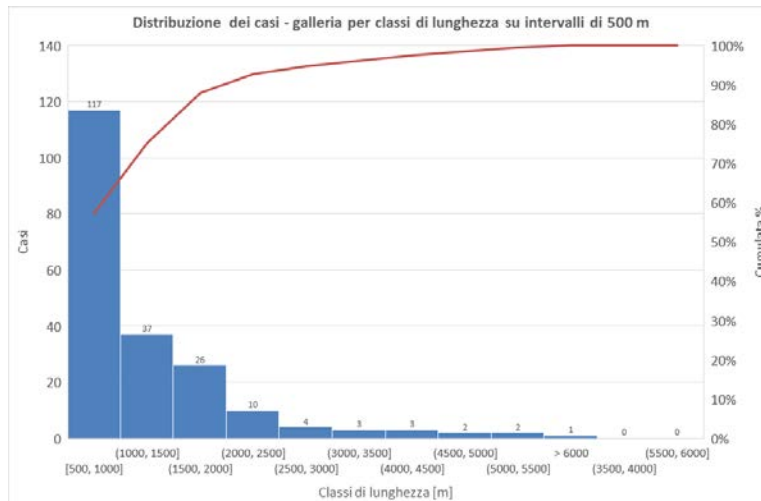


Figura 142: distribuzione dei casi galleria per classi di TGM – sottocampione omogeneo DB gestori

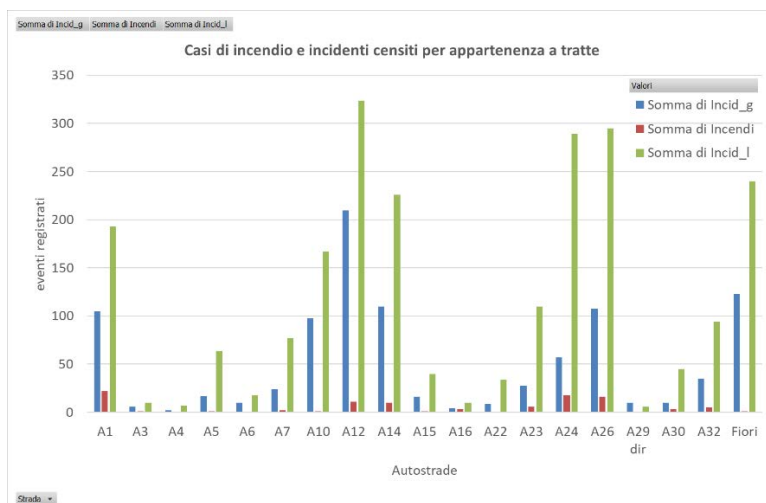


Figura 143: eventi di incidente lieve, grave e di incendio registrati nelle gallerie, aggregate per tronchi autostradali – sottocampione omogeneo DB gestori

A4.3 Analisi dell'incidentalità per tratta

Per ciascuna tratta autostradale è stato ricavato inoltre il valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi annui. Le principali elaborazioni sono riportate nelle tabelle seguenti.

A12																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no;1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
APPARIZIONE DX A12	0	2	1066	11506	46023	49060177	0,15	2	A12	0	0,10	0,47	122	0	1	0	12	8	-	1,68E-07	1,12E-07	2,79E-07
M. CAMALDOLI DX	0	2	1324	11506	46023	60934028	0,15	2	A12	0	0,10	0,23	120	0	1	1	7	18	1,12E-08	7,87E-08	2,02E-07	2,81E-07
DELLA MADDALENA DX A12	0	2	1452	9962	39849	57861358	0,16	2	A12	0	0,95	0,55	119	0	1	0	10	16	-	1,18E-07	1,89E-07	3,08E-07
DELL'ANCHETTA DX A12	0	2	1420	9962	39849	56586176	0,16	2	A12	0	1,03	0,56	128	0	1	1	15	14	1,21E-08	1,82E-07	1,69E-07	3,51E-07
GIOVANNI MAGGIO DX A12	0	2	1802	10781	43124	77709989	0,15	2	A12	0	2,50	0,11	117	0	1	1	15	21	8,81E-09	1,32E-07	1,85E-07	3,17E-07
MONTE CASTELLETTI DX A12	0	2	1341	11360	45441	60935898	0,14	2	A12	0	2,50	1,19	151	0	1	1	9	11	1,12E-08	1,01E-07	1,24E-07	2,25E-07
MONTE CASTELLETO DX A12	0	2	2007	11360	45441	91199364	0,14	2	A12	0	0,10	1,89	130	0	1	1	11	27	7,51E-09	8,26E-08	2,03E-07	2,85E-07
MONTE GIUGO DX A12	0	2	1672	11360	45441	75976750	0,14	2	A12	0	0,79	1,08	160	0	1	0	17	22	-	1,53E-07	1,98E-07	3,52E-07
MONTE MORO DX A12	0	2	950	11360	45441	43168608	0,14	2	A12	0	1,25	0,42	151	0	1	1	9	15	1,59E-08	1,43E-07	2,38E-07	3,81E-07
MONTE QUEZZI DX A12	0	2	1310	11506	46023	60289711	0,15	2	A12	0	0,99	1,98	108	0	1	1	13	14	1,14E-08	1,48E-07	1,59E-07	3,07E-07
M. VEILINO DX	0	2	587	11506	46023	27015313	0,15	2	A12	0	2,00	3,58	112	0	1	0	13	11	-	3,3E-07	2,79E-07	6,08E-07
MONTE SPERONE DX	0	2	1670	14168	56674	94645046	0,16	2	A12	0	0,10	1,86	127	0	1	1	12	30	7,24E-09	8,68E-08	2,17E-07	3,04E-07
RIVAROLO II unica DX A12	0	1	541	13843	13843	7489285	0,16	1	A12	0	5,00	-2,22	57	1	1	0	3	3	-	2,74E-07	2,74E-07	5,49E-07
RIVAROLO III unica DX A12	0	1	641	14493	14493	9290289	0,16	1	A12	0	5,00	-1,87	57	1	1	0	4	3	-	2,95E-07	2,21E-07	5,16E-07
SAN BARTOLOMEO DX A12	0	2	613	9962	39849	24427694	0,16	2	A12	0	0,10	2,12	82	0	1	0	6	4	-	1,68E-07	1,12E-07	2,80E-07
S. ANNA DX	0	2	865	7675	30702	26557195	0,18	2	A12	0	0,10	0,23	102	0	1	0	3	4	-	7,74E-08	1,03E-07	1,81E-07
SANTA GIULIA DX A12	0	2	1172	7675	30702	35982697	0,18	2	A12	0	0,90	1,71	90	0	1	0	13	16	-	2,47E-07	3,05E-07	5,52E-07
SESSAREGO DX A12	0	2	540	11360	45441	24537946	0,14	2	A12	0	0,10	1,30	163	0	1	1	13	8	2,79E-08	3,63E-07	2,23E-07	5,86E-07
CROCE DEI TOZZI N	0	2	562	5624	22494	12641628	0,21	2	A12	0	1,43	2,31	126	0	1	1	2	7	5,42E-08	1,08E-07	3,79E-07	4,88E-07
GIOVANNELLA N	0	2	771	5624	22494	17342874	0,21	2	A12	0	1,50	2,33	178	0	1	0	4	8	-	1,58E-07	3,16E-07	4,74E-07
PIAN DEL LUPO N	0	2	1452	5624	22494	32661288	0,21	2	A12	0	1,00	2,27	285	0	1	1	1	6	2,1E-08	2,1E-08	1,26E-07	1,47E-07
FOCE N	0	2	692	5527	22106	15297352	0,21	2	A12	0	1,25	0,00	312	0	1	0	1	6	-	4,48E-08	2,69E-07	3,13E-07
SCHIENA DI SCIONA N	0	2	527	5527	22106	11649862	0,21	2	A12	0	3,33	1,71	323	0	1	0	3	7	-	1,76E-07	4,12E-07	5,88E-07
PIAN DELLA MADONNA N	0	2	1713	5527	22106	37867578	0,21	2	A12	0	1,11	1,28	337	0	1	0	5	7	-	9,04E-08	1,27E-07	2,17E-07
BORDIGONA N	0	2	505	5463	21852	11035260	0,22	2	A12	0	2,00	1,19	208	0	1	0	0	5	-	-	3,1E-07	3,10E-07
COSTA DI ROVERANO N	0	2	777	5463	21852	16979004	0,22	2	A12	0	0,50	2,06	221	0	1	0	2	7	-	8,07E-08	2,82E-07	3,63E-07
MADONNA DEL POGGIOLO N	0	2	620	5463	21852	13548240	0,22	2	A12	0	1,63	0,97	193	0	1	0	1	5	-	5,06E-08	2,53E-07	3,03E-07
SOGGIO N	0	2	580	5463	21852	12674160	0,22	2	A12	0	1,00	3,28	157	0	1	0	0	6	-	-	3,24E-07	3,24E-07
RAMELLO N	0	2	568	5680	22720	12904960	0,22	2	A12	0	0,10	1,06	112	0	1	0	0	4	-	-	2,12E-07	2,12E-07
NOCENTINI N	0	2	1454	5680	22720	33034880	0,22	2	A12	0	0,66	1,93	100	0	1	0	5	5	-	1,04E-07	1,04E-07	2,07E-07
RIMAZZANO S	0	2	924	4423	17692	16347408	0,18	2	A12	0	0,63	0,43	61	0	1	0	1	6	-	4,19E-08	2,51E-07	2,93E-07
Lunghezza totale	32118	35954																				
TGM medio (ponderato)	35110																					
tasso di incendio medio	8,71E-09																					
tasso di incidente grave medio	1,66E-07																					
tasso di incidente lieve medio	2,57E-07																					
casi incendio	11																					

Tabella 76: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A12

A15																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no; 1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_I	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_I	tasso_incid_tutti
CORCHIA LAS	0	2	529	4854	19415	10270704	0,24	2	A15	0	0,10	4,54	686	0	1	0	1	7	-	6,67E-08	4,67E-07	5,34E-07
VALICO LAS	0	2	2054	4854	19415	39879067	0,24	2	A15	0	0,10	0,68	752	0	1	1	3	13	1,72E-08	5,15E-08	2,23E-07	2,75E-07
CUCCHERO LAS	0	2	1166	4854	19415	22638263	0,24	2	A15	0	2,13	1,54	711	0	1	0	4	11	-	1,21E-07	3,33E-07	4,54E-07
PUNTAMONTE LAS	0	2	1426	4854	19415	27686246	0,24	2	A15	0	0,43	2,38	487	0	1	0	2	5	-	4,95E-08	1,24E-07	1,73E-07
FRESONARA N	0	2	854	9865	39460	33698840	0,21	2	A15	0	1,89	1,41	38	0	1	0	6	4	-	1,22E-07	8,13E-08	2,03E-07
Lunghezza totale	6029	7746,5																				
TGM medio (ponderato)	22255																					
tasso di incendio medio	5,80E-09																					
tasso di incidente grave medio	9,28E-08																					
tasso di incidente lieve medio	2,32E-07																					
casi incendio	1																					

Tabella 78: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A15

A16																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no; 1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_I	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_I	tasso_incid_tutti
MONTEMILETTO DX A16	0	2	959	5306	21223	20352473	0,29	2	A16	0	2,00	0,21	501	0	1	1	4	6	3,37E-08	1,35E-07	2,02E-07	3,37E-07
SCAMPITELLA DX A16	0	2	768	3749	14996	11517297	0,42	2	A16	0	0,10	1,30	670	0	1	2	0	4	1,19E-07	-	2,38E-07	2,38E-07
Lunghezza totale	1727	4002																				
TGM medio (ponderato)	18454																					
tasso di incendio medio	4,06E-08																					
tasso di incidente grave medio	5,42E-08																					
tasso di incidente lieve medio	1,35E-07																					
casi incendio	3																					

Tabella 79: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A16

A22																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no; 1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
BRENNERO S	0	2	630	6714	26855	16918650	0,32	2	A22	0	2,00	2,06	1377	0	1	0	1	7	-	4,05E-08	2,83E-07	3,24E-07
VIRGOLO S	0	2	887	8002	32009	28391983	0,31	2	A22	0	0,89	0,34	272	0	1	0	8	27	-	1,93E-07	6,51E-07	8,44E-07
Lunghezza totale	1517	6301,5																				
TGM medio (ponderato)	29869																					
tasso di incendio medio	0,00E+00																					
tasso di incidente grave medio	4,78E-08																					
tasso di incidente lieve medio	1,81E-07																					
caso incendio	0																					

Tabella 80: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A22

A23																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no; 1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
TARVISIO DX A23	0	2	2238	2933	11731	26253888	0,35	2	A23	0	0,71	1,34	749	0	1	0	3	11	-	7,83E-08	2,87E-07	3,65E-07
CLAP FORAT DX A23	0	2	1686	2988	11951	20149926	0,34	2	A23	0	0,40	0,59	524	0	1	1	1	11	3,4E-08	3,4E-08	3,74E-07	4,08E-07
LAGO DX	0	2	1558	4696	18782	29262668	0,26	2	A23	0	0,71	1,09	223	0	1	0	2	15	-	4,68E-08	3,51E-07	3,98E-07
CAMPIOLO DX	0	2	836	2988	11951	9991304	0,34	2	A23	0	1,43	2,03	294	0	1	1	1	10	6,86E-08	6,86E-08	6,86E-07	7,54E-07
DOGNA DX A23	0	2	1599	2988	11951	19110161	0,34	2	A23	0	0,59	0,94	455	0	1	0	3	6	-	1,08E-07	2,15E-07	3,23E-07
MOGGIO UDINESE DX A23	0	2	1601	2988	11951	19134063	0,34	2	A23	0	1,43	0,94	325	0	1	0	0	9	-	-	3,22E-07	3,22E-07
PAGONIA DX A23	0	2	992	2933	11731	11637112	0,35	2	A23	0	1,67	0,00	746	0	1	0	3	5	-	1,77E-07	2,94E-07	4,71E-07
PIETRATAGLIATA DX A23	0	2	1322	2988	11951	15799645	0,34	2	A23	0	1,00	0,23	545	0	1	1	3	7	4,34E-08	1,3E-07	3,03E-07	4,34E-07
PONTEBBA DX A23	0	2	2276	2988	11951	27201204	0,34	2	A23	0	0,10	1,23	572	0	1	1	2	12	2,52E-08	5,04E-08	3,02E-07	3,53E-07
RACCOLANA DX A23	0	2	1398	2988	11951	16707945	0,34	2	A23	0	1,42	2,07	427	0	1	0	5	10	-	2,05E-07	4,1E-07	6,15E-07
SAN ANTONIO DX A23	0	2	1303	2933	11731	15285441	0,35	2	A23	0	1,00	1,69	678	0	1	1	1	4	4,48E-08	4,48E-08	1,79E-07	2,24E-07
SPARTIACQUE DX A23	0	2	1784	2933	11731	20928033	0,35	2	A23	0	1,43	1,35	816	0	1	1	4	6	3,27E-08	1,31E-07	1,96E-07	3,27E-07
ZANNIER DX A23	0	2	1454	2988	11951	17377219	0,34	2	A23	0	2,00	2,41	388	0	1	0	0	4	-	-	1,58E-07	1,58E-07
Lunghezza totale	20047	20964																				
TGM medio (ponderato)	12413																					
tasso di incendio medio	2,31E-08																					
tasso di incidente grave medio	1,08E-07																					
tasso di incidente lieve medio	4,23E-07																					
caso incendio	6																					

Tabella 81: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A23

A26																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em (0=no;1=si)	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo (0=no; 1=esterno;2=interno)	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
ANZEMA DX A26	0	2	843	7196	43177	36397899	0,23	3 A26		0	2,22	1,30	367	0	1	1	4	30	1,88E-08	7,53E-08	5,65E-07	6,40E-07
BERTE' DX A26	0	2	887	7611	45663	40503480	0,22	3 A26		0	2,50	2,93	419	0	1	3	7	32	5,07E-08	1,18E-07	5,41E-07	6,60E-07
BOSCAROLA DX A26	0	2	570	4729	18915	10781732	0,16	2 A26		1	1,00	2,63	310	0	1	0	0	1	-	-	6,35E-08	6,35E-08
CIUTTI DX	0	2	542	7196	43177	23401733	0,23	3 A26		0	0,10	1,48	241	0	1	0	0	13	-	-	3,8E-07	3,80E-07
MONACCHI DX	0	2	924	7611	45663	42193028	0,22	3 A26		0	2,00	4,55	197	0	1	3	11	31	4,87E-08	1,79E-07	5,03E-07	6,82E-07
MANFREIDA DX A26	0	2	663	7611	45663	30274867	0,22	3 A26		0	2,00	4,37	143	0	1	2	17	22	4,52E-08	3,85E-07	4,98E-07	8,82E-07
MASSIMO RISSO DX A26	0	2	981	7611	45663	44795844	0,22	3 A26		0	0,86	3,87	326	0	1	2	10	28	3,06E-08	1,53E-07	4,28E-07	5,81E-07
MASSIMO VISCONTI DX A26	0	2	2776	4154	16617	46129902	0,17	2 A26		0	0,40	0,61	416	0	1	0	8	11	-	1,19E-07	1,63E-07	2,82E-07
MONTA' DX A26	0	2	748	7196	43177	32296119	0,23	3 A26		0	0,23	2,01	330	0	1	0	3	26	-	6,36E-08	5,51E-07	6,15E-07
MOTTARONE I DX A26	0	2	1277	4154	16617	21220420	0,17	2 A26		0	0,10	2,43	375	0	1	0	7	11	-	2,26E-07	3,55E-07	5,81E-07
MOTTARONE II DX A26	0	2	1790	4154	16617	29745146	0,17	2 A26		0	0,94	0,95	333	0	1	2	5	10	4,61E-08	1,15E-07	2,3E-07	3,45E-07
MOTTA VINEA DX	0	2	1851	4154	16617	30758807	0,17	2 A26		0	2,00	2,22	435	0	1	0	8	14	-	1,78E-07	3,12E-07	4,90E-07
OLIMPIA DX A26	0	2	880	3727	22364	19680646	0,22	3 A26		0	1,21	0,68	165	0	1	1	4	10	3,48E-08	1,39E-07	3,48E-07	4,87E-07
ROCCADARME DX A26	0	2	524	7196	43177	22624554	0,23	3 A26		0	1,43	4,58	297	0	1	2	7	17	6,05E-08	2,12E-07	5,15E-07	7,27E-07
SANT'IGINO unica A26	0	2	691	2832	11329	7828201	0,08	2 A26		0	1,00	-3,76	316	0	1	0	0	4	-	-	3,5E-07	3,50E-07
STRESA II DX A26	0	2	583	4154	16617	9687944	0,17	2 A26		0	1,25	0,86	392	0	1	0	0	5	-	-	3,53E-07	3,53E-07
TURCHINO DX A26	0	2	961	7611	45663	43882575	0,22	3 A26		0	1,21	1,98	422	0	1	0	16	28	-	2,5E-07	4,37E-07	6,87E-07
VALSESIA DX	0	2	665	4152	16610	11045544	0,18	2 A26		0	0,50	1,80	272	0	1	0	1	2	-	6,2E-08	1,24E-07	1,86E-07
Lunghezza totale	18156	23975,5																				
TGM medio (ponderato)	27718																					
tasso di incendio medio	2,41E-08																					
tasso di incidente grave medio	1,63E-07																					
tasso di incidente lieve medio	4,44E-07																					
casi incendio	16																					

Tabella 83: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A26

A30																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no;1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
PIAZZA DEL GALDO DX A30	0	2	692	3407	20444	14147566	0,11	3 A30		0	1,67	1,01	125	0	1	1	3	11	4,84E-08	1,45E-07	5,33E-07	6,78E-07
SANTA MARIA A CASTELLO DX A30	0	2	910	6968	41805	38042605	0,21	3 A30		0	0,10	2,86	51	0	1	2	2	12	3,6E-08	3,6E-08	2,16E-07	2,52E-07
SANT'ANIELLO DX A30	0	2	627	6689	40135	25164789	0,21	3 A30		0	2,00	0,32	117	0	1	0	5	22	-	1,36E-07	5,99E-07	7,35E-07
Lunghezza totale	2229	2318,5																				
TGM medio (ponderato)	34704																					
tasso di incendio medio	3,73E-08																					
tasso di incidente grave medio	1,24E-07																					
tasso di incidente lieve medio	5,59E-07																					
casì incendio	3																					

Tabella 84: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A30

A32																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo [0=no;1=esterno;2=interno]	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
PEROSA SAL	0	1	1062	6880	13759	14612058	0,26	2 A32		0	1,22	3,30	338	2	1	0	5	10	-	1,17E-07	2,34E-07	3,52E-07
PEROSA DIS	0	1	1063	6880	13759	14625817	0,26	2 A32		0	1,22	-3,29	338	2	1	0	6	7	-	1,4E-07	1,64E-07	3,04E-07
PRAPONTIN SAL	0	1	4320	2887	5773	24939360	0,26	2 A32		0	0,63	0,53	458	0	1	1	8	10	1,37E-08	1,1E-07	1,37E-07	2,47E-07
PRAPONTIN DIS	0	1	4403	2887	5773	25418519	0,26	2 A32		0	0,63	-0,52	458	0	1	0	2	13	-	2,69E-08	1,75E-07	2,02E-07
MOMPANTERO SAL	0	1	1051	2307	4613	4848263	0,30	2 A32		0	1,67	1,14	501	0	1	0	0	1	-	-	7,06E-08	7,06E-08
MOMPANTERO DIS	0	1	958	2307	4613	4419254	0,30	2 A32		0	1,67	-1,25	501	0	1	0	1	3	-	7,75E-08	2,32E-07	3,10E-07
GIAGLIONE SAL	0	1	2514	2307	4613	11597082	0,30	2 A32		0	1,66	1,07	673	0	1	1	0	2	2,95E-08	-	5,91E-08	5,91E-08
GIAGLIONE DIS	0	1	2480	2307	4613	11440240	0,30	2 A32		0	1,66	-1,09	673	0	1	0	0	8	-	-	2,39E-07	2,39E-07
RAMATS SAL	0	1	1412	2307	4613	6513556	0,30	2 A32		0	2,03	3,90	745	0	1	0	1	5	-	5,26E-08	2,63E-07	3,15E-07
RAMATS DIS	0	1	1350	2307	4613	6227550	0,30	2 A32		0	2,03	-4,07	745	0	1	0	0	9	-	-	4,95E-07	4,95E-07
CELS SAL	0	1	5241	2307	4613	24176733	0,30	2 A32		0	0,78	2,80	903	0	1	3	3	17	4,25E-08	4,25E-08	2,41E-07	2,83E-07
CELS DIS	0	1	5138	2307	4613	23701594	0,30	2 A32		0	0,78	-2,86	903	0	1	0	6	5	-	8,67E-08	7,22E-08	1,59E-07
SERRE LA VOUTE SAL	0	1	1518	2307	4613	7002534	0,30	2 A32		0	0,94	2,11	1003	0	1	0	1	1	-	4,89E-08	4,89E-08	9,78E-08
SERRE LA VOUTE DIS	0	1	1420	2307	4613	6550460	0,30	2 A32		0	0,94	-2,25	1003	0	1	0	2	3	-	1,05E-07	1,57E-07	2,61E-07
Lunghezza totale	33930	34276																				
TGM medio (ponderato)	5484																					
tasso di incendio medio	2,66E-08																					
tasso di incidente grave medio	1,86E-07																					
tasso di incidente lieve medio	5E-07																					
casì incendio	5																					

Tabella 85: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A32

A5																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLunghezza	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em [0=no;1=si]	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo (0=no; 1=esterno;2=interno)	Barriere dicot	Incendi	Incid_8	Incid_1	tasso_incendi	tasso_incid_8	tasso_incid_1	tasso_incid_tutti
LES CRETES DX	0	2	1523	2016	8062	12278426	0,21	2	A5	0	0,71	1,12	611	0	1	0	0	3	-	-	1,67E-07	1,67E-07
VILLENEUVE DX	0	2	3206	1927	7707	24708642	0,25	2	A5	0	0,67	2,21	672	0	1	0	0	3	-	-	8,32E-08	8,32E-08
ARVIER DX	0	2	2428	1927	7707	18712596	0,25	2	A5	0	0,37	2,35	759	0	1	0	0	9	-	-	3,29E-07	3,29E-07
LEVEROGNE DX	0	2	1912	1927	7707	14735784	0,25	2	A5	0	0,50	0,94	783	0	1	0	0	5	-	-	2,32E-07	2,32E-07
QUASSOLO AO	0	2	547	4842	19368	10594296	0,19	2	A5	0	0,10	1,65	283	0	1	0	2	6	-	1,29E-07	3,88E-07	5,17E-07
AVISE DX	0	2	3112	1927	7707	23984184	0,25	2	A5	0	1,25	1,70	802	0	1	0	1	5	-	2,86E-08	1,43E-07	1,71E-07
VILLARET DX	0	2	2786	1927	7707	21471702	0,25	2	A5	0	0,91	1,58	862	0	1	1	0	2	3,19E-08	-	6,38E-08	6,38E-08
CHABODEY DX	0	2	925	1927	7707	7128975	0,25	2	A5	0	2,22	2,59	897	0	1	0	2	3	-	1,92E-07	2,88E-07	4,80E-07
MORGEX DX	0	2	2294	1509	6035	13844290	0,27	2	A5	0	0,91	2,35	973	0	1	0	1	2	-	4,95E-08	9,89E-08	1,48E-07
PRE' ST DIDIER DX	0	2	3254	1509	6035	19637890	0,27	2	A5	0	0,71	2,86	1088	0	1	0	1	6	-	3,49E-08	2,09E-07	2,44E-07
DOLONNE DX	0	2	2981	905	3620	10791220	0,32	2	A5	0	2,22	1,78	1239	0	1	0	0	1	-	-	6,35E-08	6,35E-08
COTE DE SORRELEY doppio senso	1	1	4725	1318	2636	12455100	0,07	2	A5	0	0,91	2,69	607	0	1	0	2	1	-	1,1E-07	5,5E-08	1,65E-07
SIGNAYES doppio senso	1	1	2044	1318	2636	5387984	0,07	2	A5	0	2,50	4,01	728	0	1	0	1	0	-	1,27E-07	-	1,27E-07
HONE N	0	2	711	4375	17498	12441078	0,20	2	A5	0	2,50	1,55	351	0	1	0	6	11	-	3,3E-07	6,06E-07	9,36E-07
MONTJOVET N	0	2	1339	4204	16815	22515285	0,21	2	A5	0	0,91	1,12	420	0	1	0	3	8	-	9,13E-08	2,43E-07	3,35E-07
PETIT MONDE S	0	2	600	2083	8331	4998600	0,10	2	A5	0	1,43	0,83	432	0	1	0	0	5	-	-	6,85E-07	6,85E-07
Lunghezza totale	34387	37187																				
TGM medio (ponderato)	6854																					
tasso di incendio medio	3,92E-09																					
tasso di incidente grave medio	7,45E-08																					
tasso di incidente lieve medio	2,75E-07																					
casi incendio	1																					

Tabella 86: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A5

A6																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em (0=no;1=si)	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo (0=no; 1=esterno;2=interno)	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
MONTEZEMOLO SUD unica	0	1	1873	3846	7692	14407116	0,18	2 A6		0	0,67	-0,43	608	0	1	0	1	3 -	4,75E-08	1,43E-07	1,90E-07	
PAGLIERA SUD unica	0	1	560	5039	10078	5643680	0,17	2 A6		1	0,10	-2,50	278	0	1	0	2	4 -	2,43E-07	4,85E-07	7,28E-07	
PASSEGGI II NORD unica	0	1	972	5245	10490	10196280	0,17	2 A6		1	3,33	2,57	117	0	1	0	3	2 -	2,02E-07	1,34E-07	3,36E-07	
BRICCO NORD unica	0	1	1665	5245	10490	17465850	0,17	2 A6		1	3,33	0,42	404	0	1	0	4	9 -	1,57E-07	3,53E-07	5,10E-07	
Lunghezza totale	5070	8513																				
TGM medio (ponderato)	9411																					
tasso di incendio medio	0,00E+00																					
tasso di incidente grave medio	1,25E-07																					
tasso di incidente lieve medio	2,25E-07																					
casi incendio	0																					

Tabella 87: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A6

A7																						
Denominazione	Galleria a doppio senso	Canne [n]	L [m]	TGM_corsia [veic/g*corsia]	TGM_strada	TGM_stradaxLungh	Pesanti [%]	Corsie [n]	Strada [codice]	Corsia Em (0=no;1=si)	Indice curv_max [1/R*1000]	Pendenza [%]	Quota [m]	Svincolo (0=no; 1=esterno;2=interno)	Barriere dicot	Incendi	Incid_g	Incid_l	tasso_incendi	tasso_incid_g	tasso_incid_l	tasso_incid_tutti
BOCCARDO unica A07	0	1	1112	6393	12786	14217765	0,23	2 A7		0	2,00	-0,99	362	0	1	1	1	15	4,82E-08	4,82E-08	7,23E-07	7,71E-07
BRASILE unica A7	0	1	723	12851	25702	18582185	0,18	2 A7		0	0,10	0,41	68	1	1	0	1	7 -	3,69E-08	2,58E-07	2,95E-07	
CAMPORA DX A07	0	2	509	3761	15044	7657253	0,10	2 A7		0	0,10	1,38	345	0	1	0	0	1 -	-	8,94E-08	8,94E-08	
GABBIA unica A07	0	1	1162	6214	12429	14442266	0,23	2 A7		0	3,33	-0,95	283	0	1	0	2	1 -	9,49E-08	4,74E-08	1,42E-07	
GIOVI DX A07	0	2	1345	7677	30707	41301265	0,20	2 A7		0	0,10	-1,78	411	1	1	1	7	24	1,66E-08	1,16E-07	3,98E-07	5,14E-07
MONREALE unica A07	0	1	957	6281	12562	12022102	0,23	2 A7		0	1,33	-0,21	334	0	1	0	1	3 -	5,7E-08	1,71E-07	2,28E-07	
MONTE GALLETTO unica A07	0	1	614	12851	25702	15780721	0,18	2 A7		0	0,10	0,00	70	1	1	0	2	9 -	8,68E-08	3,91E-07	4,77E-07	
PRODONNO unica A07	0	1	805	6214	12429	10005184	0,23	2 A7		0	3,33	-1,37	304	0	1	0	0	5 -	-	3,42E-07	3,42E-07	
S. BARTOLOMEO unica	0	1	569	15402	30804	17527408	0,13	2 A7		0	4,00	1,05	60	1	1	0	10	12 -	3,91E-07	4,69E-07	8,60E-07	
Lunghezza totale	7796																					
TGM medio (ponderato)	19438																					
tasso di incendio medio	1,32E-08																					
tasso di incidente grave medio	1,58E-07																					
tasso di incidente lieve medio	5,08E-07																					
casi incendio	2																					

Tabella 88: valore specifico del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tratta A7

media tassi per tronco		osservati		
tronchi	gallerie	media tasso incendio	media tasso incid_g	media tasso incid_l
A1	10	2,21E-08	1,33E-07	2,42E-07
A3	10	1,57E-09	2,03E-08	6,32E-08
A4	2	0,00E+00	6,47E-08	2,33E-07
A5	15	2,13E-09	6,43E-08	2,18E-07
A6	4	0,00E+00	1,62E-07	2,79E-07
A7	9	7,20E-09	9,23E-08	3,21E-07
A10	14	2,48E-09	2,56E-07	4,78E-07
A12	31	6,08E-09	1,30E-07	2,22E-07
A14	17	1,29E-08	1,44E-07	3,08E-07
A15	5	3,44E-09	8,21E-08	2,46E-07
A16	2	7,63E-08	6,73E-08	2,20E-07
A22	2	0,00E+00	1,17E-07	4,67E-07
A23	13	1,91E-08	8,25E-08	3,14E-07
A24	16	3,78E-08	1,15E-07	6,71E-07
A26	18	1,86E-08	1,26E-07	3,73E-07
A29 dir	1	0,00E+00	1,68E-07	1,01E-07
A30	3	2,81E-08	1,06E-07	4,49E-07
A32	14	6,13E-09	5,77E-08	1,85E-07
Fiori	19	7,99E-10	1,35E-07	2,33E-07
media complessiva	teorico	1,13E-08	1,17E-07	3,03E-07
totale	205			

Tabella 89: sinottico riassuntivo del tasso di incidenti gravi, lievi e di incendi – tutte le tratte

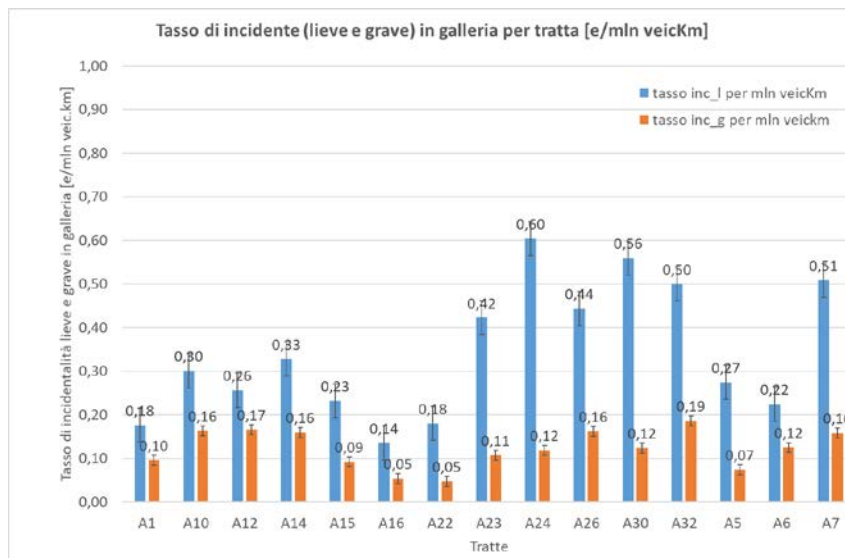


Figura 144: sinottico riassuntivo del tasso di incidente grave e lieve– tutte le tratte

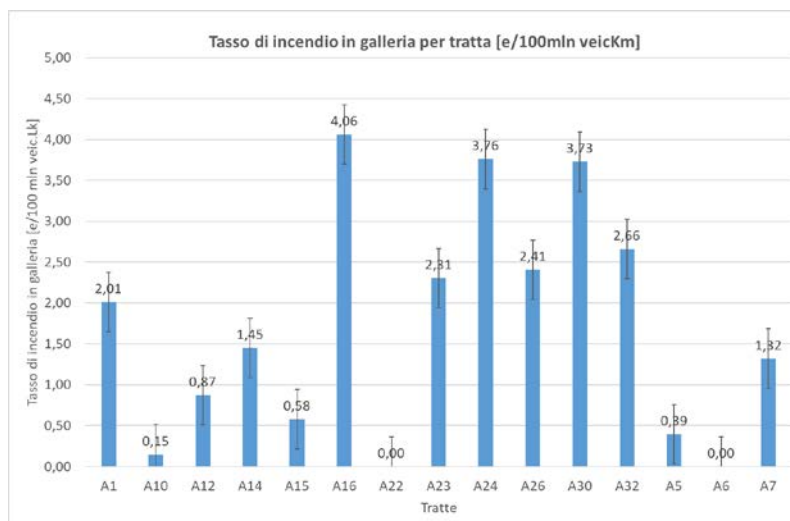


Figura 145: sinottico riassuntivo del tasso di incendio – tutte le tratte

I valori così ottenuti sono perfettamente in linea con la bibliografia disponibile.

A4.4 Analisi statistica dei campioni

Considerata la rilevante numerosità e la buona omogeneità del sottocampione estratto, al fine di verificare nel caso i costrutti di correlazione e regressione (qualitativa) consolidati nella bibliografia, si è proceduta ad integrare i dati disponibili con altri direttamente reperiti, costituiti da TGM (per corsia e per intera carreggiata), pendenza media, quota media, numero di corsie, presenza di corsia d'emergenza e % pesanti.

Il campione così completato è stato sottoposto ad analisi statistica esplorativa, verificando:

con approccio non normalizzato:

- correlazione tra eventi (incidente e incendio), TGM, lunghezza, pendenza, numero di corsie, presenza di corsia di emergenza, % pesanti;
- esplorazione dell'ipotesi di regressione lineare tra INCID (indipendente) e generative, al principale scopo di verificare la sostenibilità della significatività delle correlazioni verificate singolarmente in un disegno multiplo, e allo scopo di verificare la percentuale di varianza spiegata dal costrutto significativo risultante;
- esplorazione dell'ipotesi di regressione lineare tra INCENDI (indipendente) e generative, al principale scopo di verificare la sostenibilità della significatività delle correlazioni verificate singolarmente in un disegno multiplo, e allo scopo di verificare la percentuale di varianza spiegata dal costrutto significativo risultante.

con approccio normalizzato:

- correlazione tra tasso di incendio, TGM, lunghezza, pendenza, numero di corsie, presenza di corsia di emergenza, % pesanti;
- ipotesi di regressione tra TINCENDIO (indipendente) e generative, con lo stesso significato delle elaborazioni su eventi già descritte.

Si presentano nelle sezioni successive i risultati ottenuti per i sottocampioni descritti.

A4.4.1 Analisi degli incidenti lievi

Analisi di correlazione – costrutto di Pearson

		Canne	L	TGM_corsia	TGM_sezione	Esposizione	Pesanti	Corsie	Corsia_Em	curv_max	Pendenza	Quota	Svincolo	Barriere	Incidenti_lievi
Canne	Correlazione di Pearson	1	-,080	,004	,396(**)	,369(**)	,087	,066	-,148(*)	-,231(**)	,508(**)	-,021	-,274(**)	-,038	,277(**)
	Sig. (2-code)		,264	,953	,000	,000	,228	,360	,038	,001	,000	,774	,000	,596	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
L	Correlazione di Pearson	-,080	1	-,352(**)	-,309(**)	,340(**)	,083	-,124	-,065	-,112	-,013	,496(**)	-,054	-,022	,232(**)
	Sig. (2-code)	,264		,000	,000	,000	,249	,084	,369	,120	,859	,000	,455	,756	,001
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
TGM_corsia	Correlazione di Pearson	,004	-,352(**)	1	,815(**)	,483(**)	-,247(**)	,029	,058	,138	-,102	-,619(**)	,207(**)	,005	,364(**)
	Sig. (2-code)	,953	,000		,000	,000	,000	,690	,420	,054	,157	,000	,004	,940	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
TGM_sezione	Correlazione di Pearson	,396(**)	-,309(**)	,815(**)	1	,655(**)	-,116	,376(**)	,080	-,047	,185(**)	-,523(**)	-,039	-,001	,542(**)
	Sig. (2-code)	,000	,000	,000		,000	,108	,000	,263	,514	,009	,000	,586	,987	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Esposizione	Correlazione di Pearson	,369(**)	,340(**)	,483(**)	,655(**)	1	-,098	,192(**)	-,042	-,165(*)	,118	-,200(**)	-,091	-,051	,689(**)
	Sig. (2-code)	,000	,000	,000	,000		,173	,007	,561	,021	,101	,005	,207	,479	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Pesanti	Correlazione di Pearson	,087	,083	-,247(**)	-,116	-,098	1	,056	-,083	-,038	,051	,354(**)	-,090	-,010	-,142(*)
	Sig. (2-code)	,228	,249	,000	,108	,173		,436	,250	,602	,477	,000	,210	,895	,047
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Corsie	Correlazione di Pearson	,066	-,124	,029	,376(**)	,192(**)	,056	1	,041	-,163(*)	,157(*)	-,156(*)	-,180(*)	,023	,286(**)
	Sig. (2-code)	,360	,084	,690	,000	,007	,436		,572	,023	,029	,030	,012	,746	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Corsia_Em	Correlazione di Pearson	-,148(*)	-,065	,058	,080	-,042	-,083	,041	1	,135	-,029	-,050	-,041	,012	-,040
	Sig. (2-code)	,038	,369	,420	,263	,561	,250	,572		,061	,687	,491	,567	,872	,581
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
curv_max	Correlazione di Pearson	-,231(**)	-,112	,138	-,047	-,165(*)	-,038	-,163(*)	,135	1	-,086	-,046	,167(*)	,067	-,047
	Sig. (2-code)	,001	,120	,054	,514	,021	,602	,023	,061		,232	,519	,019	,355	,516
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Pendenza	Correlazione di Pearson	,508(**)	-,013	-,102	,185(**)	,118	,051	,157(*)	-,029	-,086	1	,100	-,188(**)	-,141(*)	,166(*)
	Sig. (2-code)	,000	,859	,157	,009	,101	,477	,029	,687	,232		,165	,008	,049	,021
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Quota	Correlazione di Pearson	-,021	,496(**)	-,619(**)	-,523(**)	-,200(**)	,354(**)	-,156(*)	-,050	-,046	,100	1	-,093	,031	-,114
	Sig. (2-code)	,774	,000	,000	,000	,005	,000	,030	,491	,519	,165		,194	,669	,113
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Svincolo	Correlazione di Pearson	-,274(**)	-,054	,207(**)	-,039	-,091	-,090	-,180(*)	-,041	,167(*)	-,188(**)	-,093	1	,018	-,019
	Sig. (2-code)	,000	,455	,004	,586	,207	,210	,012	,567	,019	,008	,194		,800	,796
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Barriere	Correlazione di Pearson	-,038	-,022	,005	-,001	-,051	-,010	,023	,012	,067	-,141(*)	,031	,018	1	,042
	Sig. (2-code)	,596	,756	,940	,987	,479	,895	,746	,872	,355	,049	,669	,800		,557
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Incidenti_lievi	Correlazione di Pearson	,277(**)	,232(**)	,364(**)	,542(**)	,689(**)	-,142(*)	,286(**)	-,040	-,047	,166(*)	-,114	-,019	,042	1
	Sig. (2-code)	,000	,001	,000	,000	,000	,047	,000	,581	,516	,021	,113	,796	,557	
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195

** La correlazione è significativa al livello 0,01 (2-code).

* La correlazione è significativa al livello 0,05 (2-code).

Regressione multipla

Variabili inserite/rimosse(b)

Modello	Variabili inserite	Variabili rimosse	Metodo
1	Pendenza, Corsia_Em, Pesanti, curv_max, Esposizione, Corsie, TGM_corsia(a)	.	Per blocchi

a Tutte le variabili richieste sono state inserite

b Variabile dipendente: Incidenti_lievi

Riepilogo del modello(b)

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Errore std. della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Sig. variazione di F	Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	
1	,722(a)	,521	,503	6,573	,521	29,096	7	187	,000	1,741

a Stimatori: (Costante), Pendenza, Corsia_Em, Pesanti, curv_max, Esposizione, Corsie, TGM_corsia

b Variabile dipendente: Incidenti_lievi

ANOVA(b)

Modello		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
1	Regressione	8800,572	7	1257,225	29,096	,000(a)
	Residuo	8080,116	187	43,209		
	Totale	16880,687	194			

a Stimatori: (Costante), Pendenza, Corsia_Em, Pesanti, curv_max, Esposizione, Corsie, TGM_corsia

b Variabile dipendente: Incidenti_lievi

Coefficienti(a)

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	Sig.
		B	Errore std.	Beta		
1	(Costante)	-5,990	3,515		-1,704	,090
	TGM_corsia	6,86E-005	,000	,026	,425	,671
	Esposizione	,000	,000	,639	10,358	,000
	Pesanti	-11,787	7,137	-,087	-1,652	,100
	Corsie	4,622	1,413	,173	3,271	,001
	Corsia_Em	-2,291	3,028	-,039	-,757	,450
	curv_max	,931	,545	,092	1,707	,089
	Pendenza	,470	,318	,077	1,478	,141

a Variabile dipendente: Incidenti_lievi

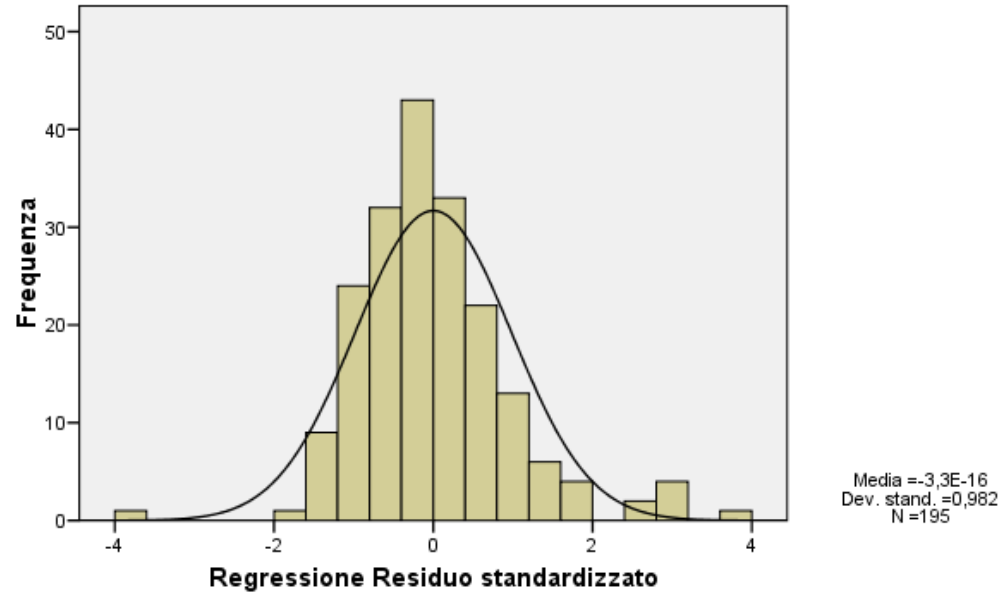
Statistiche dei residui(a)

	Minimo	Massimo	Media	Deviazione std.	N
Valore atteso	-,07	40,94	11,48	6,735	195
Residuo	-24,938	25,983	,000	6,454	195
Valore atteso std.	-1,715	4,373	,000	1,000	195
Residuo std.	-3,794	3,953	,000	,982	195

a Variabile dipendente: Incidenti_lievi

Istogramma

Variabile dipendente: Incidenti_lievi



A4.4.2 Analisi degli incidenti gravi

Correlazioni

		Canne	L	TGM_corsia	TGM_sezione	Esposizione	Pesanti	Corsie	Corsia_Em	curv_max	Pendenza	Quota	Svincolo	Barriere	Incidenti_gravi
Canne	Correlazione di Pearson	1	-,080	,004	,396(**)	,369(**)	,087	,066	-,148(*)	-,231(**)	,508(**)	-,021	-,274(**)	-,038	,175(*)
	Sig. (2-code)		,264	,953	,000	,000	,228	,360	,038	,001	,000	,774	,000	,596	,014
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
L	Correlazione di Pearson	-,080	1	-,352(**)	-,309(**)	,340(**)	,083	-,124	-,065	-,112	-,013	,496(**)	-,054	-,022	-,007
	Sig. (2-code)	,264		,000	,000	,000	,249	,084	,369	,120	,859	,000	,455	,756	,918
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
TGM_corsia	Correlazione di Pearson	,004	-,352(**)	1	,815(**)	,483(**)	-,247(**)	,029	,058	,138	-,102	-,619(**)	,207(**)	,005	,619(**)
	Sig. (2-code)	,953	,000		,000	,000	,000	,690	,420	,054	,157	,000	,004	,940	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
TGM_sezione	Correlazione di Pearson	,396(**)	-,309(**)	,815(**)	1	,655(**)	-,116	,376(**)	,080	-,047	,185(**)	-,523(**)	-,039	-,001	,710(**)
	Sig. (2-code)	,000	,000	,000		,000	,108	,000	,263	,514	,009	,000	,586	,987	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Esposizione	Correlazione di Pearson	,369(**)	,340(**)	,483(**)	,655(**)	1	-,098	,192(**)	-,042	-,165(*)	,118	-,200(**)	-,091	-,051	,633(**)
	Sig. (2-code)	,000	,000	,000	,000		,173	,007	,561	,021	,101	,005	,207	,479	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Pesanti	Correlazione di Pearson	,087	,083	-,247(**)	-,116	-,098	1	,056	-,083	-,038	,051	,354(**)	-,090	-,010	-,206(**)
	Sig. (2-code)	,228	,249	,000	,108	,173		,436	,250	,602	,477	,000	,210	,895	,004
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Corsie	Correlazione di Pearson	,066	-,124	,029	,376(**)	,192(**)	,056	1	,041	-,163(*)	,157(*)	-,156(*)	-,180(*)	,023	,170(*)
	Sig. (2-code)	,360	,084	,690	,000	,007	,436		,572	,023	,029	,030	,012	,746	,018
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Corsia_Em	Correlazione di Pearson	-,148(*)	-,065	,058	,080	-,042	-,083	,041	1	,135	-,029	-,050	-,041	,012	,139
	Sig. (2-code)	,038	,369	,420	,263	,561	,250	,572		,061	,687	,491	,567	,872	,053
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
curv_max	Correlazione di Pearson	-,231(**)	-,112	,138	-,047	-,165(*)	-,038	-,163(*)	,135	1	-,086	-,046	,167(*)	,067	,050
	Sig. (2-code)	,001	,120	,054	,514	,021	,602	,023	,061		,232	,519	,019	,355	,486
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Pendenza	Correlazione di Pearson	,508(**)	-,013	-,102	,185(**)	,118	,051	,157(*)	-,029	-,086	1	,100	-,188(**)	-,141(*)	,127
	Sig. (2-code)	,000	,859	,157	,009	,101	,477	,029	,687	,232		,165	,008	,049	,076
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Quota	Correlazione di Pearson	-,021	,496(**)	-,619(**)	-,523(**)	-,200(**)	,354(**)	-,156(*)	-,050	-,046	,100	1	-,093	,031	-,340(**)
	Sig. (2-code)	,774	,000	,000	,000	,005	,030	,491	,519	,165		,194	,669	,000	,000
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Svincolo	Correlazione di Pearson	-,274(**)	-,054	,207(**)	-,039	-,091	-,090	-,180(*)	-,041	,167(*)	-,188(**)	-,093	1	,018	-,013
	Sig. (2-code)	,000	,455	,004	,586	,207	,210	,012	,567	,019	,008	,194		,800	,858
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Barriere	Correlazione di Pearson	-,038	-,022	,005	-,001	-,051	-,010	,023	,012	,067	-,141(*)	,031	,018	1	-,067
	Sig. (2-code)	,596	,756	,940	,987	,479	,895	,746	,872	,355	,049	,669	,800		,354
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
Incidenti_gravi	Correlazione di Pearson	,175(*)	-,007	,619(**)	,710(**)	,633(**)	-,206(**)	,170(*)	,139	,050	,127	-,340(**)	-,013	-,067	1
	Sig. (2-code)	,014	,918	,000	,000	,000	,004	,018	,053	,486	,076	,000	,858	,354	
	N	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195

** La correlazione è significativa al livello 0,01 (2-code).

* La correlazione è significativa al livello 0,05 (2-code).

Regressione

Variabili inserite/rimosse(b)

Modello	Variabili inserite	Variabili rimosse	Metodo
1	Pendenza, Corsia_Em, Pesanti, curv_max, Esposizione, Corsie, TGM_corsia(a)	.	Per blocchi

a Tutte le variabili richieste sono state inserite

b Variabile dipendente: Incidenti_gravi

Riepilogo del modello(b)

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Errore std. della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Sig. variazione di F	Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	
1	,757(a)	,572	,556	3,590	,572	35,772	7	187	,000	1,847

a Stimatori: (Costante), Pendenza, Corsia_Em, Pesanti, curv_max, Esposizione, Corsie, TGM_corsia

b Variabile dipendente: Incidenti_gravi

ANOVA(b)

Modello		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
1	Regressione	3227,044	7	461,006	35,772	,000(a)
	Residuo	2409,951	187	12,887		

Totale	5636,995	194			
--------	----------	-----	--	--	--

a Stimatori: (Costante), Pendenza, Corsia_Em, Pesanti, curv_max, Esposizione, Corsie, TGM_corsia

b Variabile dipendente: Incidenti_gravi

Coefficienti(a)

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	Sig.
		B	Errore std.	Beta		
1	(Costante)	-4,205	1,920		-2,191	,030
	TGM_corsia	,001	,000	,390	6,645	,000
	Esposizione	,000	,000	,428	7,336	,000
	Pesanti	-5,087	3,898	-,065	-1,305	,193
	Corsie	1,058	,772	,068	1,371	,172
	Corsia_Em	4,076	1,654	,120	2,465	,015
	curv_max	,409	,298	,070	1,372	,172
	Pendenza	,418	,174	,119	2,407	,017

a Variabile dipendente: Incidenti_gravi

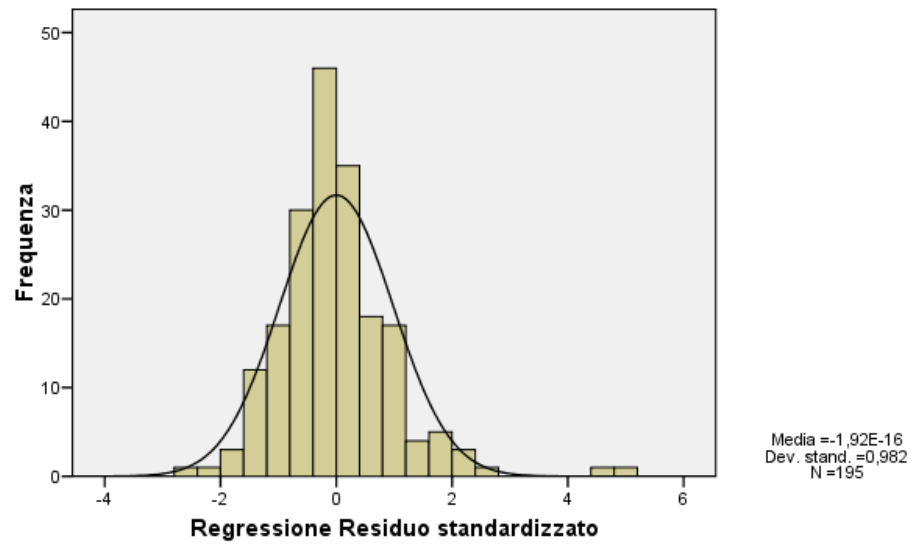
Statistiche dei residui(a)

	Minimo	Massimo	Media	Deviazione std.	N
Valore atteso	-2,41	21,96	5,01	4,079	195
Residuo	-8,647	18,018	,000	3,525	195
Valore atteso std.	-1,818	4,158	,000	1,000	195
Residuo std.	-2,409	5,019	,000	,982	195

a Variabile dipendente: Incidenti_gravi

Grafici

Variabile dipendente: Incidenti_gravi



A4.4.3 Analisi degli incendi

		L	TGM_corsia	TGM_sezione	Esposizione	Pesanti	Corsie	Corsia_Em	curv_max	Pendenza	Quota	Svincolo	Barriere	Incendi
L	Correlazione di Pearson	1	-.273(**)	-.275(**)	.441(**)	-.008	-.129	-.078	-.095	-.102	.445(**)	.060	-.031	.335(**)
	Sig. (2-code)		.001	.001	.000	.918	.114	.341	.244	.211	.000	.462	.705	.000
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
TGM_corsia	Correlazione di Pearson	-.273(**)	1	.940(**)	.598(**)	-.208(*)	.120	.179(*)	.018	-.071	-.574(**)	.081	.007	.068
	Sig. (2-code)	.001		.000	.000	.010	.140	.027	.829	.383	.000	.318	.933	.405
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
TGM_sezione	Correlazione di Pearson	-.275(**)	.940(**)	1	.608(**)	-.135	.426(**)	.279(**)	.050	.017	-.544(**)	.047	.016	.169(*)
	Sig. (2-code)	.001	.000		.000	.098	.000	.001	.544	.838	.000	.561	.847	.037
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Esposizione	Correlazione di Pearson	.441(**)	.598(**)	.608(**)	1	-.174(*)	.203(*)	.040	-.107	-.133	-.228(**)	.018	-.040	.479(**)
	Sig. (2-code)	.000	.000	.000		.032	.012	.622	.190	.102	.005	.822	.623	.000
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Pesanti	Correlazione di Pearson	-.008	-.208(*)	-.135	-.174(*)	1	.127	-.051	-.011	.033	.267(**)	-.145	-.007	.096
	Sig. (2-code)	.918	.010	.098	.032		.120	.535	.894	.687	.001	.075	.929	.239
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Corsie	Correlazione di Pearson	-.129	.120	.426(**)	.203(*)	.127	1	.131	.079	.243(**)	-.154	-.070	.031	.334(**)
	Sig. (2-code)	.114	.140	.000	.012	.120		.108	.334	.003	.058	.393	.707	.000
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Corsia_Em	Correlazione di Pearson	-.078	.179(*)	.279(**)	.040	-.051	.131	1	.065	.054	-.049	-.021	.009	-.053
	Sig. (2-code)	.341	.027	.001	.622	.535	.108		.429	.506	.550	.795	.909	.517
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
curv_max	Correlazione di Pearson	-.095	.018	.050	-.107	-.011	.079	.065	1	.072	-.018	.071	.080	-.027
	Sig. (2-code)	.244	.829	.544	.190	.894	.334	.429		.377	.825	.385	.330	.744
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Pendenza	Correlazione di Pearson	-.102	-.071	.017	-.133	.033	.243(**)	.054	.072	1	.114	-.124	-.211(**)	-.011
	Sig. (2-code)	.211	.383	.838	.102	.687	.003	.506	.377		.162	.127	.009	.892
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Quota	Correlazione di Pearson	.445(**)	-.574(**)	-.544(**)	-.228(**)	.267(**)	-.154	-.049	-.018	.114	1	-.010	.034	.028
	Sig. (2-code)	.000	.000	.000	.005	.001	.058	.550	.825	.162		.901	.674	.729
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Svincolo	Correlazione di Pearson	.060	.081	.047	.018	-.145	-.070	-.021	.071	-.124	-.010	1	.015	-.002
	Sig. (2-code)	.462	.318	.561	.822	.075	.393	.795	.385	.127	.901		.854	.984
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Barriere	Correlazione di Pearson	-.031	.007	.016	-.040	-.007	.031	.009	.080	-.211(**)	.034	.015	1	.037
	Sig. (2-code)	.705	.933	.847	.623	.929	.707	.909	.330	.009	.674	.854		.648
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Incendi	Correlazione di Pearson	.335(**)	.068	.169(*)	.479(**)	.096	.334(**)	-.053	-.027	-.011	.028	-.002	.037	1
	Sig. (2-code)	.000	.405	.037	.000	.239	.000	.517	.744	.892	.729	.984	.648	
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152

** La correlazione è significativa al livello 0,01 (2-code).

* La correlazione è significativa al livello 0,05 (2-code).

Regressione

Variabili inserite/rimosse(b)

Modello	Variabili inserite	Variabili rimosse	Metodo
1	Corsie, TGM_corsi a, Pesanti, Esposizione e(a)	.	Per blocchi

a Tutte le variabili richieste sono state inserite

b Variabile dipendente: Incendi

Riepilogo del modello(b)

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Errore std. della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Sig. variazione di F	Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	
1	,611(a)	,373	,356	1,073	,373	21,883	4	147	,000	2,233

a Stimatori: (Costante), Corsie, TGM_corsia, Pesanti, Esposizione

b Variabile dipendente: Incendi

ANOVA(b)

Modello		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
1	Regressione	100,807	4	25,202	21,883	,000(a)
	Residuo	169,291	147	1,152		
	Totale	270,099	151			

a Stimatori: (Costante), Corsie, TGM_corsia, Pesanti, Esposizione

b Variabile dipendente: Incendi

Coefficienti(a)

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	Sig.	Statistiche di collinearità	
		B	Errore std.	Beta			B	Errore std.
1	(Costante)	-2,277	,625		-3,645	,000		
	Esposizione	4,20E-005	,000	,644	7,765	,000	,620	1,613
	Pesanti	2,268	1,365	,113	1,661	,099	,926	1,080
	TGM_corsia	,000	,000	-,321	-3,903	,000	,631	1,584
	Corsie	,916	,273	,227	3,358	,001	,931	1,074

a Variabile dipendente: Incendi

Diagnostiche di collinearità(a)

Modello	Dimensione	Autovalore	Indice di collinearità	Variabilità spiegata				
				Pesanti	TGM_corsia	Corsie	(Costante)	Esposizione
1	1	4,534	1,000	,00	,01	,00	,01	,00
	2	,307	3,841	,00	,28	,07	,07	,00
	3	,100	6,725	,00	,68	,03	,79	,00
	4	,047	9,823	,07	,01	,88	,12	,13
	5	,011	19,914	,92	,02	,02	,02	,86

a Variabile dipendente: Incendi

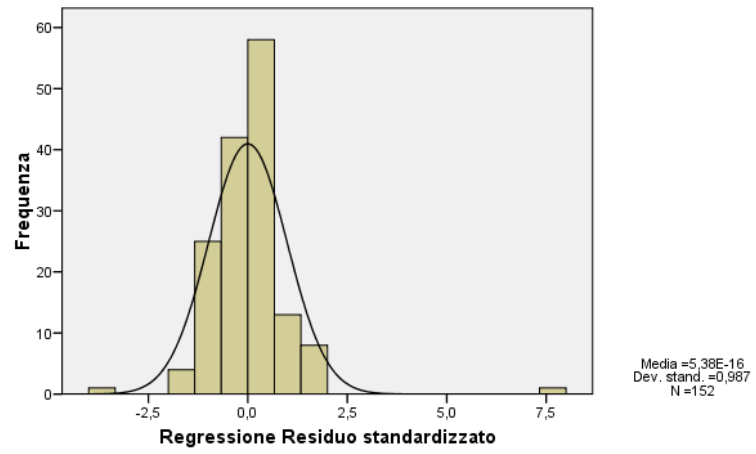
Statistiche dei residui(a)

	Minimo	Massimo	Media	Deviazione std.	N
Valore atteso	-,74	4,90	,61	,817	152
Residuo	-3,712	8,097	,000	1,059	152
Valore atteso std.	-1,660	5,252	,000	1,000	152
Residuo std.	-3,459	7,545	,000	,987	152

a Variabile dipendente: Incendi

Grafici

Variabile dipendente: Incendi



		L	TGM_corsia	TGM_sezione	Esposizione	Pesanti	Corsie	Corsia_Em	curv_max	Pendenza	Quota	Svincolo	Barriere	tasso per 10^-8
L	Correlazione di Pearson	1	-,273(**)	-,275(**)	,441(**)	-,008	-,129	-,078	-,095	-,102	,445(**)	,060	-,031	-,088
	Sig. (2-code)		,001	,001	,000	,918	,114	,341	,244	,211	,000	,462	,705	,519
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
TGM_corsia	Correlazione di Pearson	-,273(**)	1	,940(**)	,598(**)	-,208(*)	,120	,179(*)	,018	-,071	-,574(**)	,081	,007	-,467(**)
	Sig. (2-code)	,001		,000	,000	,010	,140	,027	,829	,383	,000	,318	,933	,000
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
TGM_sezione	Correlazione di Pearson	-,275(**)	,940(**)	1	,608(**)	-,135	,426(**)	,279(**)	,050	,017	-,544(**)	,047	,016	-,395(**)
	Sig. (2-code)	,001	,000		,000	,098	,000	,001	,544	,838	,000	,561	,847	,003
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Esposizione	Correlazione di Pearson	,441(**)	,598(**)	,608(**)	1	-,174(*)	,203(*)	,040	-,107	-,133	-,228(**)	,018	-,040	-,357(**)
	Sig. (2-code)	,000	,000	,000		,032	,012	,622	,190	,102	,005	,822	,623	,007
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Pesanti	Correlazione di Pearson	-,008	-,208(*)	-,135	-,174(*)	1	,127	-,051	-,011	,033	,267(**)	-,145	-,007	,050
	Sig. (2-code)	,918	,010	,098	,032		,120	,535	,894	,687	,001	,075	,929	,716
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Corsie	Correlazione di Pearson	-,129	,120	,426(**)	,203(*)	,127	1	,131	,079	,243(**)	-,154	-,070	,031	,081
	Sig. (2-code)	,114	,140	,000	,012	,120		,108	,334	,003	,058	,393	,707	,552
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Corsia_Em	Correlazione di Pearson	-,078	,179(*)	,279(**)	,040	-,051	,131	1	,065	,054	-,049	-,021	,009	(a)
	Sig. (2-code)	,341	,027	,001	,622	,535	,108		,429	,506	,550	,795	,909	,000
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
curv_max	Correlazione di Pearson	-,095	,018	,050	-,107	-,011	,079	,065	1	,072	-,018	,071	,080	,224
	Sig. (2-code)	,244	,829	,544	,190	,894	,334	,429		,377	,825	,385	,330	,097
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Pendenza	Correlazione di Pearson	-,102	-,071	,017	-,133	,033	,243(**)	,054	,072	1	,114	-,124	-,211(**)	,020
	Sig. (2-code)	,211	,383	,838	,102	,687	,003	,506	,377		,162	,127	,009	,883
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Quota	Correlazione di Pearson	,445(**)	-,574(**)	-,544(**)	-,228(**)	,267(**)	-,154	-,049	-,018	,114	1	-,010	,034	,129
	Sig. (2-code)	,000	,000	,000	,005	,001	,058	,550	,825	,162		,901	,674	,344
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Svincolo	Correlazione di Pearson	,060	,081	,047	,018	-,145	-,070	-,021	,071	-,124	-,010	1	,015	-,071
	Sig. (2-code)	,462	,318	,561	,822	,075	,393	,795	,385	,127	,901		,854	,601
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
Barriere	Correlazione di Pearson	-,031	,007	,016	-,040	-,007	,031	,009	,080	-,211(**)	,034	,015	1	(a)
	Sig. (2-code)	,705	,933	,847	,623	,929	,707	,909	,330	,009	,674	,854		,000
	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	56
tasso per 10^-8	Correlazione di Pearson	-,088	-,467(**)	-,395(**)	-,357(**)	,050	,081	(a)	,224	,020	,129	-,071	(a)	1
	Sig. (2-code)	,519	,000	,003	,007	,716	,552	,000	,097	,883	,344	,601	,000	
	N	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56

** La correlazione è significativa al livello 0,01 (2-code).

* La correlazione è significativa al livello 0,05 (2-code).

Variabili inserite/rimosse(b)

Modello	Variabili inserite	Variabili rimosse	Metodo
1	Pendenza, TGM_sezione(a)	.	Per blocchi

a Tutte le variabili richieste sono state inserite

b Variabile dipendente: tasso per 10⁻⁸

Riepilogo del modello(b)

Modello	R	R-quadrato	R-quadrato corretto	Errore std. della stima	Variazione dell'adattamento					Durbin-Watson
					Sig. variazione di F	Variazione di R-quadrato	Variazione di F	df1	df2	
1	,416(a)	,173	,142	3,6649236	,173	5,544	2	53	,007	1,619

a Stimatori: (Costante), Pendenza, TGM_sezione

b Variabile dipendente: tasso per 10⁻⁸

ANOVA(b)

Modello		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
1	Regressione	148,920	2	74,460	5,544	,007(a)
	Residuo	711,878	53	13,432		
	Totale	860,799	55			

a Stimatori: (Costante), Pendenza, TGM_sezione

b Variabile dipendente: tasso per 10⁻⁸

Coefficienti(a)

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati	t	Sig.
		B	Errore std.	Beta		
1	(Costante)	6,612	1,254		5,271	,000

TGM_sezione	,000	,000	-,431	-3,326	,002
Pendenza	,489	,472	,134	1,036	,305

a Variabile dipendente: tasso per 10⁻⁸

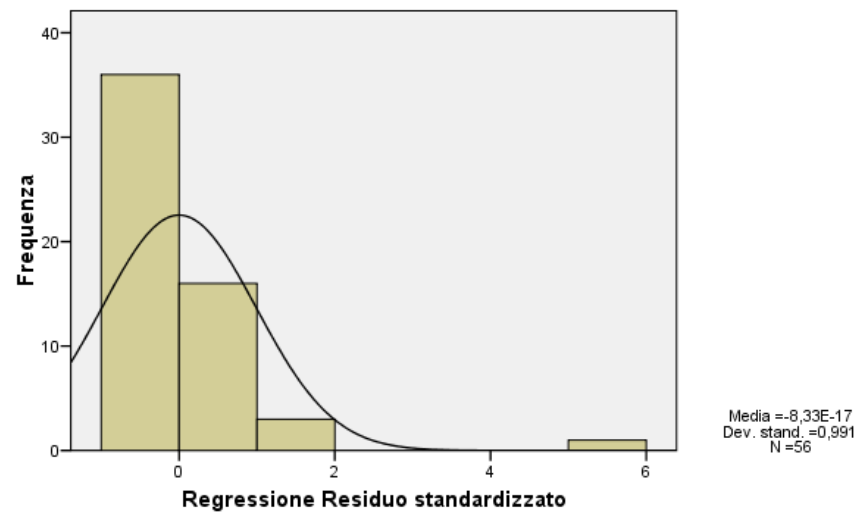
Statistiche dei residui(a)

	Minimo	Massimo	Media	Deviazione std.	N
Valore atteso	,731145	6,735958	3,815643	1,6454918	56
Residuo	-3,7235949	20,7639313	,0000000	3,5976716	56
Valore atteso std.	-1,875	1,775	,000	1,000	56
Residuo std.	-1,016	5,666	,000	,982	56

a Variabile dipendente: tasso per 10⁻⁸

Grafici

Variabile dipendente: tasso per 10⁻⁸



A4.4.4 Commento ai risultati

Il quadro sintetico delle evidenze ottenute è riportato nella tabella sottostante.

Sottocampione	Variabile dipendente	Variabili indipendenti con correlazioni significative verso la variabile dipendente	Variabili indipendenti che sostengono il costruito di regressione multipla	Varianza spiegata
Incidenti Lievi	Eventi di incidenti lievi	Canne, L, TGM_corsia, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza	TGM_corsia, Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza, Corsia Em, curv max	50,30%
Incidenti gravi	Eventi di incidenti gravi	Canne, TGM_corsia, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Quota	TGM_corsia, Esposizione (LxTGM_sez), % Pesanti, Corsie, Pendenza, Corsia Em, curv max	55,60%
Incendi	Eventi di incendio	L, TGM_sezione , Esposizione (LxTGM_sez), Corsie	Esposizione, TGM_corsia, % Pesanti, Corsie	35,60%
Incendi	Tasso di incendio	TGM_corsia , TGM_sezione, Esposizione (LxTGM_sez)	TGM_sezione, <u>Pendenza</u>	14,20%

Legenda: le variabili con correlazione significativa riportate in rosso nella terza colonna non risultano ricomprese nel costruito di regressione della quarta colonna; le variabili sottolineate nella quarta colonna sono risultate significativamente partecipanti al costruito regressivo pur non avendo, singolarmente nei confronti della variabile indipendente, evidenziato significatività accettabile.

Tabella 90: risultati delle analisi di correlazione semplice e regressione multipla applicate al campione Gestori 2006 – 2009

Circa l'analisi relativa ai casi di incidente lieve, le analisi di correlazione hanno evidenziato correlazioni significative (costrutto P di Pearson) con il numero di incidenti (che assumerà nel costruito successivo la qualifica di variabile dipendente) le variabili Canne, L, TGM di corsia, TGM di sezione, Esposizione (ottenuta come prodotto di lunghezza e TGM di sezione), quota pesanti, numero delle corsie e pendenza. Tutte le variabili presentano correlazione positiva, con l'eccezione della quota pesante. Nel costruito regressivo successivamente esplorato, avendo imposto il numero di incidenti lievi quale variabile dipendente, le variabili indipendenti contribuente al modello in modo significativo sono risultate tutte le precedenti con l'eccezione di L e TGM di sezione, e inoltre la variabile booleana corsia di emergenza e la curvatura massima planimetrica. Il costruito regressivo evidenzia una quota di varianza spiegata del 50.3%, la rappresentazione dei resti evidenzia una normalità confortante.

Circa l'analisi dei casi di incidente grave, le analisi di correlazione hanno evidenziato correlazioni significative (costrutto P di Pearson) con il numero di incidenti (che assumerà nel costruito successivo la qualifica di variabile dipendente) le variabili Canne, TGM di corsia, TGM di sezione, Esposizione (ottenuta come prodotto di lunghezza e TGM di sezione), quota pesanti, numero delle corsie e quota. Il gruppo di variabili in correlazione significativa con il numero di incidenti gravi è quindi non troppo dissimile (avendo le due analisi restituito 6 variabili comuni nelle correlazioni significative verificate). Tutte le variabili presentano correlazione positiva, con l'eccezione della quota pesante. Nel costruito regressivo successivamente esplorato, avendo imposto il numero di incidenti gravi quale variabile dipendente, le variabili indipendenti contribuente al modello in modo significativo sono risultate tutte le precedenti con l'eccezione di canne, TGM di sezione e quota; oltre a queste sono risultate partecipanti al modello anche la pendenza, la variabile booleana corsia di emergenza e la curvatura massima planimetrica. Il modello regressivo ricavato per il caso degli incidenti gravi è inoltre risultato identico a quello ricavato per l'incidentalità lieve. Il costruito regressivo evidenzia una quota di varianza spiegata del 55.6%, la rappresentazione dei resti evidenzia una normalità confortante.

Circa le due analisi commentate, si evidenzia che il valore di varianza spiegata ottenuto, che in termini assoluti può essere considerata discreta, in termini relativi, considerando le evidenze bibliografiche, può essere considerata eccellente.

Per quanto riguarda l'analisi condotta sugli eventi di incendio, le analisi di correlazione hanno evidenziato correlazioni significative (costrutto P di Pearson) con il numero di incendi (che assumerà nel costruito successivo la qualifica di variabile dipendente) le variabili L, TGM di sezione, Esposizione (ottenuta come prodotto di lunghezza e TGM di sezione), numero delle corsie. Nel costruito regressivo successivamente esplorato, avendo imposto il numero di incendi quale variabile dipendente, le variabili indipendenti contribuente al modello in modo significativo sono risultate Esposizione, TGM di corsia, quota pesanti numero

di corsie. Il costrutto regressivo evidenzia una quota di varianza spiegata del 35.6%, la rappresentazione dei resti evidenzia una normalità confortante.

Sul caso è stata inoltre condotta anche una analisi con variabile tasso di incendio, al fine di verificare evidenze di correlazioni diverse e nuove, ed esplorare la possibilità di un costrutto regressivo con migliori qualità statistiche. Il risultato ottenuto, riportato per completezza, non è esaltante, e significativamente peggiore del precedente.

In generale va comunque evidenziato che tutte le correlazioni si presentano coerenti alle evidenze reperite in bibliografia.

Dal punto di vista sostanziale, il risultato ottenuto conferma quanto sostenuto nella bibliografia consolidata, e cioè che:

- le variabili generatrici principali dell'incidentalità stradale sono costituite dalle variabili di intensità di esposizione (TGM per corsia, flusso del traffico, lunghezza della galleria);
- il numero di corsie costituisce un fattore peggiorativo dell'incidentalità stradale, determinando, conformemente alla bibliografia consolidata, un aumento rilevante dei conflitti possibili tra veicoli a causa dell'aumento dei cambi di corsia;
- la percentuale di pesanti costituisce un fattore preventivo rispetto all'incidentalità tipica, conformemente a la maggior parte della bibliografia reperita.

* * * * *

Quanto ottenuto costituisce una premessa utile all'applicazione di un metodo esperto per il calcolo di tassi incidentali valorizzando le evidenze di incidentalità riferite a gruppi omogenei di gallerie, con ciò identificando le gallerie di una tratta caratterizzate da geometria e traffico in attraversamento simili.