



# ***“Gestione della Sicurezza in Cantieri e Infrastrutture ”***

***Dispense***

***ing. Mara Lombardi***

***a.a. 2007-2008***



## **Indice**

### *Capitolo 1*

#### **“Il Rischio”**

	<i>pag.</i>	4
1.1 “Rischi, decisioni e Valutazioni”	“	4
1.1.1 “Rischio”	“	4
1.1.2 “Rischi accettabili”	“	5
1.1.3 “Percezione del Rischio”	“	7
1.1.4 “Diagrammi F-N”	“	8
1.2 “Ottimizzazione delle decisioni”	“	9
1.2.1 “Albero delle decisioni”	“	9
1.3 “Valore Atteso di informazione”	“	10
1.3.1 “Valore Atteso di informazione Imperfetta”	“	10
1.3.2 “Valore Atteso di informazione simulata”	“	13
1.4 “Teoria dell’utilità”	“	14
1.5 “Avversione al Rischio”	“	16
1.6 “Soluzione del problema”	“	16

### *Capitolo 2*

#### **“Il continuo cognitivo”**

		18
2.1 “Teoria del continuo cognitivo”	“	18
2.2 “Analisi ad albero degli eventi (ETA)”	“	19
2.2.1 “Guasti di sistema”	“	19
2.2.2 “Alberi degli Eventi”	“	20
2.2.3 “Eventi Iniziatori”	“	21
2.2.4 “Alberi degli Eventi – Alberi dei Guasti”	“	22

### *Capitolo 3*

#### **“Basi Concettuali”**

	“	23
3.1 “Basi concettuali”	“	23
3.2 “Diagramma di influenza”	“	26
3.3 “Diagramma di influenza e Albero degli eventi”	“	26
3.3.1 “Conseguenze”	“	29
3.4 “Alberi delle Cause”	“	29



3.5 “Probabilità degli eventi conseguenza”	“	30
3.5.1 “Probabilità di ramo”	“	30
3.5.2 “Stime statistiche”	“	30

*Capitolo 4*

<b>“Affidabilità”</b>	“	32
4.1 “Stime del modello di affidabilità”	“	32
4.2 “Valutazione dell’affidabilità di sistema”	“	32
4.2.1 “Concetto di affidabilità di sistema”	“	33
4.3 “Dipendenze tra guasti di componenti”	“	33
4.4 “Rappresentazioni”	“	34
4.4.1 “Rappresentazioni Alberi degli Eventi”	“	34
4.4.2 “Rappresentazioni Alberi delle cause”	“	36
4.5 “Affidabilità del sistema”	“	37
4.6 “Analisi ”	“	37

*Capitolo 5*

<b>“Analisi di Rischio per gallerie stradali e ferroviarie”</b>	“	39
5.1 “L’analisi di rischio nel quadro normativo”	“	40
5.2 “Risk Analysis and acceptability criteria”	“	49
5.3 “Road tunnels safety rules in Italy: the tunnel country”	“	55
5.4 “Procedura “La Sapienza” per l’analisi semplificata del rischio in galleria ferroviaria”	“	64
5.5 “Analisi di Rischio per Gallerie Stradali”	“	105



## 1.1 Rischio, Decisioni e Valutazioni

Che cosa si intende per Rischio? Qual è il modo più opportuno di quantificare la probabilità di un evento indesiderato? Quali sono le potenziali conseguenze di eventi indesiderati?

Questo capitolo inizia con l'esaminare i potenziali pericoli che le persone affrontano ogni giorno proponendo vari modi di definire il rischio.

Si rileva come la conoscenza delle probabilità attribuite ad eventi possibili e l'entità delle loro conseguenze possano essere utili ad operare scelte e prendere decisioni in modo sistematico e ponderato.

### 1.1.1 Rischio

Nel corso della vita quotidiana, così come nella pratica ingegneristica, si incorre abitualmente in situazioni che comportano alcuni eventi che potrebbero accadere e che, se avvenissero, causerebbero conseguenze sfavorevoli.

Bisognerebbe, quindi, essere in grado di valutare la probabilità di accadimento di un evento e quantificarne le conseguenze o il costo ad esse associato.

La combinazione di evento incerto e conseguenza sfavorevole è la definizione di rischio:

$$\text{Rischio} = (\text{probabilità, conseguenza}) = (p, d) \quad (1)$$

Nel linguaggio comune la parola *rischio* assume una varietà di significati; nella pratica ingegneristica la definizione è solitamente più ristretta. Kaplan e Garrick (1981) sostengono che, ai fini della valutazione del rischio, devono essere definiti tre punti:

- o uno **scenario**
- o un **intervallo di conseguenze**
- o una **probabilità** del fatto che lo scenario induca delle conseguenze

Definiti questi tre punti, Bedford e Cooke (2001) sostengono che l'analisi di rischio tenta di rispondere a tre domande:

- o Che cosa potrebbe accadere?
- o Quanto è possibile che accada?
- o Stabilito che accada, quali sono le possibili conseguenze?

Così in ingegneria il rischio solitamente è definito con:

- o Una serie di scenari (o eventi conseguenza),  $E_i, i = 1, \dots, n$ ;
- o Le probabilità associate a ciascuno scenario,  $p_i$ ;
- o Le conseguenze associate a ciascuno scenario di fine emergenza,  $c_i$ ;



La misura quantitativa del rischio potrebbe essere definita in diversi modi; differenti settori quantificano il rischio adottando criteri diversi. Ad esempio, nel settore assicurativo, il rischio è solitamente definito come il valore monetario della vittima assicurata (risarcimento dovuto alla vittima in caso di incidente).

Così, se una compagnia assicurativa redige una polizza per assicurare un fabbricato, nel caso di danno sismico (con compromissione totale dell'agibilità dell'immobile), il rischio è quantificato come il valore totale del fabbricato assicurato:

$$\mathbf{Rischio = (conseguenza) = (c) \quad (2)}$$

Nella salute pubblica, il rischio è comunemente definito come la probabilità di accadimento di un effetto sfavorevole dovuto ad agenti esterni o ad attività intraprese. Se, ad esempio, un elevato numero di persone è esposto ad un agente patogeno, il rischio per la salute pubblica è rappresentato dal numero di persone contagiate (più in generale dal numero di soggetti esposti che subiscono un effetto negativo sulla salute):

$$\mathbf{Rischio = (probabilità) = (p) \quad (3)}$$

Nell'ambito ingegneristico, il rischio è comunemente definito come il prodotto di probabilità di accadimento di un evento e danno associato; espresso in altro modo, è definito come aspettativa di risultati avversi:

$$\mathbf{Rischio = (probabilità * danno) = (pd) \quad (4)}$$

Nel caso in cui più di un evento porti alla realizzazione di una condizione sfavorevole, l'equazione (4) si intende come sommatoria delle delle aspettative dei singoli eventi:

$$\mathbf{Rischio = \sum_i p_i c_i \quad (5)}$$

### **1.1.2 Rischi accettabili**

In campo ingegneristico, come in altri aspetti della vita, un rischio più elevato solitamente comporta costi maggiori, da cui discende la questione di “come la sicurezza sia sufficientemente sicura” e “quale sia il rischio accettabile”.

Starr e Whipple (1980) scrivono: “in termini assoluti, il rischio è da considerarsi accettabile quando è ritenuto tale da chi?”.

Giuridicamente è richiesta l'approvazione del governo per legittimare una metodologia di analisi di rischio, ma per renderla soddisfacente è necessario il consenso dell'opinione pubblica.

Ogni giorno le persone si trovano di fronte a rischi per la salute e l'incolumità: dal rischio di contrarre una malattia mortale, a quello di rimanere coinvolti in un incidente automobilistico (cfr. tab. 1).



Tipo di incidente	Numero totale di morti	Probabilità individuale per anno
Automobili	55,791	1 in 4,000
	17,827	1 in 10,000
Incendi	7,451	1 in 25,000
Annegamenti	6,181	1 in 30,000
Conflitti a fuoco	2,309	1 in 100,000
Viaggi aerei	1,778	1 in 100,000
Caduta di oggetti	1,271	1 in 160,000
Elettrocuzione	1,148	1 in 160,000
Fulmini	160	1 in 2,500,000
Tornado	91	1 in 2,500,000
Uragani	93	1 in 2,500,000
Altri incidenti	111,992	1 in 1,600

**Tabella 1 – Rischio medio di morte di un individuo per varie tipologie di incidenti**

La società deve affrontare il “rischio” che un elevato numero di individui siano feriti o vittime di grandi catastrofi (cfr. tab. 2).

Tipo di evento	Probabilità di 100 o più morti	Probabilità di 1000 o più morti
<b><i>Antropico</i></b>		
Incidente aereo	1 su 2 anni	1 su 2000 anni
Incendio	1 su 7 anni	1 su 200 anni
Esplosione	1 su 16 anni	1 su 120 anni
gas	1 su 100 anni	1 su 1000 anni
<b><i>Naturale</i></b>		
Tornado	1 su 5 anni	-
Uragano	1 su 5 anni	1 su 25 anni
Terremoto	1 su 20 anni	1 su 50 anni
Impatto di meteorite	1 su 100.000 anni	1 su 10 <sup>6</sup> anni

**Tabella 2**



La percezione che quotidianamente ci si trovi ad affrontare rischi (fig.1) non determina necessariamente una stima accurata di questi rischi: alcuni possono essere corsi volontariamente, altri possono risultare involontari. Solo il fatto di essere vivi comporta, in Europa o negli Stati Uniti, un rischio di  $1.5 \cdot 10^{-6}$  all'ora; pertanto, alcuni analisti considerano questo valore un valore di riferimento con cui comparare gli altri rischi. Nel caso di rischi volontari, è l'individuo a decidere di accettare il rischio connesso ad un'attività.

Starr perviene a quattro conclusioni sul rischio accettabile:

- L'opinione pubblica è in grado di accettare “rischi volontari” 1000 volte più alti rispetto ai rischi involontari;
- Il rischio di morte per malattia potrebbe essere un “comparatore” psicologico per fissare il livello di accettabilità di altri rischi;
- L'accettabilità del rischio sembrerebbe essere proporzionale al cubo dei benefici;
- L'accettazione del rischio da parte della società è influenzata dalla consapevolezza dei benefici di un'attività, determinati dalla pubblicità, dall'utilità e dal numero di soggetti partecipanti all'attività stessa.

### **1.1.3 Percezione del rischio**

Comunemente il rischio è percepito non solo come atto scelto volontariamente o involontariamente o in funzione di una valutazione costi-benefici ma anche attraverso altri approcci (cfr. tab. 3).

<i>Fattore I: controllabilità - incontrollabilità</i>	
Controllabile	Non-controllabile
Nessun timore	Paura
Locale	Globale
Conseguenze non letali	Conseguenze letali
Equo	Iniquo
Individuale	Catastrofico
Basso rischio per le generazioni future	Alto rischio per le generazioni future
Facilmente riducibile	Non facilmente riducibile
Decremento del rischio	Incremento del rischio
Volontarietà	Involontarietà
<i>Fattore II: osservabilità - inosservabilità</i>	
Osservabile	Non-osservabile
Noti agli esposti	Sconosciuti agli esposti



Effetto immediato	Effetto ritardato
Rischio vecchio	Rischio nuovo
Rischio conosciuto alla scienza	Rischio sconosciuto alla scienza

**Tabella 3 – Separazione dei rischi percepiti secondo due fattori dimensionanti**

Negli ultimi venti anni gli analisti hanno tentato di determinare il modo in cui le persone mediamente percepiscono i rischi tecnologici. Un approccio comune consiste nell’adottare un’analisi multivariabile per evidenziare un’implicita struttura preferenziale rispetto a rischi di varia natura.

Una scoperta interessante è stata che, mentre gli analisti di rischio propendono a classificare il rischio come fatalità/anno o in funzione delle ricadute economiche, l’opinione pubblica classifica il rischio secondo: potenziale pericolosità, controllabilità, minaccia alle generazioni future, familiarità, equità, livello di comprensione ed altri fattori quantitativi; vari modelli sono stati proposti per rappresentare queste osservazioni. La figura 2 (4), ad esempio, evidenzia una separazione tra fattori di panico o incontrollabilità del rischio e ciò che è imponderabile e sconosciuto.

### 1.1.4 Diagrammi F-N

Un modo per quantificare il rischio consiste nel rappresentare la probabilità di superamento di una predeterminata soglia di danno, associata alle conseguenze di un evento (fig.3 5)

Dal punto di vista analitico le distribuzioni sono retrocumulate:

$$RCDF_x(x_0) = 1 - F_x(x_0) = P_r[x > x_0] \quad (6)$$

in cui  $F_x(x_0)$  è la distribuzione retrocumulata di probabilità, cioè la probabilità di superamento di una fissata soglia di danno  $x_0$ ; in fig.4 (6) sono riportati distribuzioni retrocumulate relative alle conseguenze indotte dalla rottura di una diga.

Le distribuzioni retrocumulate riassumono, quindi, la relazione intercorrente tra probabilità di superamento e soglie di danno, in termini di numero di vite perse o altri effetti indesiderati prodotti dalla realizzazione dell’evento e costituiscono un modo conveniente di comparare il rischio associato a differenti strutture o alternative progettuali.

Le agenzie governative europee per la sicurezza hanno pubblicato linee-guida per l’applicazione dell’analisi di rischio quantitativa ai lavori pubblici (cfr. figg. 7,8,9,10,11). La pendenza delle linee che separano le zone di accettabilità traduce in termini analitici un criterio decisionale basato sull’accettabilità relativa di rischi caratterizzati da bassa probabilità di accadimento ed elevate conseguenze e rischi caratterizzati da elevata probabilità di accadimento e basse conseguenze.





## 1.2 Ottimizzazione delle decisioni

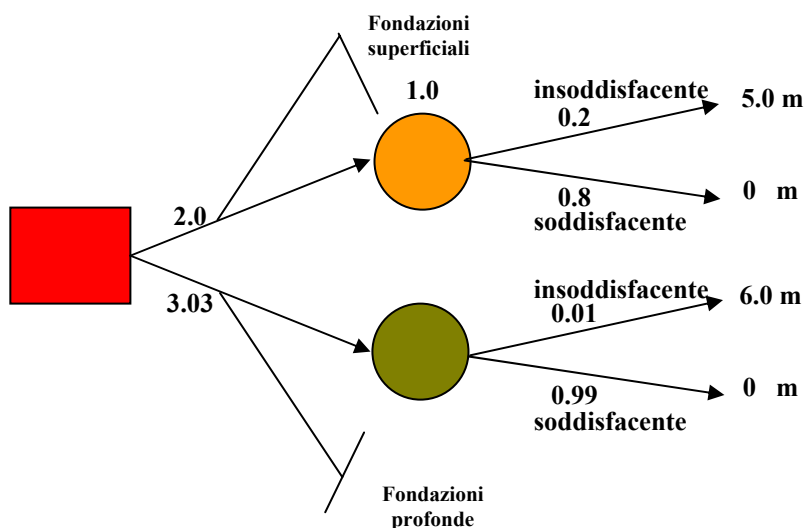
Piuttosto che valutare il rischio confrontandolo con soglie prestabilite, è possibile identificare le scelte migliori ottimizzando alcune funzioni obiettivo; ad esempio, si potrebbe scegliere l'alternativa che minimizza la perdita in termini monetari (o in termini di vite umane).

### 1.2.1 Alberi delle decisioni

Si considerino due scelte progettuali differenti per la costruzione delle fondazioni di un ponte, realizzate come fondazioni superficiali o profonde. Il vantaggio delle prime è rappresentato dai costi di realizzazione inferiori, lo svantaggio è il rischio d'instabilità dell'opera: pertanto, ad un investimento iniziale modesto, segue nel tempo un costo di manutenzione oneroso. Si vuole valutare l'alternativa progettuale migliore.

Un albero delle decisioni è uno strumento grafico per organizzare in modo strutturato e coerente le informazioni che possono supportare una scelta tecnico-progettuale (cfr. fig.12).

La scelta è tra l'adozione di fondazioni superficiali o profonde ed è rappresentata come primo nodo decisionale (scatola) a sinistra del grafico. Dal nodo deriva una biforcazione che prevede due rami decisionali: realizzando fondazioni superficiali, il costo di progettazione ed esecuzione è complessivamente pari ad un milione di dollari ed è indicato come prima porta (gate) in alto a destra. Utilizzando invece fondazioni profonde, il costo complessivo iniziale è pari a tre milioni di dollari.



**Figura 1 – Albero delle decisioni per la scelta delle fondazioni di un ponte**



Adottando fondazioni superficiali, è possibile che la prestazione attesa sia soddisfacente; l'incertezza è rappresentata da una biforcazione che parte da un nodo di probabilità (cerchio) e genera due rami con rispettive probabilità d'accadimento.

Con riferimento alla fig. 12, la probabilità che le fondazioni superficiali presentino cedimenti eccessivi, incompatibili con la stabilità dell'opera, è valutata pari a 0.2 e la probabilità complementare (di cedimenti trascurabili) è pari a 0.8. Un cedimento eccessivo comporta costi aggiuntivi; il costo totale dell'opera, comprensivo del costo iniziale e del costo degli interventi di manutenzione, sarà pari alla somma dei costi previsti per le singole attività: un milione di dollari per la costruzione e cinque milioni di dollari per gli interventi successivi, per un totale di sei milioni di dollari. Ovviamente, se la prestazione delle fondazioni superficiali fosse soddisfacente, il costo totale sarebbe pari al solo costo di realizzazione dell'opera (un milione di dollari).

Il costo atteso è rappresentato dalla somma dei costi totali di ogni possibile scenario, ponderati per le rispettive probabilità di accadimento:

$$C = 0.2 * 6 \text{ m\$} + 0.8 * 1 \text{ m\$} = 2.0 \text{ m\$}$$

Una valutazione analoga è proposta per le fondazioni profonde; il costo atteso dell'opera sarà pari a:

$$C = 0.01 * 6 \text{ m\$} + 0.99 * 3 \text{ m\$} = 3.03 \text{ m\$}$$

Questa analisi implica che, sulla base del confronto tra i costi attesi, le fondazioni superficiali sono migliori (il costo atteso è inferiore).

Si supponga che, avendo deciso di realizzare fondazioni superficiali, si registrino nel tempo cedimenti di entità tale da richiedere interventi integrativi. In tal caso la spesa complessiva dell'opera, pari a 6 milioni di dollari, sarebbe superiore alla messa in opera di fondazioni profonde. Il realizzarsi di uno dei possibili scenari, peraltro, comporta costi che non coincidono in nessun caso con il costo atteso: il risultato favorevole prevede costi minori, quello sfavorevole costi maggiori. Si potrebbe concludere che è stata presa una decisione sbagliata? No, almeno per ciò che concerne l'obiettivo. Dato lo stato d'informazione al momento della decisione, le fondazioni superficiali rappresentano la scelta più conveniente. Sebbene l'analisi a posteriori riveli che il risultato è sfavorevole, la decisione presa risulta la più giusta.

### **1.3 Valore atteso di informazione**

#### **1.3.1 Valore atteso di informazione perfetta (EVPI)**

In questo caso, di fronte all'incertezza rappresentata dalle caratteristiche meccaniche del terreno, si potrebbero acquisire preliminarmente informazioni aggiuntive piuttosto che prendere immediatamente una decisione.



Le prove di carico in situ costano 50000 \$ ma, a fronte di questo investimento iniziale, si presume che forniscano un'informazione praticamente certa sulle condizioni del suolo e sull'opportunità di scegliere fondazioni superficiali.

In assenza di prove in situ, la scelta ricadrebbe sulle fondazioni superficiali; se le prove confermassero buone condizioni meccaniche del terreno, la decisione di adottare fondazioni superficiali non sarebbe modificata dai risultati ottenuti. In quest'ultimo caso i soldi spesi per le prove sarebbero sprecati, poiché la decisione non sarebbe modificata. Se, invece, le prove evidenziassero che le caratteristiche meccaniche del terreno sono scarse e che i cedimenti sono eccessivi, la decisione sarebbe modificata (si adotterebbero fondazioni profonde), risparmiando i costi sostenuti per successivi interventi di manutenzione necessari per far fronte a cedimenti di fondazioni superficiali. L'albero della decisione può essere complicato includendo questa nuova biforcazione riguardante le prove di carico (cfr. fig. 13). Questa decisione ha la stessa forma funzionale di qualsiasi altra decisione ed è rappresentata nell'albero come nodo decisionale che precede cronologicamente la scelta del tipo di fondazione, in quanto consente di acquisire informazioni certe sulla natura e sulle caratteristiche del terreno e sull'opportunità di scegliere un tipo di fondazione.

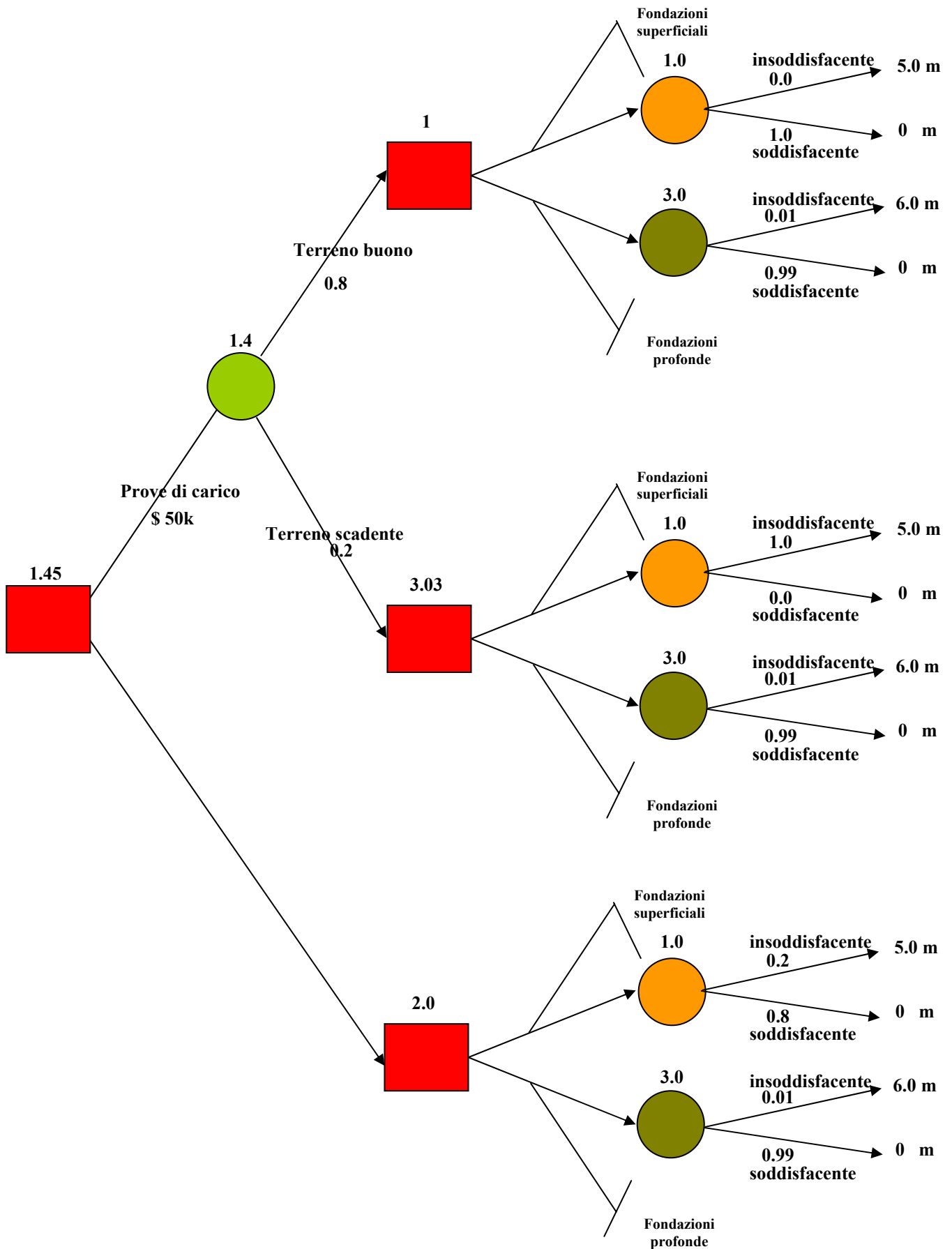


Figura 2 – Albero delle decisioni per la scelta delle fondazioni di un ponte



Se il risultato delle prove di carico è soddisfacente, la probabilità che le fondazioni superficiali si assestino eccessivamente con la necessità di effettuare interventi successivi è nulla e la scelta ricade sulle fondazioni superficiali con un costo pari a un milione di dollari. Se, invece, le caratteristiche del terreno sono scadenti, la probabilità che si manifestino cedimenti eccessivi, che necessitano interventi successivi, è pari ad uno e la scelta di realizzare fondazioni profonde con un investimento di tre milioni di dollari si rivela più opportuna. Se la probabilità che le prove di carico indichino condizioni buone del terreno è pari a 0.8, il costo atteso sarà:

$$C = 0.8 * 1 \text{ m\$} + 0.2 * 3.03 \text{ m\$} = 1.4 \text{ m\$}$$

Il risultato evidenzia che l'informazione perfetta, fornita dalla prova, abbassa il costo atteso totale da 2.0 m\$ a 1.4 m\$, per cui il valore atteso della informazione perfetta è pari a 0.6 m\$.

Questo risultato può anche essere ottenuto per altra via, minimizzando il danno possibile nel caso in cui si utilizzi uno schema di fondazione meno buono.

La probabilità che le condizioni del suolo siano buone è pari a 0.8; il verificarsi di tale condizione non altera la scelta del tipo di fondazione.

D'altra parte, esiste una probabilità pari a 0.2 che le condizioni del suolo non siano buone; in questo caso i risultati della prova condizionano la scelta del tipo di fondazione e, piuttosto che adottare fondazioni superficiali ed incorrere in una spesa per interventi successivi pari a 5 m\$, si realizzano fondazioni profonde con un risparmio di 3 m\$.

### **1.3.2 Valore atteso di informazione simulata (EVSI)**

Nella maggior parte dei casi, ovviamente, l'informazione acquisita con le prove non è assoluta. I risultati delle prove effettuate prima di prendere la decisione accrescono o riducono la probabilità associata ai possibili scenari. Ad esempio, si potrebbero realizzare prove in situ meno costose ma contemporaneamente meno precise. La tabella 3 mostra i risultati dedotti da prove meno costose (e meno precise) date le condizioni attuali del suolo. Per condizioni buone, l'incertezza deriva dal fatto che le prove meno costose indicano condizioni favorevoli con una probabilità pari a 0.85 ma erroneamente mostrano condizioni sfavorevoli con probabilità pari a 0.15 (considerata un falso positivo nei test clinici). Per condizioni del suolo scadenti, le corrispondenti probabilità favorevoli o sfavorevoli dedotte dalle prove sono pari a 0.3 e 0.7.



Risultato della prova	Pr	Condizioni attuali del suolo	
		“Buone” Pr = 0.8	“Scadenti” Pr = 0.2
Favorevole	0.74	0.85	0.3
Sfavorevole	0.26	0.15	0.7

**Tabella 4 – Probabilità associata ai risultati delle prove meno costose**

### 1.4 Teoria dell'utilità

Il valore monetario atteso può costituire un criterio decisionale accettabile per i governi o per le grandi corporazioni, ma se le conseguenze potenziali delle decisioni sono rilevanti, intervengono anche altre considerazioni nella valutazione del decisore.

La più importante è il criterio di “avversione” al rischio sintetizzabile come la propensione a trattare grandi perdite o ingenti guadagni come multipli di perdite e guadagni più piccoli.

Per il singolo decisore, la perdita (si supponga, ad esempio quantificata in 100.000 \$) può essere valutata in modo differente (ad esempio, pari a 100 volte una perdita di 1000\$). La maggior parte dei decisori, e molti decisori facenti parte di cooperazioni, sono fortemente avversi alle grandi perdite.

Il presupposto della teoria dell'utilità è che non importa quanto complesse o delicate siano le stime individuali sulle conseguenze delle decisioni, perché le persone manifestano preferenze che si rivelano proprio mediante le decisioni prese.

Così si può postulare l'esistenza di una funzione, detta *funzione di utilità*, ottimizzata nel momento decisionale. Soggetta ad assunzioni sulla coerenza, questa funzione di utilità può essere utilizzata per rappresentare la migliore corrispondenza a prefissate proprietà matematiche.

Siano  $C_1, C_2, C_3$  tre risultati sulla stessa scala; l'ordine di preferenza degli stessi sia:

$$C_1 \square C_2 \text{ e } C_2 \square C_3$$

Dove il simbolo  $\square$  indica “è preferito a”.

Per la proprietà transitiva,  $C_1 \square C_3$ . La funzione utilità  $u(C_i)$  avrà lo stesso ordine:

$$u(C_1) > u(C_2) > u(C_3)$$

Dal punto di vista della teoria di misura, questa funzione  $u(C_i)$  deve essere invariante su una trasformazione lineare positiva; la scala e l'origine della funzione possono variare e la funzione continua a servire al suo scopo. Generalmente si assegna valore zero al risultato minimo preferito, uno al massimo.



L'*ipotesi dell'utilità attesa* afferma che esiste una funzione  $u(C_i)$  il cui valore atteso, condizionato all'incertezza delle conseguenze, è un criterio logico consistente per le decisioni. La scelta tra il risultato sicuro  $C_2$  ed il risultato probabile  $C_1$  avente probabilità  $p$  e  $C_3$  avente probabilità  $(1-p)$  può essere operata comparando  $u(C_2)$  con il valore atteso  $[p u(C_1) + (1-p) u(C_3)]$ .

Un altro aspetto consiste nella possibilità di dedurre la funzione utilità da decisioni prese in precedenza se, ribaltando il normale ordine logico del processo cognitivo, ci si chiedesse non quale combinazione, coinvolgente probabilità note di risultati incerti, si preferisca, ma quale probabilità, in tale combinazione, potrebbe indurre a cambiare preferenza.

Si consideri il caso in cui una lotteria offra la probabilità  $p$  di vincere 1000\$ contro la probabilità complementare  $(1-p)$  di non vincere nulla. Siano assegnati i valori della funzione utilità:

$$u(0) = 0; u(1000) = 1$$

quindi, l'utilità attesa della lotteria è pari a :

$$E(u) = (1-p) u(0) + p u(1000) = p$$

Quale valore di  $p$  potrebbe rendere indifferente la scelta tra giocare alla lotteria ed una vincita sicura di 100\$? Se  $p$  assumesse un valore prossimo ad uno, la maggior parte della gente giocherebbe alla lotteria; ma se  $p$  fosse pari a 0.1, 0.2 o anche 0.4, molte persone preferirebbero la vincita certa di 100\$.

Si presuma che la risposta  $p_0=0.25$  sia il punto di indifferenza; la figura 16 mostra l'andamento di una funzione utilità comprensiva di questo dato:

$$u(100) = (1-p_0) u(0) + p_0 u(1000) = (1-0.25) u(0) + 0.25 u(1000) = 0.25$$

Date queste relazioni, il valore di  $u(C_2)$  è compreso tra  $u(C_1)$  e  $u(C_3)$  e questa relazione deve essere soddisfatta per ogni valore di  $p$ .

Questo problema sperimentale di determinare la certezza equivalente per una lotteria attraverso un risultato deterministico, nel caso in esame pari a 100\$, e quindi domandandosi quale probabilità  $p_0$  causerebbe indifferenza, potrebbe anche essere impostato al contrario, chiedendosi, per un fissato valore di  $p_0$ , quale risultato certo causerebbe indifferenza.

Si può ora specificare una nuova combinazione che comprenda un valore deterministico nell'intervallo  $[0; 100]$ , domandandosi quale nuovo valore di probabilità  $p_1$  causerebbe indifferenza; quindi, specificando un'altra combinazione che comprenda un risultato deterministico nell'intervallo  $[100; 1000]$  valutare la probabilità  $p_2$  e proseguire in questo modo finché l'andamento della funzione utilità tra 0 e 1000 risulti sufficientemente approssimato.



### **1.5 Avversione al rischio**

Nel caso analizzato in precedenza, come nella maggior parte dei casi comuni, l'andamento della funzione utilità monetaria è concavo ed indica la diminuzione dei ritorni marginali. Per una funzione concava  $u(x)$  definita sull'intervallo  $(a, b)$  e per una variabile casuale  $X$  definita sullo stesso intervallo, per cui esistono i valori attesi di  $X$  e di  $u(x)$ , la disuguaglianza di Jensen implica che:

$$E[u(x)] \leq u[E(x)]$$

Quindi, chi manifesta una preferenza per la concavità della funzione di utilità monetaria sarà sempre indotta a scegliere un guadagno fisso  $x$  in intervallo  $(a, b)$ , piuttosto che una lotteria che comporta un guadagno casuale in  $(a, b)$  con un valore atteso  $E[x] = x$ ; ciò è evidente nella linea tratteggiata in figura che rappresenta il luogo di tutte le combinazioni lineari di  $u(0)$  e  $u(1000)$  per valori di probabilità  $p$ .

Grayson determina sperimentalmente la funzione di utilità monetaria per gli operatori del settore petrolifero in Texas alla fine degli anni cinquanta; un esempio è rappresentato in figura. Le curve sono leggermente concave per valori positivi, mentre la concavità è notevolmente accentuata per valori negativi. Questo atteggiamento di avversione al rischio è ciò che motiva il settore assicurativo. Una compagnia di assicurazione è un “macroente” per il quale le singole perdite sulle strategie sono relativamente piccole e comprese nell'intervallo di variabilità lineare della funzione di utilità “corporativa”. D'altra parte, queste perdite non sono così piccole per il singolo assicurato; quindi, la strategia dell'utilità assicurativa giustifica l'andamento marcatamente concavo nell'intervallo pertinente. Così, dalla disuguaglianza di Jensen il singolo è disposto a pagare un premio più elevato del valore attualizzato del rischio per evitare la dis-utilità connessa con una perdita. Allo stesso tempo, la società di assicurazioni stima il risarcimento al valore attualizzato e così genera un profitto dalla transazione con il vantaggio contemporaneo di entrambe le parti in causa.

### **1.6 Soluzione del problema**

In un testo dedicato a questo argomento, Parkin riporta che “il giudizio è guidato dall'esperienza, dalla competenza, dalla ragione e dalle analisi. Tale giudizio può essere sostenuto rapidamente o solo dopo un lungo periodo di riflessione; può essere il risultato delle considerazioni di alcuni o di un processo collaborativo coinvolgente più persone, possibilmente con differenti competenze professionali.





Molto si sa sui fattori psicologici che intervengono quando le persone cercano di stimare i rischi con un approccio soggettivo.

Il campo della teoria del giudizio sociale definisce il giudizio come “l’abilità di arrivare a conclusioni basate su attributi di un oggetto o di un fenomeno”.

Margolis ha identificato sette livelli progressivi di funzioni cognitive che, come suggerisce Parkin, potrebbero essere interpretate come differenti modi in cui le persone elaborano l’esperienza per giungere a decisioni.

Tali livelli sono:

- semplice feedback;
- riconoscimento dello schema logico;
- apprendimento;
- scelta;
- giudizio intuitivo;
- ragionamento;
- calcolo.

Il semplice feedback è una risposta involontaria del sistema nervoso agli stimoli; ad esempio, guidare un’automobile o la coordinazione occhi - mani comportano il semplice feedback.

Il riconoscimento dello schema logico consiste nel ricondurre stimoli provenienti dal mondo circostante a forme riconosciute.

L’apprendimento è il processo tramite il quale avviene un cambiamento definitivo nel comportamento potenziale come risultato di pratica o di esperienza.

La scelta interviene nel momento in cui si apprendono le relazioni multiple intercorrenti tra le risposte agli stimoli.

Il feedback, il riconoscimento dello schema logico, l’apprendimento e la scelta sono processi cognitivi tipici del mondo animale.

Il giudizio intuitivo implica il processo cognitivo, inteso come capacità di interpretare gli effetti derivanti dalle azioni intraprese e quindi di simulare mentalmente lo scenario per trovare la soluzione ad un problema.

Il riconoscimento dello schema logico è, quindi, inserito nel processo cognitivo; i dati, l’esperienza, le rappresentazioni e gli schemi sono confrontati mentalmente per determinare la soluzione più confacente al problema attuale.

Ragionamento e calcolo sono alla base del giudizio intuitivo e rappresentano la sostanza dell’intelligenza umana.



Il ragionamento è l'uso esplicito del linguaggio per facilitare il giudizio. E' una delle ragioni per cui l'abilità di linguaggio è così importante per gli ingegneri: senza linguaggio non esisterebbero ragionamenti.

Il ragionamento è un modo razionalmente strutturato per pervenire a conclusioni sul mondo circostante e per scegliere tra azioni alternative da compiere.

Il calcolo, infine, sostituisce la logica informale del ragionamento con la logica formale del linguaggio matematico. Alle variabili astratte si assegnano nomi semantici e si utilizzano i processi della logica e della matematica simboliche per sostenere relazioni intuitive o schemi e conclusioni raggiunti.

## **Cap. II**

### **“Il Continuo Cognitivo”**

#### **2.1 Teoria del continuo cognitivo**

La base cognitiva del giudizio intuitivo è poco nota. Il modello di Brunswik è basato sulla percezione, in particolar modo sulla percezione di particolari attributi definiti *cues*.

Alcuni *cues* sono statisticamente relazionati ad oggetti e situazioni basati sull'esperienza.

Quando si ritrova di fronte ad un nuovo oggetto o ad una situazione insolita, l'individuo percepisce un numero relativamente limitato di *cues* derivanti da limitate possibilità e da queste trae conclusioni. I *cues* sono complessi: non possono essere interpretati allo stesso modo ogni volta che sono percepiti.

Persone diverse presumibilmente percepiscono ed interpretano i *cues* in modo diverso, assegnano pesi differenti e li combinano diversamente, giungendo così a conclusioni differenti pur osservando la stessa situazione.

Brunswik ipotizza che i giudizi più intuitivi possano essere modellati come medie pesate dei *cues* e che la ridondanza tra i *cues* assicuri che le conclusioni non siano troppo sensibili al valore esatto dei ponderatori (pesi), dando robustezza al giudizio.

La teoria del continuo cognitivo afferma che i giudizi intuitivi debbano essere valutati da un lato con la corrispondenza tra la media pesata dei *cues* percepiti e dall'altro con gli attributi critici dell'oggetto reale o della situazione che descrivono.

Se questi due aspetti trovano corrispondenza, il giudizio è considerato valido. In caso contrario, il ragionamento o il calcolo dovrebbero essere valutati in termini di coerenza con il modello prodotto. Se le parti del modello costituiscono un unicum “autoconsistente”, il ragionamento o il calcolo si considerano validi, mentre la corrispondenza di questo modello (logicamente valido) alla realtà fisica è di importanza secondaria. La teoria del continuo cognitivo ritiene, inoltre, che l'essere umano non sia in grado di pensare contemporaneamente sia con un meccanismo di corrispondenza



(giudizio intuitivo) che con uno di coerenza (ragionamento o calcolo), ma oscilli tra questi due processi cognitivi.

## **2.2 Analisi ad Albero degli Eventi (ETA)**

E' disponibile un gran numero di metodi utili ad analizzare i rischi ingegneristici, ma gli alberi degli eventi rappresentano l'approccio più comune per i sistemi complessi.

Molte sono le ragioni che spiegano tale preferenza: innanzitutto questa analisi si basa su una struttura logico-intuitiva entro la quale sono organizzate le caratteristiche di un particolare evento. Inoltre, poiché la successione degli step che descrivono l'evoluzione del flusso del pericolo è cronologica, è possibile percorrere facilmente la catena di eventi che riproduce il flusso stesso. Infine, l'analisi è versatile, si adatta bene alle variazioni che possono intervenire quando, ad esempio, per lo stesso fenomeno mutano le condizioni al contorno. Tutto ciò è di aiuto agli ingegneri che si trovano ad affrontare problemi pratici: i problemi vengono scomposti in sottoproblemi di più semplice trattazione e quindi analizzati insieme a ritroso per ricostruire il prospetto dei guasti di sistema.

L'area nella quale hanno trovato miglior collocazione ed utilizzo gli alberi degli eventi, nell'ambito della pratica geotecnica, è quella riguardante la sicurezza dei bacini idrici e delle dighe.

### **2.2.1 Guasti di sistema**

Nel contesto dell'analisi di rischio, per *guasto* del sistema si intende la “cessazione della funzionalità di un sistema”, identificativo di un gruppo di elementi interagenti che formano l'intero complesso.

Il fine ultimo dell'analisi ad alberi degli eventi è consentire di quantificare la funzionalità di un sistema evidenziando le incertezze associate al suo funzionamento.

In questo modo, è possibile misurare la probabilità che il sistema (ad esempio una diga) possa cessare di fornire le prestazioni attese; in altri termini è possibile stimare la probabilità di guasto del sistema. Tale probabilità riflette l'incertezza complessiva nell'ambito della conoscenza delle prestazioni funzionali di una diga, dei carichi ambientali e delle condizioni di servizio garantite.

Come in ogni altra attività di modellazione, per rappresentare la diga come sistema e descrivere l'albero degli eventi associato al suo funzionamento, le assunzioni e le semplificazioni sono effettuate ad ogni step.

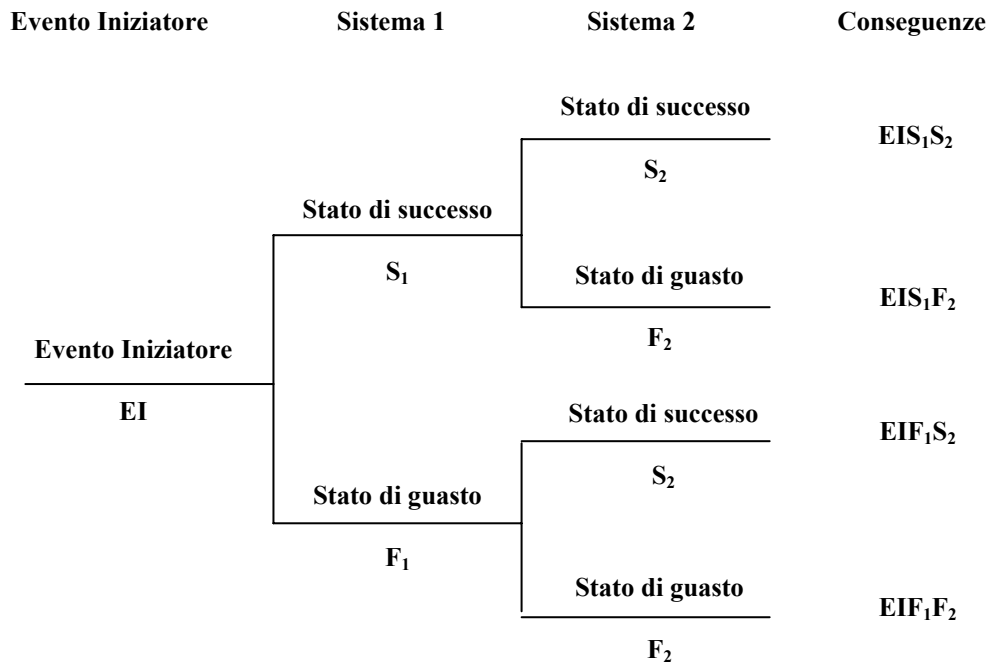
La definizione degli eventi, la loro correlazione, la stima dei parametri e l'assegnazione delle probabilità riflette una struttura che interagisce con l'ambiente circostante e con i processi naturali ed umani che influiscono sulla prestazione.

### **2.2.2 Albero di eventi**

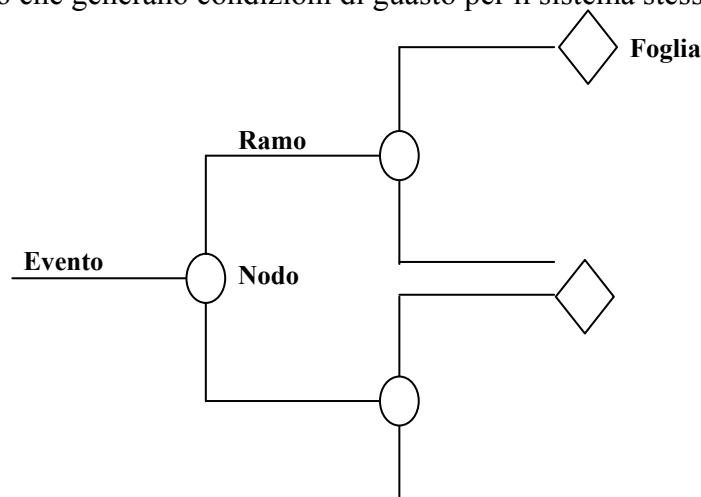


Un albero degli eventi è la rappresentazione grafica di una serie di catene di eventi che potrebbero derivare da alcuni eventi iniziatori e che, in alcuni casi, individuano condizioni di guasto del sistema.

A partire dall’evento iniziatore e all’aumentare del numero di eventi, il diagramma si biforca come i rami di un albero, da cui il nome (vedi fig. 20).



L’analisi genera tutti i possibili eventi successivi all’evento iniziatore, corrispondentemente gli eventi che potrebbero seguire e così via. Gli eventi conseguenza sono individuati percorrendo i rami che partono dal nodo di probabilità che rappresenta l’evento iniziatore. Questo processo implica la creazione di diversi rami, rappresentanti differenti catene di eventi che potrebbero verificarsi a partire dall’evento iniziatore e che compongono gli eventi conseguenza (comprese le evoluzioni del flusso del pericolo che generano condizioni di guasto per il sistema stesso).





Ad ognuno di questi eventi è associata una probabilità condizionata da tutti gli eventi precedenti nel ramo; la probabilità di un evento conseguenza di un ramo è calcolata, quindi, moltiplicando la probabilità condizionate degli eventi che sono presenti sul ramo.

Sommando le probabilità di tutte le catene di eventi che partono da un singolo evento iniziatore e portano al guasto, si ottiene la probabilità totale di guasto del sistema.

Il nodo terminale, presente alla fine di ogni ramo di eventi, viene definito foglia; ogni foglia è associata ad un evento conseguenza. Le conseguenze possono essere espresse, ad esempio, in termini di costi o benefici derivanti dalla particolare catena di eventi che genera quello specifico evento conseguenza.

Nella maggior parte dei casi queste conseguenze possono essere complesse ed analizzate costruendo un albero delle cause. Un albero delle cause struttura la serie di considerazioni complesse pervenendo alla stima delle conseguenze dei guasti allo stesso modo in cui un albero di eventi struttura le catene di eventi portando al guasto del sistema.

### **2.2.3 Eventi Iniziatori**

Gli eventi iniziatori sono i primi nodi dell'albero degli eventi, gli eventi che precedono o avviano le catene di eventi successivi.

Solitamente gli eventi iniziatori e le loro conseguenze sono considerati isolati gli uni dagli altri, cioè incompatibili.

Gli eventi iniziatori esterni al sistema, ad esempio terremoti o alluvioni nel caso delle dighe, sono trattati come fenomeni variabili e, quindi, come variabili aleatorie che si verificano casualmente nel tempo, modellate con un processo stocastico (ad esempio con una distribuzione Poissoniana o con una binomiale negativa). Questi eventi iniziatori sono inseriti nell'albero degli eventi e rappresentano dei carichi agenti sul sistema, mentre l'albero degli eventi modella la risposta del sistema al carico in funzione delle misure e dei sottosistemi preposti a fronteggiare il flusso del pericolo.

Presumere che gli eventi iniziatori siano casuali implica probabilità annue di guasto (tassi) come, ad esempio, le curve di frequenza delle inondazioni o i tempi di ritorno dei terremoti.

Le incertezze riguardanti gli eventi iniziatori possono essere causate principalmente da una conoscenza limitata del fenomeno; in tal caso le probabilità annue di guasto sono un artificio di modellazione.

Gli alberi degli eventi, costruiti ai fini di valutare le condizioni di sicurezza di un sistema (ad esempio di una diga), focalizzano l'attenzione su un numero relativamente limitato di eventi



iniziatori. Gli eventi iniziatori interni, imputabili al sistema e non a cause esterne, vengono anche definiti “guasti sotto condizioni operative standard”.

### 2.2.4 Alberi degli Eventi ed Alberi delle Cause

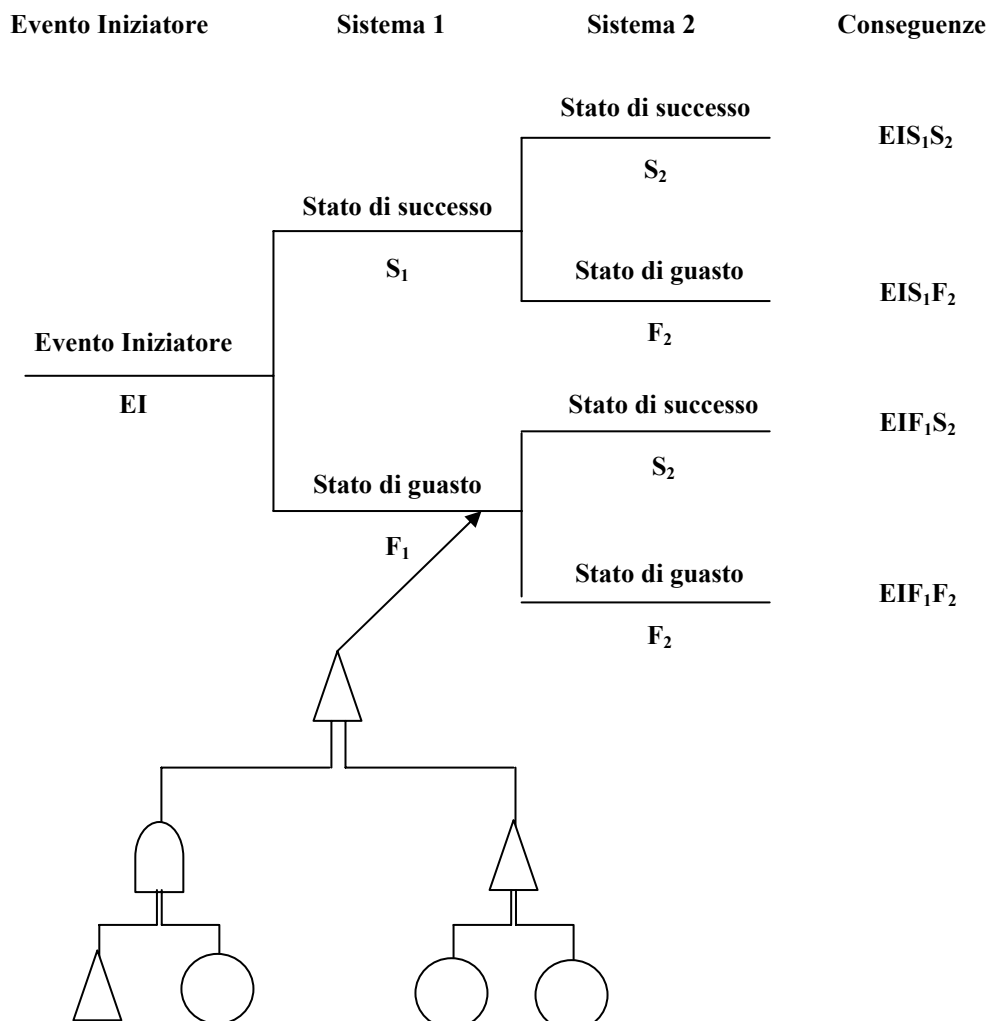
Gli alberi delle cause, che partono dallo stato finale di guasto del sistema e risalgono a ritroso fino ad identificarne le cause, sono il metodo di analisi più usato per i sistemi meccanici.

Gli alberi di eventi, almeno sul piano concettuale, partono da eventi iniziatori (o cause) a sinistra del diagramma e procedono attraverso un’analisi dettagliata delle conseguenze.

L’ordine degli eventi può essere modificato, sempre che vengano modificate le relazioni tra le probabilità condizionate, ma concettualmente la progressione logica tra causa ed effetto in un albero è importante anche se non esplicitamente manifesta.

Gli alberi delle cause, invece, partono dalle conseguenze (guasti) e proseguono a ritroso risalendo a cause sempre più dettagliate; quindi, la struttura logica dell’albero delle cause è rovesciata rispetto a quella dell’albero degli eventi, poiché la logica si muove dalle conseguenze fino alle cause.

Il guasto del sistema è considerato l’evento iniziatore e un albero delle cause si sviluppa a partire da questo evento.





Un analista di alberi degli eventi si domanda che cosa potrebbe accadere in seguito ad un evento iniziatore, mentre un analista di alberi delle cause si domanda come si potrebbe superare un particolare risultato.

Riassumendo, gli alberi delle cause sono fotografie che rappresentano le condizioni del sistema in un particolare istante; gli alberi degli eventi, invece, potrebbero essere pensati come modelli di interazione tra i componenti del sistema.

Un albero delle cause presenta tutti i possibili modi secondo cui si perviene al singolo evento, usando la logica Booleana in analogia ad un “sistema di radici che dà origine ad una radice principale”.

Gli alberi delle cause sono usati per le analisi di affidabilità che sono alla base della stima della probabilità per gli eventi che compongono i rami.

Le probabilità associate alle biforcazioni di malfunzionamento possono essere determinate attraverso un approccio affidabilistico, quindi inserite come probabilità associate ad un ramo-evento.

## **Cap III**

### **3.1 Basi concettuali**

La definizione di evento, così come usata nel linguaggio corrente, riguarda risultati e accadimenti: eventi che evolvono e che si verificano:

#### **Evento 1.**

**a- Risultato:** qualcosa che segue come, ad esempio, una conseguenza;

**b-** esito finale o determinazione di un’azione;

**c-** risultato postulato, condizione o eventualità.

**2 a-** qualcosa che accade: **accadimento**, un evento degno di nota.

La definizione è meno restrittiva, seppure simile, di quelle presenti nei libri di probabilità:

#### **Evento 1.**

**a- Risultato**, o serie di risultati di un definito esperimento;

**b-** serie di punti campione di uno spazio campionario.

Nella teoria della probabilità la nozione di evento riguarda esperimenti casuali e spazi campionari; ciò ha indotto erroneamente a credere che gli alberi degli eventi siano espressioni grafiche degli spazi campionari e, come tali, la casualità e le altre strutture logiche divengono discutibili.

Gli eventi possono essere arbitrariamente cambiati, sempre che le probabilità condizionate siano modificate coerentemente.

D’altra parte può essere utile conservare l’ordine cronologico o la struttura logica di una successione di eventi.



In sostanza un albero degli eventi può essere interpretato come:

- il modello che rappresenta un sistema fisico (ad esempio il modello di un particolare sistema fisico);
- uno schema che costituisca il resoconto di informazioni acquisite ed interpretazioni.

Queste diverse definizioni sono inerenti a:

- ripartizione delle incertezze tra variazioni naturali e conoscenza limitata;
- incertezze incluse nell'albero.

Se gli eventi rappresentati come nodi nell'albero degli eventi comprendono solo le incertezze aleatorie (eventi che accadono nello spazio e nel tempo), le incertezze epistemiche sono rappresentate come “stati di natura”, cioè come condizioni fissate il cui valore può essere sconosciuto.

Una costante, ad esempio, in un modello ingegneristico è un parametro fissato il cui valore è conosciuto in modo impreciso.

Come in tutti gli aspetti inerenti rischi ed affidabilità geotecnica, è essenziale operare una distinzione tra incertezze aleatorie ed incertezze epistemiche.

Se l'albero degli eventi rappresenta il modello di un sistema fisico, i nodi dell'albero devono rappresentare solo gli eventi che avvengono nello spazio e nel tempo e che riguardano il sistema stesso. Gli stati di natura che descrivono l'ambiente esterno o i parametri dei modelli ingegneristici potrebbero entrare nell'albero solo attraverso i modelli di affidabilità utilizzati per assegnare le probabilità dei rami.

Inoltre, condizioni esistenti ma sconosciute, interpretate come stati di natura, possono influire sulle probabilità degli eventi presenti nell'albero e dovrebbero quindi appartenere all'analisi di affidabilità e non essere presenti sui nodi dell'albero.

Nel caso di una diga, ad esempio, l'ipotesi che le caratteristiche dei terreni di fondazione siano scadenti potrebbe indurre all'ipotesi che si verifichino cedimenti eccessivi del terreno sotto movimenti sismici; questo fenomeno non dovrebbe rappresentare un nodo nell'albero sebbene possa influenzare le probabilità associate agli eventi dell'albero stesso.

Considerare un albero di eventi come modello di un sistema fisico semplifica notevolmente la struttura poiché le variabili che introducono dei fattori condizionanti sono inserite nei modelli di affidabilità che stimano le probabilità di ramo.

Se un albero di eventi è un'analisi sulle possibili risposte di una serie di variabili casuali, sia gli eventi che le variabili di condizione coesistono nell'albero sotto l'ipotesi che le probabilità di evento derivino da un'analisi di affidabilità oppure, nel caso in cui siano rappresentati nell'albero solo gli eventi, sotto l'ipotesi che sia adottato un approccio esclusivamente frequentista.



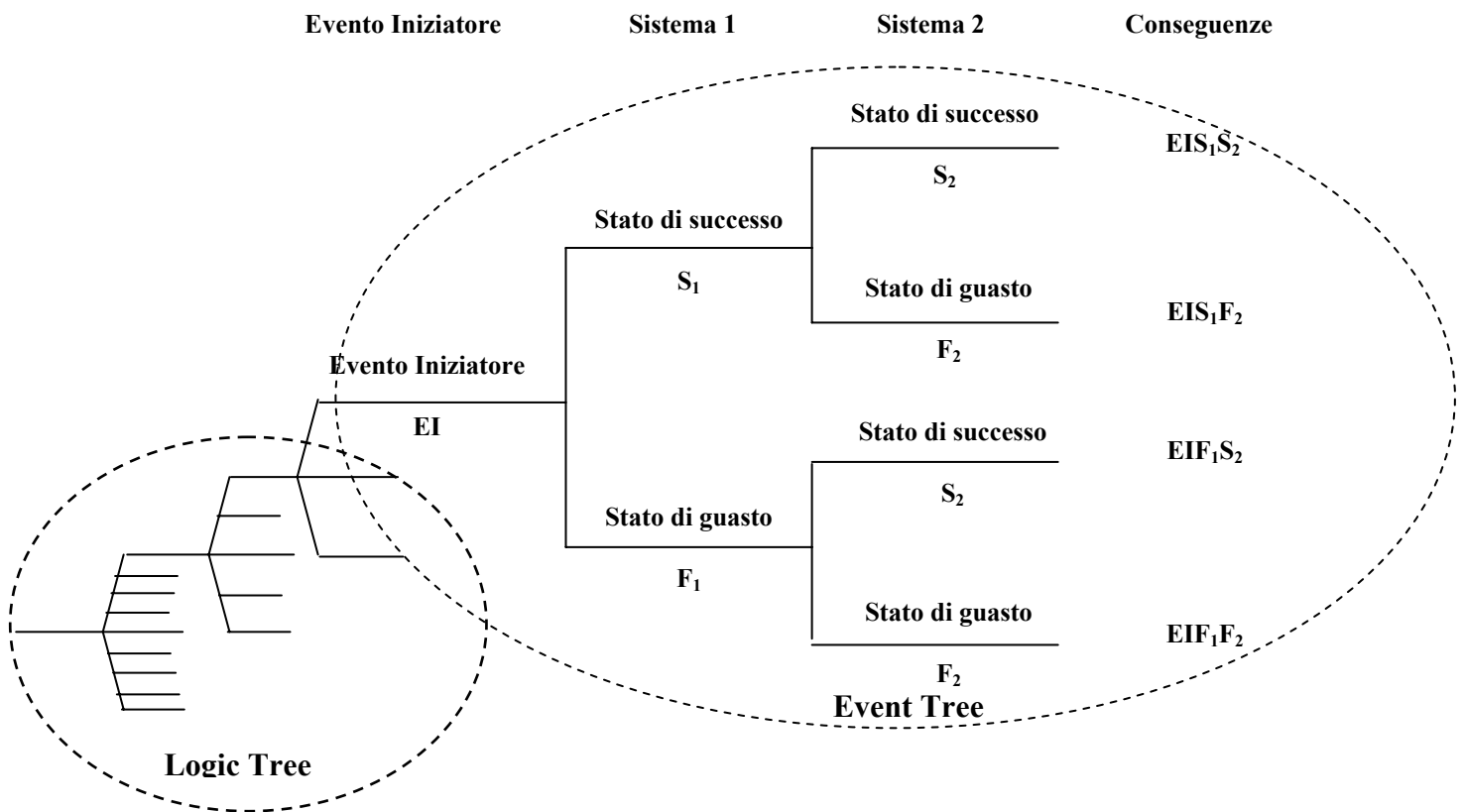


In entrambi i casi, l'ordine degli eventi e delle variabili può essere scelto arbitrariamente e l'albero è usato soprattutto come strumento di calcolo.

L'albero degli eventi è, quindi, un modo conveniente di rappresentare le relazioni tra eventi e probabilità condizionate.

Le incertezze associate agli eventi ed alle variabili di condizione possono essere divise in due analisi distinte: un albero degli eventi per analizzare gli accadimenti nel tempo e nello spazio ed un albero logico per riassumere lo stato di conoscenza (ad esempio le informazioni riguardanti la diga e l'ambiente circostante); un albero degli eventi risulta, così, una rappresentazione dello stato di conoscenza relativo ad un sistema.

L'albero degli eventi contiene solo eventi aleatori, l'albero logico incertezze epistemiche. L'albero logico è, pertanto, una rappresentazione delle possibili realizzazioni degli stati di natura che condizionano le probabilità indicate nell'albero degli eventi (fig. 8).



La struttura dell'albero degli eventi parte dalle singole foglie dell'albero logico; tutti i calcoli che entrano nell'albero degli eventi sono condizionati dagli stati di natura realizzati nell'albero logico. Ciò giustifica le dipendenze dovute alla realizzazione degli stati di natura presenti nell'albero logico. L'albero complessivo, combinazione dei due, non deve risultare più complesso dei singoli alberi poiché il numero di combinazioni di tutti gli eventi incerti, sia aleatori che epistemiche, rimane invariato.



### **3.2 Diagrammi di influenza**

Un diagramma di influenza rappresenta le relazioni tra eventi iniziatori, stati di natura, condizioni di sistema e conseguenze. Creare un diagramma di influenza significa, essenzialmente, creare il modello base dell'analisi di rischio da cui nascono gli alberi di eventi, le valutazioni di affidabilità ed altri modelli. Non resiste una rigida serie di step per creare un diagramma di influenza, ma solo una procedura strutturata per aiutare a mantenere una consistenza logica.

Come tutte le modellazioni, il diagramma di influenza dovrebbe rappresentare la logica di sistema, le influenze sul sistema e le incertezze riguardanti le prestazioni.

L'intento di creare un diagramma di influenza consiste nel ricercare una rappresentazione relativamente semplice nella quale intervengano pochi parametri ma che riproduca attentamente il comportamento del sistema in esame.

Un diagramma di influenza fornisce, quindi, una visualizzazione della struttura dell'analisi di rischio ed include la cronologia degli eventi, le relazioni tra risultati non desiderati. L'intento è quello di rappresentare le correlazioni tra componenti del sistema, eventi aleatori e risposte e di supportare il modello di analisi di rischio dei sistemi componenti e delle loro risposte, senza l'utilizzo di modelli matematici ma solo con le relazioni.

Due vantaggi dei diagrammi di influenza sugli alberi di eventi e di decisioni rendono utile il loro impiego nelle fasi preliminari dell'analisi di rischio:

- un problema complesso può essere rappresentato con un semplice diagramma di influenza che riproduce il singolo evento incerto con un singolo nodo e senza l'evoluzione combinata di rami associati ad alberi di eventi successivi e ad alberi delle cause.
- Le relazioni tra gli eventi sono mostrate esplicitamente, mentre in un albero degli eventi spesso non è immediatamente manifesta la dipendenza causale tra eventi aleatori.

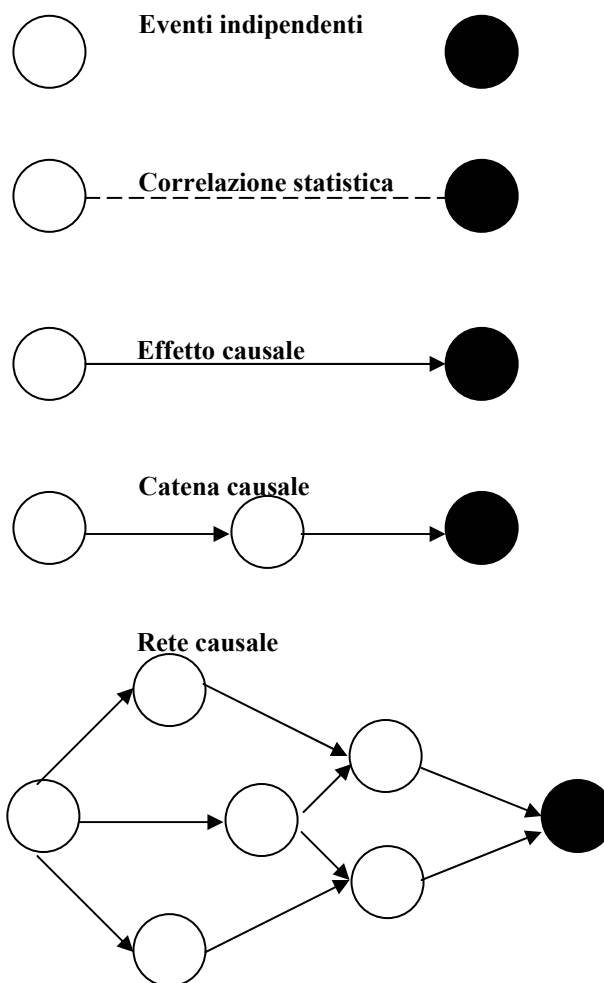
### **3.3 Diagrammi di influenza ed alberi di eventi**

I diagrammi di influenza e gli alberi di eventi sono rappresentazioni alternative degli stessi sistemi. Spesso è conveniente strutturare in una prima fase un modello di sistema in termini di diagramma di influenza, quindi utilizzare le informazioni così acquisite per strutturare un albero di eventi relativo al medesimo sistema.

Ogni strumento fornisce un modo di rappresentare graficamente gli eventi e le relazioni tra eventi, sebbene in forma differente e può essere utilizzato per quantificare gli effetti sulle attività di processo dovuti a rischi esterni.



Un diagramma di influenza rappresenta i nodi di evento per rappresentare le incerte condizioni relative ad un processo e i nodi di attività per rappresentare gli step di un processo. Le relazioni tra nodi sono rappresentate da percorsi diretti che a volte possono diventare archi o curve di influenza. La visualizzazione grafica degli eventi, degli step del processo, delle conseguenze e delle relazioni tra i componenti del sistema analizzato è usata per evidenziare gli effetti di eventi esterni aleatori. Un diagramma di influenza spesso è adottato come uno strumento esplorativo che porta alla strutturazione di più alberi di eventi formali in modo tale che gli stati del sistema e le incertezze possano essere compresi nello stesso diagramma. La quantificazione dell'incertezza insita in un diagramma di influenza è visibile nel corrispondente albero di eventi. Tale albero è costituito da nodi di probabilità corrispondenti al rischio e nodi di attività del diagramma di influenza, connessi da rami che delineano il percorso di influenza. Le relazioni tra gli eventi nell'albero di eventi seguono una gerarchia che parte da indipendenza passando per casualità, casualità invariabile fino all'ordine temporale (fig. 9).



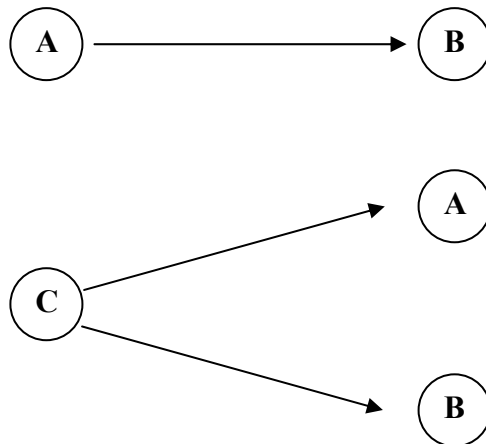


### 3.3.1 Elementi dei diagrammi di influenza

Il criterio logico nella costruzione dei diagrammi di influenza, analogamente al criterio per gli alberi delle decisioni, è di rappresentare i nodi mediante cerchi per gli eventi aleatori, quadrati per le decisioni e rombi per le conseguenze; vengono utilizzati percorsi diretti per denotare la dipendenza.

Un percorso diretto che unisce il nodo A al nodo B (fig. 10) può denotare che:

1. l'evento A causa l'evento B o influenza il modo in cui B può accadere;
2. noto il valore di A, si modifica la probabilità o la distribuzione di probabilità di B (ad esempio A e B sono probabilisticamente dipendenti e la conoscenza di A avviene prima nel tempo).



Due eventi A e B possono essere probabilisticamente correlati e non uniti dal percorso diretto; ad esempio, sono accomunati dalla dipendenza su una terza variabile C. Conoscendo il valore di C, le variabili aleatorie A e B sono assunte probabilisticamente indipendenti nel diagramma di influenza (poiché non unite direttamente da un percorso diretto); ma se C non è noto, A e B sono probabilisticamente dipendenti poiché ciascuna dipende dalla realizzazione di C.

Due eventi A e B possono anche essere statisticamente correlati e non uniti da percorso diretto; ad esempio, se la stima dei loro valori è basata sulla stessa serie di osservazioni sperimentali.

### 3.3.2 Costruzione e sviluppo di un diagramma di influenza

Gli step della procedura per la realizzazione di un diagramma di influenza sono:

- Identificazione degli eventi e delle quantità aleatorie i cui risultati potrebbero essere importanti ai fini della sicurezza del sistema.



- Assegnazione di etichetta ed unità di misura ad ogni quantità aleatoria; se le variabili decisionali sono complesse, definizione delle specifiche alternative quantitative.
- Identificazione delle influenze o dipendenze tra le quantità aleatorie e tra decisioni e quantità aleatorie; rappresentazione di ogni variabile aleatoria e decisione con una successione cronologica di nodi.
- Assegnazione di archi diretti tra i nodi aleatori e i nodi decisionali con direzione indicante la direzione di presunta influenza.

### **3.3.3 Conseguenze**

Le conseguenze risultanti da un incidente o da un malfunzionamento per una diga dipendono da un gran numero di fattori oltre che dal comportamento della diga stessa: dai fattori di sicurezza come barriere, procedure operative, dispositivi e dalla risposta del sistema ad un evento iniziatore o ad un malfunzionamento della diga stessa.

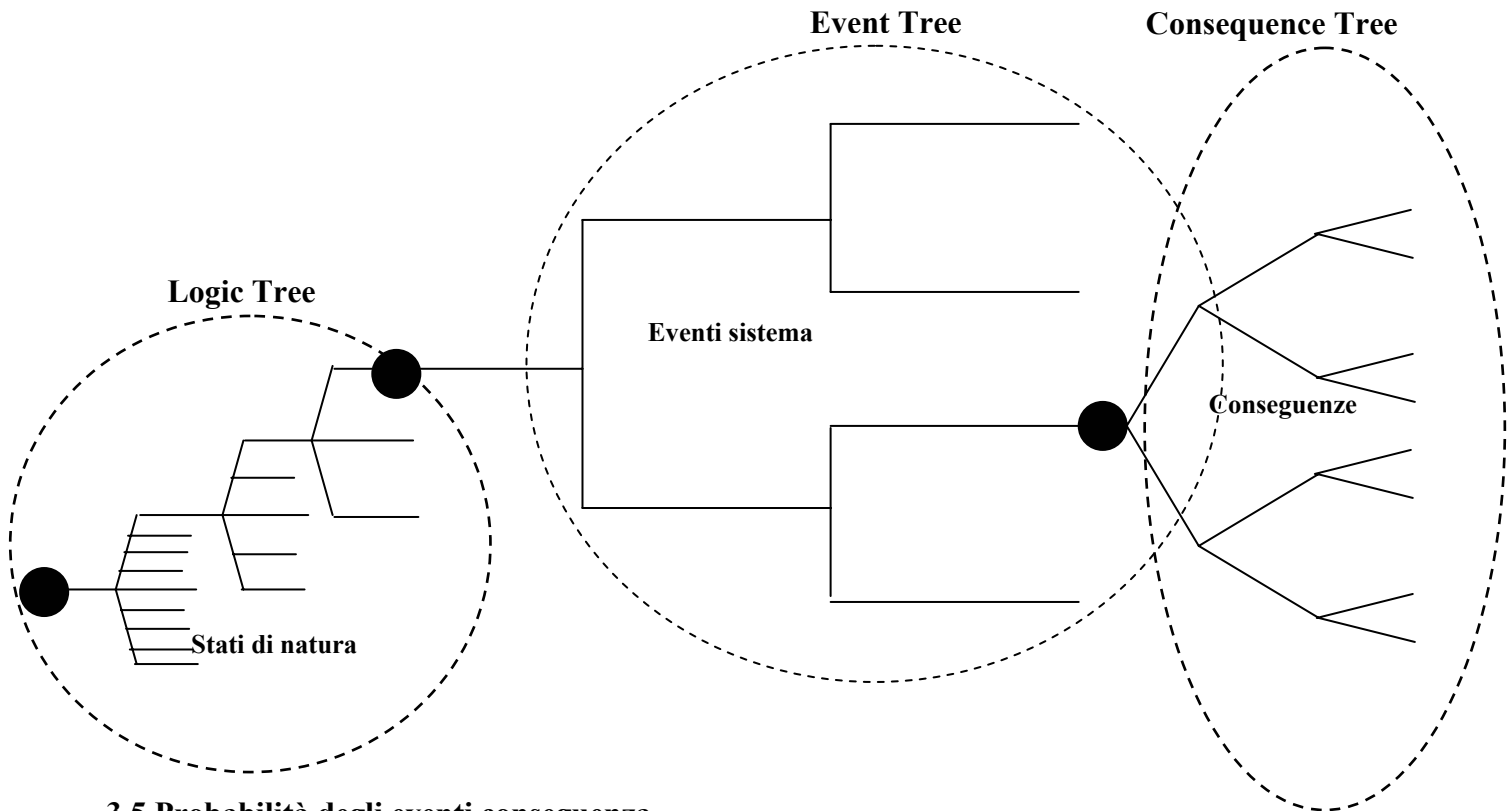
Le funzioni di sicurezza possono includere i sistemi che rispondono automaticamente ad un evento iniziatore ad un malfunzionamento, dispositivi di allarme che allertano gli operatori preposti alla sorveglianza, strutture di contenimento per limitare gli effetti di un malfunzionamento. Altre considerazioni, che possono influenzare le conseguenze, includono il tempo, le condizioni meteorologiche, procedure di emergenza per salvaguardare vite umane e beni.

Queste considerazioni non sono proprie del sistema diga e sono trattate separatamente in un albero delle cause.

### **3.4 Alberi delle cause**

Nell'analisi probabilizzata del rischio spesso si ricorre ad un albero degli eventi per modellare le conseguenze di un guasto. Questo “sotto-albero” include i casi di esposizione trattati con misure di protezione e di mitigazione del rischio (fig. 12); solitamente questo sotto-albero può essere trattato indipendentemente dall'albero degli eventi.

Gli alberi degli eventi generano una serie di coppie probabilità-conseguenze per ogni nodo finale mutuamente esclusivo dell'albero. Il prodotto “probabilità-conseguenza attesa” rappresenta il rischio; lo stesso valore di rischio può derivare tanto da eventi ad alta probabilità di accadimento e modeste conseguenze, quanto da eventi a bassa probabilità di accadimento ed elevate conseguenze. La neutralità del rischio è un'assunzione ragionevole per le questioni di rilevanza sociale, mentre può non risultare tale per usi privati.



### 3.5 Probabilità degli eventi conseguenza

#### 3.5.1 Probabilità di ramo

Una singola probabilità di ramo è assegnata adottando varie procedure:

- Stime statistiche;
- Modelli di affidabilità;
- Analisi mediante albero delle cause;
- Giudizio esperto.

Esistono due modi di assegnare le probabilità agli eventi di ramo; da un lato un albero di eventi può essere ampio e ben dettagliato con molti rami. Dall'altro, l'albero può risultare compatto, con un numero limitato di nodi ma con probabilità stimate da sotto-modelli dettagliati in modo complesso

#### 3.5.2 Stime statistiche

Generalmente stime statistiche sono utilizzate per determinare la probabilità di eventi iniziatori, tipicamente modellati come processi Poissoniani stazionari, descritti da un singolo parametro  $\lambda$  che indica il numero di eventi per unità di tempo (solitamente la base temporale della stima è annua).

Questo modello è descritto da:



$$f_n(n|\lambda) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$$

Dove  $n$  è il numero di avvenimenti e  $\lambda$  è il tasso per unità di tempo.

La stazionarietà implica che il parametro  $\lambda$  si mantenga costante nel tempo; il numero di avvenimenti nell'intervallo di tempo  $t$  è:

$$f_n(n|\lambda, t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$

Per cui il valore atteso sarà  $E[n] = \lambda t$  e la varianza  $Var[n] = (\lambda t)^2$ .

Volendo introdurre la dipendenza probabilistica tra gli eventi, si potrebbe adottare un altro modello; infatti, l'assunto principale della distribuzione di Poisson è che gli eventi accadono indipendentemente. Se, ad esempio, si verificasse un'alluvione quest'anno, la possibilità che l'anno prossimo si verifichi un'alluvione di entità pari o superiore non risulterebbe influenzata dall'informazione. L'eccezione all'ipotesi di indipendenza statistica nel modello poissoniano è che, per la maggior parte dei rischi naturali, la registrazione dei dati storici è su breve periodo. L'acquisizione di una nuova informazione, quindi, come il verificarsi di un'alluvione, influisce sulla stima statistica del parametro  $\lambda$ . Il verificarsi di un evento catastrofico modifica la stima del parametro e conseguentemente influenza le probabilità stimate di eventi futuri.

Le statistiche storiche rappresentano la base per stimare la probabilità di superamento (e quindi il tempo di ritorno) di eventi iniziatori esterni, anche se spesso si hanno pochi dati disponibili.

Per questo motivo si rappresenta l'incertezza statistica di un parametro del modello,  $\lambda$  in questo caso, assegnando una densità di probabilità  $f_\lambda(\lambda)$ . La distribuzione di probabilità cercata può essere ottenuta come distribuzione marginale:

$$f_n(n) = \int_{\lambda} f_n(n, \lambda) d\lambda = \int_{\lambda} f_n(n|\lambda) f_\lambda(\lambda) d\lambda$$

La distribuzione marginale combina l'incertezza dovuta alla variabile naturale, cioè il numero di avvenimenti  $n$  dato il parametro  $\lambda$ , all'incertezza dovuta alla conoscenza limitata, cioè l'incertezza del parametro stesso del modello.

Se più fenomeni di variabilità naturale dipendono dallo stesso parametro  $\lambda$  (ad esempio il numero di occorrenze su due periodi distinti,  $n_1$  e  $n_2$ ) modellando separatamente le distribuzioni predittive (marginali) non verrà evidenziata l'implicita correlazione determinata dalla dipendenza condivisa sullo stesso parametro  $\lambda$ . Questo è il motivo per il quale è utile separare la variabilità naturale dalla conoscenza limitata di un fenomeno ricorrendo agli alberi logici.

L'approccio usuale per quantificare la distribuzione di probabilità di un parametro incerto, in questo caso  $\lambda$ , a partire da dati statistici, è di assegnare una funzione densità di probabilità uniforme (pdf)



al parametro stesso, presumendo che la stessa esista prima di aver osservato i dati statistici, quindi aggiornare tale distribuzione mediante il teorema di Bayes alla luce dell’acquisizione delle informazioni riferite ai dati storico-statistici. Modellando l’accadimento degli eventi iniziatori come processo poissoniano, l’incertezza è dovuta a variabilità nel tempo e nello spazio; dati i tassi medi di accadimento specificati dal parametro  $\lambda$ , la previsione dell’evento iniziatore è un processo puramente statistico. Il solo processo in cui interviene l’incertezza della conoscenza nella formulazione è la stima del parametro  $\lambda$ .

## **Cap. IV**

### **“Affidabilità”**

#### **4.1 Stime del modello di affidabilità**

I modelli di affidabilità partono dai principi primi della meccanica o delle scienze naturali per stimare le incertezze prestazionali di variabili specifiche. Concettualmente sono simili alle distribuzioni predittive in cui l’incertezza statistica dei parametri di modellazione concorre ad un’incertezza di sistema esplicitata attraverso variabili casuali. Con i modelli ingegneristici probabilizzati le incertezze dei parametri di input sono integrate per produrre incertezze implicite nella predizione del modello che non ha carattere deterministico.

Si supponga un modello ingegneristico che pone in relazione variabili di prestazione  $x$  con un parametro o una serie di parametri  $\theta$  attraverso l’equazione:

$$x = g(\theta)$$

dove  $\theta$  ha una distribuzione di probabilità uniforme (pdf) assegnata:  $f_\theta$

da ciò deriva che:

$$f_x(x) = \int_{\theta} g(\theta) f_\theta(\theta) d\theta$$

Se nel modello ingegneristico la funzione  $g(\theta)$  è deterministica, allora  $f_x(x)$  è una semplice funzione di densità di probabilità che riflette l’effetto dell’incertezza del parametro sull’incertezza della variabile prestazionale.

La funzione  $f_x(x)$  riflette la naturale variabilità, la limitata informazione o una combinazione di entrambe e ciò dipende dalla natura dell’incertezza nei parametri del modello e dal fatto che il modello sia deterministico o stocastico.

L’altra fonte di incertezza, in aggiunta a quanto legato all’incertezza del parametro, è ciò che attiene alla formulazione del modello stesso.





## **4.2 Valutazione dell'affidabilità del sistema**

In molti casi si è interessati non solo alla prestazione dei singoli elementi ma anche al modo in cui gli elementi interagiscono in un sistema.

Ad esempio, un'industria di stoccaggio di prodotti petroliferi utilizza taniche di varia grandezza, per il deposito del petrolio e dei suoi derivati, raggruppate in recinti circondati da pareti tagliafuoco. Lo scopo di tali recinzioni è di intrappolare il petrolio che potrebbe fuoriuscire a seguito di una foratura delle taniche e di contenere le fiamme nel caso in cui si verifichi un incendio.

Come si può valutare il livello di sicurezza di questo sistema se si verifica un sisma? Chiaramente, per valutare il grado di sicurezza non basta considerare il comportamento isolato delle taniche, delle pareti tagliafuoco e delle recinzioni; la sicurezza del sistema dipenderà, infatti, dall'interazione dei singoli elementi che la costituiscono.

### **4.2.1 Concetti di affidabilità di sistema**

La maggior parte degli studi di affidabilità di sistema parte da un evento iniziatore che determina una catena di eventi successivi che determinano come stato finale il guasto dell'intero sistema. Terremoti, inondazioni ed uragani sono esempi di rischi naturali che rappresentano eventi iniziatori.

I passi da seguire nella valutazione di affidabilità di un sistema sono:

- identificare gli eventi iniziatori e determinarne la probabilità;
- definire quantitativamente il significato del guasto di sistema;
- sviluppare modelli quantitativi di prestazione dei singoli componenti;
- identificare le interazioni meccaniche tra i guasti di componente e le modalità di guasto del sistema;
- individuare correlazioni statistiche o probabilistiche tra i guasti del sistema e le modalità di guasto;
- integrare modelli, correlazioni ed interazioni per inserire la prestazione del componente nel modello prestazionale del sistema;
- produrre risultati numerici che riassumano l'affidabilità del sistema

## **4.3 Dipendenze tra guasti di componenti**

L'indipendenza dei guasti di componenti o delle modalità di guasto, sebbene causata da interazioni meccaniche (come al punto 4) o da correlazioni (come al punto 5), sono estremamente importanti.

Si consideri il disegno in figura in cui una tanica è circondata da pareti tagliafuoco per contenere le perdite.



Si supponga che la probabilità annua di rottura della tanica e di fuoriuscita del suo contenuto nel recinto sia  $P_T = 0.01$  e che la capacità di contenimento della recinzione sia tale da montanare l'intero volume della tanica. Affinché ci siano fuoriuscite all'esterno devono rompersi sia la tanica che le pareti tagliafuoco. Si assuma che la probabilità di malfunzionamento delle pareti tagliafuoco in caso di perdita dalla tanica sia  $P_F = 0.01$ .

La probabilità congiunta di entrambi i malfunzionamenti nell'ipotesi di indipendenza degli stessi, è il prodotto delle singole probabilità:

$$P_r[\text{perdita di olio}] = P_T P_F = 0.0001$$

La dipendenza tra probabilità di guasto dei componenti può manifestarsi in vari modi:

- Interazioni meccaniche tra modalità di guasto (ad esempio si verifica una rottura della tanica e la fuoriuscita del prodotto sollecita il terreno di fondazione causando il cedimento della parete tagliafuoco);
- correlazione probabilistica (ad esempio uno stesso evento iniziatore interessa sia la tanica che la parete tagliafuoco);
- correlazione statistica (ad esempio l'incertezza sul valore del coefficiente di consolidazione del terreno di fondazione influenza allo stesso modo le prestazioni della tanica e della parete)

#### **4.4 “Rappresentazioni”**

##### **4.4.1 Rappresentazione mediante alberi di eventi**

In geotecnica il modo più comune di valutare il rischio è attraverso la costruzione di alberi di eventi; a partire dall'evento iniziatore si considerano tutte le possibili catene di eventi, ognuna delle quali prende in esame possibili prestazioni del sistema in termini di sottosistemi componenti, che potrebbero scaturire dal primo evento. Alcune di queste catene, attraverso cui si sviluppa il flusso del pericolo, portano a risultati sfavorevoli in termini di conseguenze. Per ogni evento descritto nell'albero si valuta la probabilità condizionata, presumendo il verificarsi di tutti gli eventi che precedono l'evento in esame sul ramo. La probabilità dello scenario finale, per ogni ramo dell'albero, si determina eseguendo il prodotto di tutte le probabilità condizionate relative al percorso specifico considerato.

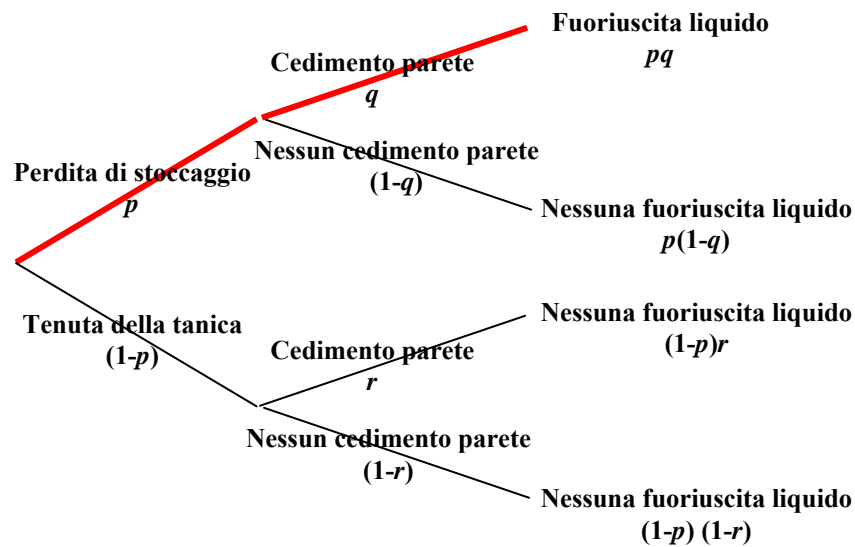
Seguendo questa logica è stato costruito l'albero degli eventi relativo all'area di stoccaggio in figura.

Il primo evento descritto è la perdita di prodotto dalla tanica di stoccaggio, con probabilità assegnata  $p$ . Posto che si verifichi il suddetto evento, la parete tagliafuoco può non trattenere il liquido fuoriuscito dalla tanica; la probabilità di questo evento sia  $q$ . Tale probabilità è ovviamente condizionata dalla rottura della tanica con fuoriuscita di prodotto stoccato: la pressione esercitata

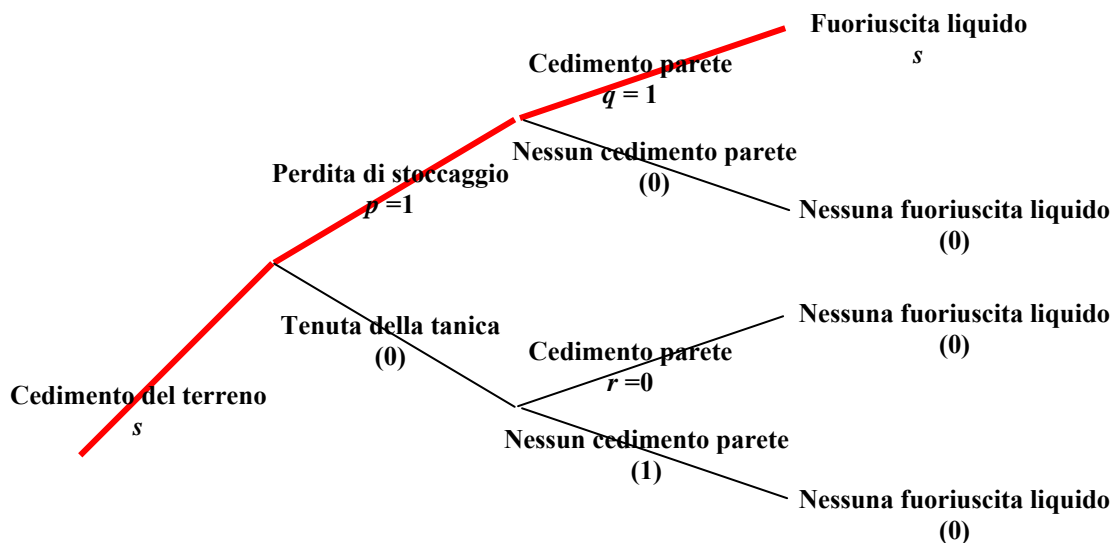


dal liquido contro la parete può determinare più facilmente il cedimento della stessa rispetto al caso in cui non si sia registrata perdita di liquido.

Se il sistema è malfunzionante quando si hanno fenomeni di inquinamento del sito per fuoriuscita del prodotto stoccato, il nodo finale dell’albero che contempla questa condizione di malfunzionamento del sistema si trova in corrispondenza del ramo che individua la rottura della tanica con perdita di liquido ed il cedimento della parete tagliafuoco. La probabilità di malfunzionamento del sistema sarà  $P_{MF} = pq$ .



Si consideri, ora, come evento iniziatore un terremoto che porti al cedimento del terreno di fondazione del recinto e contemporaneamente si verificano la rottura della tanica e il cedimento della parete. In questo caso, invece di considerare i due eventi indipendenti, si supponga che siano correlati poiché innescati da uno stesso evento.





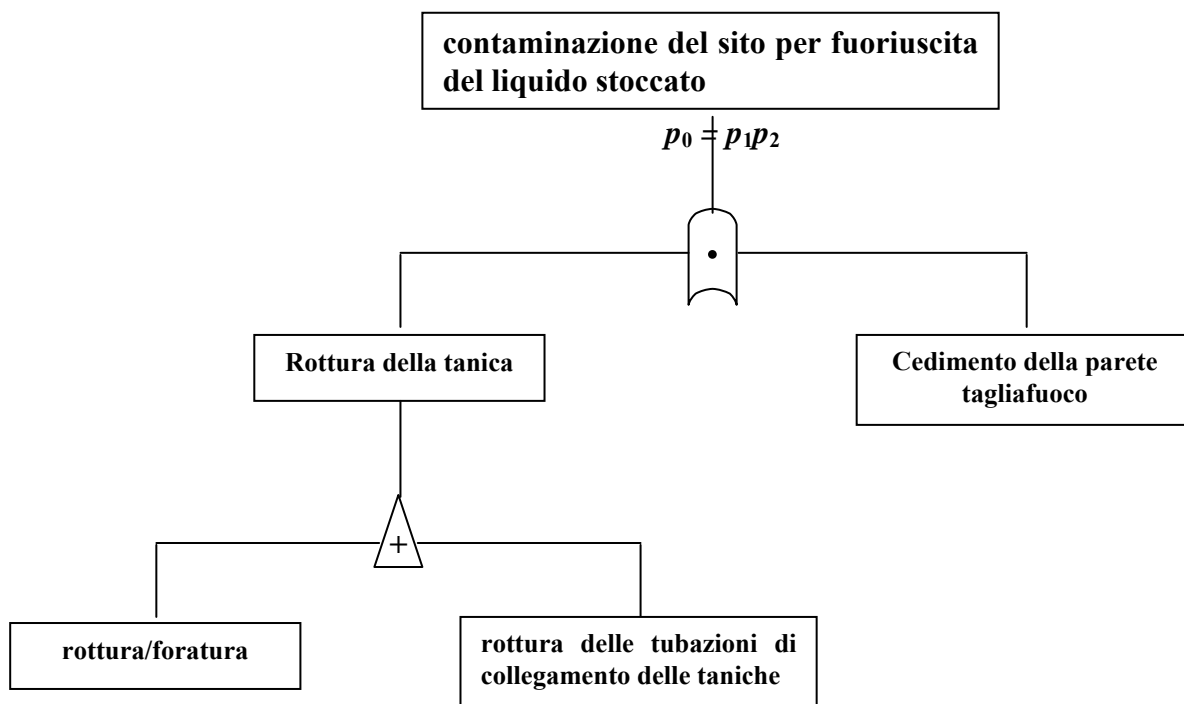
#### 4.4.2 Rappresentazione mediante albero delle cause (FTA)

Sempre in relazione ad un sito adibito allo stoccaggio dei prodotti petroliferi, sono stati considerati in successione gli eventi rottura della tanica di stoccaggio con fuoriuscita di liquido e cedimento della parete di contenimento.

Volendo realizzare l'albero delle cause si consideri l'evento “contaminazione del sito per fuoriuscita del liquido stoccato” ricercandone le cause.

L'evento accade quando sia la parete tagliafuoco che la tanica presentano contemporaneamente un malfunzionamento.

In cima all'albero delle cause è presente la condizione di guasto del sistema, “contaminazione del sito per fuoriuscita del liquido stoccato” che è la risultante del verificarsi simultaneo dei due guasti soprascritti, riportati sull'albero e collegati tramite una porta “AND”.



La probabilità di guasto del sistema è pari al prodotto delle probabilità delle singole modalità di guasto della tanica e della parete:

- $p_0$  = probabilità di contaminazione da prodotto stoccato;
- $p_1$  = probabilità di rottura della tanica;
- $p_2$  = probabilità di cedimento della parete

Si procede per livelli, componendo i guasti individuati in guasti che potrebbero averli causati.



Ad esempio, affinché si verifichi la rottura della tanica, si potrebbero assumere come cause sia la rottura/foratura del contenitore sia la rottura delle tubazioni di collegamento delle taniche; questi ultimi malfunzionamenti sono connessi nell'albero da una porta “OR” poiché, per la fuoriuscita del prodotto dalla tanica, è sufficiente che solo uno dei due avvenga:

- $p_1$  = probabilità di rottura della tanica;
- $p_3$  = probabilità di rottura/foratura;
- $p_4$  = probabilità di rottura delle tubazioni

$$E_1 = E_3 \cup E_4 \rightarrow p_1 = p_3 + p_4 - p_3 p_4$$

Il vantaggio di un albero delle cause rispetto ad un albero degli eventi è che l'analisi è incentrata solo sulle catene che determinano i guasti del sistema.

#### **4.5 Affidabilità del sistema**

Gli alberi degli eventi e delle cause studiano l'affidabilità di un sistema sviluppando un modello logico del sistema stesso. Anche un'opera infrastrutturale, ad esempio una diga, una fondazione o una galleria, è analizzata non attraverso i modelli di ingegneria geotecnica, ma analizzando le relazioni logiche e quantitative che intercorrono tra eventi possibili per quel sistema.

A questi eventi sono assegnate delle probabilità con gli strumenti che sono stati già presentati combinate secondo la struttura logica degli alberi per pervenire alla probabilità di guasto del sistema. Un limite di tale approccio risiede nella laboriosità dell'albero, quando si studiano sistemi complessi.

Le simulazioni di affidabilità si avvalgono di modelli matematici per descrivere la fisica del sistema, impiegati come strumenti di sperimentazione per valutare le prestazioni del sistema al variare di parametri, condizioni iniziali e condizioni al contorno. Per esplicitare i risultati dell'analisi in termini di affidabilità del sistema è adottato un modello di campionamento statistico basato su un'estensione del Metodo Monte Carlo.

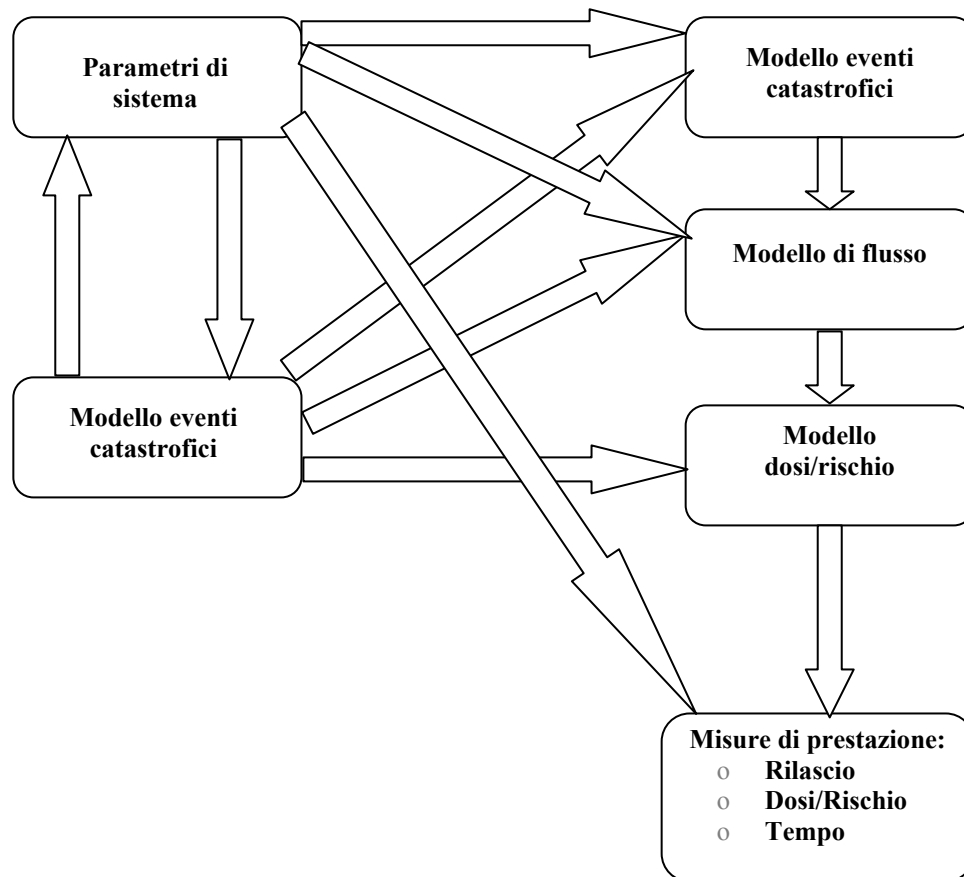
#### **4.6 Analisi mediante alberi degli eventi**

L'analisi di rischio si articola in cinque passi:

1. Identificare i fattori che influenzano la prestazione sismica delle taniche di stoccaggio: frequenza dei terremoti, variabilità delle proprietà del terreno, comportamento delle taniche durante il sisma, prestazione dei terreni di fondazione, prestazione delle pareti tagliafuoco;
2. analizzare i modelli di sorgente del sisma per stabilire il rischio sismico del sito e i livelli di cedimento del terreno;



3. sviluppare un albero degli eventi per illustrare in che modo le varie strutture presenti nella stessa area di stoccaggio interagiscono per determinare il guasto del sistema;
4. costruire una simulazione numerica (Metodo Monte Carlo) per analizzare il comportamento di ciascun componente; i risultati della simulazione costituiscono un campione statistico che descrive il comportamento del sito di stoccaggio e delle strutture in esso presenti;
5. associare le probabilità di guasto del sistema con le conseguenze per determinare il rischio.





**Capitolo 5**

***“Analisi di Rischio per gallerie stradali e ferroviarie”***



## 5.1 L'ANALISI DI RISCHIO NEL QUADRO NORMATIVO

Massimo Guarascio	“Sapienza”–Università di Roma	Ingegneria della Sicurezza, Presidente
Mara Lombardi	“Sapienza”–Università di Roma	Ingegneria della Sicurezza
Giuliano Rossi	“Sapienza”–Università di Roma	Ingegneria della Sicurezza

### 1 Premessa

L'Italia, nel panorama Europeo comunitario delle infrastrutture di trasporto, detiene ben più della metà del patrimonio complessivo dei tratti in galleria, sia nel campo ferroviario che in quello stradale ed autostradale.

Al momento attuale si assiste ad attività normativa e di regolazione sia a livello Europeo (cfr. Direttiva Europea 54/2004/CE “On minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network”) che nazionale (cfr. D.Lgs. 05.10.2006 n°264 “Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea” e D.M. n°89 28.10.2005 “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie”) che mira ad innalzare l'aspettativa di Sicurezza. Tale aspettativa è resa esplicita nei decreti nazionali da definiti obiettivi di sicurezza conseguiti in ragione delle specifiche progettuali delle gallerie e del livello prestazionale delle relative dotazioni. Per l'Italia si pone con forza il problema dell'adeguamento del patrimonio esistente. In particolare sono in evidenza le problematiche che legano la Sicurezza delle gallerie, da un lato alla loro specificità progettuale, dall'altro alle caratteristiche prestazionali dei sottosistemi di sicurezza nelle componenti materiali ed impiantistiche di corredo. Essenzialmente si tratta di: sistemi di ventilazione ed antincendio, impianti di illuminazione, impianti e dispositivi di rivelazione e comunicazione, dotazione ed attrezzature per la segnaletica di emergenza finalizzata alla facilitazione del soccorso e dell'autosalvamento.

La necessità di verificare l'efficacia dei sistemi di sicurezza presenti come requisiti nelle gallerie, ai sensi dei decreti sopra richiamati, ha posto l'esigenza di una metodologia specifica quantitativa per misurare il livello di sicurezza. Tale metodologia è l'Analisi di Rischio.

### 2 La Sicurezza delle Gallerie: Contesto di riferimento normativo

Negli ultimi anni per la Sicurezza delle gallerie stradali, ferroviarie e metropolitane si è andato affermando, nelle Direttive e Decisioni Europee e ancor più nei documenti tecnici delle associazioni internazionali, una 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.

Si fa strada quindi una visione globale di sistema della Sicurezza delle gallerie nelle grandi opere. Nel caso stradale i principali sottosistemi sono: Infrastruttura, Veicoli/Utenti; nel caso ferroviario: Infrastruttura, Materiale Rotabile e Procedure Operative.

La galleria, per la sua specificità di ambito confinato a prevalente sviluppo unidimensionale, aumenta le severità degli scenari di pericolo dovuti a incendio. La suddetta circostanza rende





peculiari le gallerie sotto il profilo della progettazione della Sicurezza nelle distinte fasi di Prevenzione e Gestione dell’Emergenza.

I materiali e i dispositivi sono a loro volta elementi caratteristici dei sottosistemi di sicurezza citati sopra (cfr. All. I Direttiva Europea 54/2004/CE, All. II D.Lgs. 05.10.2006 per le gallerie stradali, All. II D.M. 28.10.2005).

Le caratteristiche prestazionali dei materiali degli impianti e delle componenti di corredo dei sottosistemi influenzano l’affidabilità degli stessi determinandone la capacità di inibizione/mitigazione, protezione attiva/passiva e facilitazione dell’autosoccorso e del soccorso durante la fase di emergenza ed incidono, quindi, sul livello di gravità delle conseguenze di danno.

In definitiva, i materiali con le proprie caratteristiche prestazionali, le dotazioni impiantistiche con adeguati livelli di efficienza/efficacia e le specifiche progettuali supportati da opportuni criteri costruttivi, concorrono a garantire predeterminati livelli di affidabilità determinando il livello di Sicurezza complessivo del Sistema.

I materiali e gli impianti dovrebbero quindi offrire le richieste garanzie prestazionali per tutta la durata delle situazioni di Emergenza.

Tali garanzie prestazionali per i primi riguardano principalmente il comportamento di reazione-resistenza ad azioni aggressive di tipo Meccanico, Chimico, Termico, Termo-Meccanico, Termo-Chimico; per questo la scelta progettuale di impiego deve avere il carattere di “verifica di affidabilità” per definiti scenari di riferimento, ben rappresentativi delle condizioni estreme di esercizio in emergenza.

Per gli impianti, con riguardo alla componentistica costitutiva e costruttiva, valgono le stesse considerazioni fatte sull’affidabilità dei materiali; con riguardo alla funzionalità dei suddetti impianti, invece, esplicitata rispetto alle caratteristiche prestazionali di riferimento, si devono valutare efficienza ed efficacia in fase di emergenza, verificando in modo distinto (Norma CEI 56-50 “Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio” - Norma CEI EN 61078 “Tecniche di analisi relative alla fidatezza – Metodo del diagramma a blocchi di affidabilità”):

- Il Livello di Affidabilità inteso come stima della probabilità di malfunzionamento con riferimento alla prestazione richiesta in emergenza (misura di Efficienza);
- Le caratteristiche Prestazionali in termini di adeguata risposta prestazionale alla finalità richiesta (misura di Efficacia).

### 3 Analisi di Rischio: Valutazione del Livello di Sicurezza

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.

Nel nostro caso la prima applicazione è la verifica dell’efficacia della suddetta configurazione progettuale nella riduzione del rischio ad un valore residuo compatibile con predeterminate soglie (criterio assoluto di accettabilità valido sia per le gallerie stradali che ferroviarie).

Nella direttiva e nei decreti sono previsti dei requisiti obbligatori (peculiarità progettuali, dispositivi di sicurezza, etc.), in misura proporzionale ai cosiddetti “parametri di sicurezza” (lunghezza, volume di traffico, etc.), che potrebbero non essere presenti né realizzabili nelle gallerie esistenti (deficit).

In questo caso, relativamente alle gallerie stradali, l’analisi di rischio serve a verificare con un criterio comparativo il raggiungimento di un livello di sicurezza uguale o accresciuto rispetto al livello della corrispondente “galleria virtuale”.

La galleria virtuale è la galleria identificata dagli stessi parametri di sicurezza della galleria in esame e che possiede tutti i requisiti minimi obbligatori previsti in ragione dei suddetti parametri, funzionanti con livello prestazionale e di affidabilità ideali.



I risultati dell'analisi di rischio, in termini di livello di sicurezza, vengono rappresentati attraverso il Valore Atteso di Fatalità/anno (Indice Centrale Sintetico) per una data galleria che, adottando un Criterio Comparativo (di equivalenza), viene confrontato con il valore atteso della galleria virtuale corrispondente.

La comparazione, in termini di analisi di rischio, è condotta tra la galleria virtuale e la galleria reale con un adeguamento progettuale di requisiti alternativi o integrativi, 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 mitigazione del rischio.

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 della soglia di non accettabilità prescritta in condizioni di funzionamento reale dei singoli sottosistemi.

I risultati dell'analisi di rischio possono essere utilizzati per costruire diversi indicatori quantitativi del rischio, a seconda delle necessità (cfr. Allegato Analisi di rischio, D.Lgs.05.10.2006, figura 1).

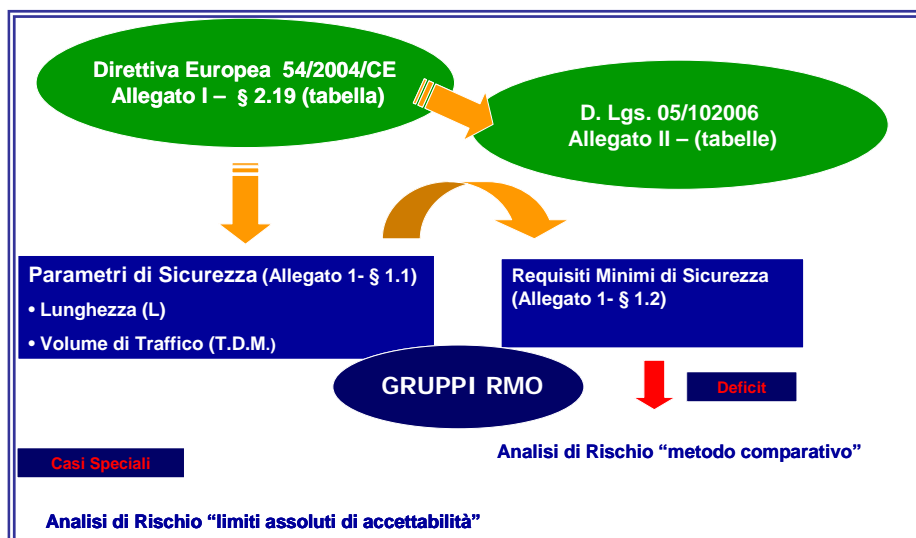
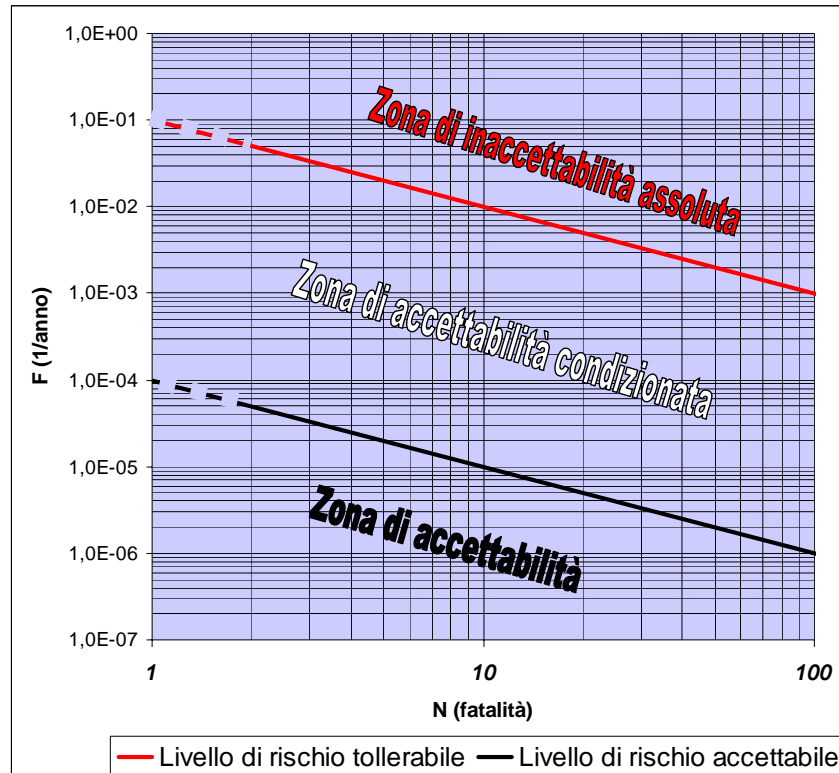


Figura 3: Sintesi della procedura di analisi di rischio ex Direttiva Europea 2004/54/CE e D.Lgs. 05.10.2005  
Nel nostro caso il rischio connesso ad una galleria stradale è definito con due indicatori:

- **valore atteso del danno:** questo indicatore viene usato nell'applicazione del criterio comparativo e 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.
- **distribuzione retrocumulate** tracciate sul piano F/N (figura 2) dove F indica la probabilità di superamento di un valore soglia N che rappresenta il numero di fatalità. Tale indicatore viene impiegato nell'applicazione del criterio assoluto.



**Figura 4: Livelli di accettabilità del Rischio Cumulato nelle gallerie stradali ex D.Lgs. 05.10.2006.**

In tutti i casi previsti dal D. Lgs. 05.10.2006, 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.

Nel caso delle gallerie ferroviarie qualora i “parametri caratterizzanti” dell’“infrastruttura”, sia come sviluppo delle gallerie che come peculiarità progettuali, unitamente alle assunzioni su “volume e tipo di traffico”, siano inferiori a predeterminate soglie si applica una procedura semplificata, detta “Analisi di Rischio Base” (ARB) che definisce un metodo per confermare i requisiti minimi di sicurezza (All. II D.M. 28.10.2005) non solo come necessari ma anche come condizioni sufficienti per garantire la sicurezza in galleria.

Qualora, invece, tali parametri rendano necessaria l'applicazione dell'Analisi di Rischio Estesa (ARE), è richiesto di verificare se sono conseguiti gli “obiettivi di sicurezza” di cui all'Allegato III del D.M. 28.10.2005, con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto e dei servizi di soccorso.

L'analisi deve essere specifica per ogni singola galleria e deve tener conto sia dei valori dei “parametri caratterizzanti” che contestualmente della presenza ed efficacia prestazionale dei requisiti di sicurezza previsti (All. II), nonché delle eventuali “mancanze” e “integrazioni”.

Gli “obiettivi di sicurezza” da conseguire, come richiamato nell'art. 3 (comma 5) e nell'art. 13 (comma 2) del D.M. 28.10.2005 (figura 3), sono definiti in dettaglio nell'Allegato III al paragrafo 4 (Accettabilità del Rischio) e costituiscono di fatto l'espressione della aspettativa di sicurezza della collettività tradotta in forma esplicita attraverso l'assunzione di indicatori quantitativi cogenti.



**D.M. 28.10.2005**  
**“Sicurezza della Gallerie Ferroviarie”**

**Articolo 3**  
**Requisiti di sicurezza**

- 1) Nell'esercizio delle gallerie ferroviarie devono essere valutati, utilizzando gli strumenti e seguendo le procedure di cui al seguente decreto, i tipi di pericoli specificati nell'Allegato III, ed in particolare quelli derivanti da **collisioni, deragliamenti e incendi**.
- 2) Ai fini della sicurezza, per far fronte ai tipi di pericoli di cui al comma 1, sono individuate le seguenti azioni:
  - a) prevenire gli incidenti;
  - b) limitare gli effetti degli incidenti;
  - c) favorire l'autosoccorso e/o l'esodo delle persone coinvolte in un incidente;
  - d) consentire un rapido ed efficace intervento delle squadre di soccorso nelle migliori condizioni di sicurezza per le stesse;

**Articolo 3**  
**Requisiti di sicurezza**

- 3) Nella progettazione, costruzione, esercizio e manutenzione delle gallerie devono essere adottati **requisiti minimi** di cui all'Allegato II.
- 4) Il Gestore dell'infrastruttura, nel caso in cui constati che **i requisiti minimi non sono sufficienti**, in conformità alle disposizioni di cui all'Allegato III, anche con riferimento a **situazioni di criticità indotte da cause esterne** al sistema ferroviario, deve individuare le **misure di sicurezza integrative**, tra quelle elencate nell'Allegato II, attraverso una specifica Analisi di Rischio di cui all'art. 13.
- 5) Si potranno adottare, in aggiunta o in alternativa alle misure di sicurezza di cui sopra, ulteriori misure di sicurezza, **anche di tipo innovativo**, non comprese nell'Allegato II, affinché sia raggiunto **l'obiettivo di sicurezza** di cui all'Allegato III.

**Articolo 13**  
**Analisi dei Rischi**

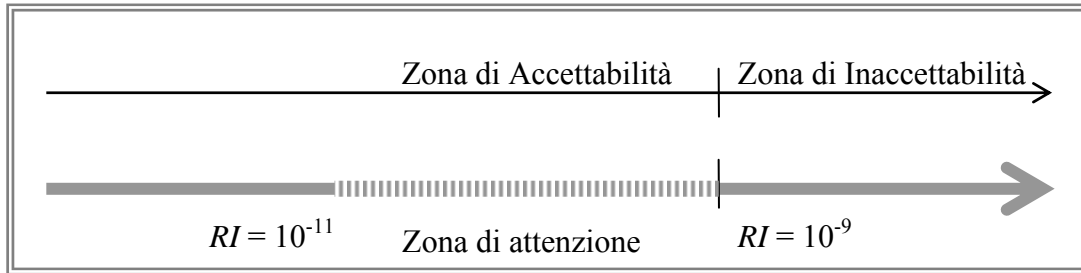
- 2) **L'analisi dei rischi** deve **dimostrare** che, con i parametri di riferimento e i requisiti di sicurezza, di cui all'Allegato II, **sono conseguiti gli obiettivi di sicurezza** di cui all'Allegato III, con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto, dei servizi di soccorso.

Figura 5: art. 3 e art. 13 ex D.M. 28.10.2005



Nel D.M. vengono definiti:

- Indicatore  $RI^1$  che misura il “livello di Rischio Atteso Individuale” normalizzato o, in termini più intuitivi, la probabilità che un generico passeggero sia coinvolto come vittima in un incidente in galleria ferroviaria quando percorre 1km in 1anno. Dal D.M. si riportano i valori soglia (figura 4);
- **Soglia di Attenzione  $RI = 10^{-11}$**
- **Soglia di Inaccettabilità  $RI = 10^{-9}$**



**Fig. 4 Rappresentazione del Rischio Individuale ex D.M. 28.10.2005**

- Indicatore  $RC$  che misura il “livello di Rischio Cumulato”, o meglio retrocumulato, attraverso la individuazione della cosiddetta zona ALARP su di un piano bilogarithmico (figura 5)  $F/N$  dove  $N$  rappresenta un valore soglia che esprime il numero di vittime in un generico incidente e  $F$  è la probabilità retrocumulata di superare tale soglia in un fissato periodo di tempo (1 anno).

In aggiunta all’indicatore  $RI$  ed allo scopo di evidenziare l’influenza della localizzazione del focolaio sulle conseguenze e quindi sul rischio, è utile anche calcolare il valore dell’indicatore di Rischio Individuale Puntuale  $RI(x)$  lungo la galleria in corrispondenza di una sistematica sequenza di punti.

Il contenuto informativo di tali profili  $RI(x)$  può essere efficacemente utilizzato per identificare se ed in quali gallerie esistano tratti critici dove l’indicatore  $RI(x)$  si discosta significativamente dal valore atteso  $RI$  della galleria  $[(\Delta RI(x)/RI)]$ .

In tali circostanze si può condurre una verifica delle cause ed eventualmente proporre delle misure ad hoc puntuali o locali per compensare questo deficit di sicurezza nello spirito ALARP.

Con riferimento allo spirito del decreto ed in particolare alla tipologia dei Requisiti di Sicurezza proposti come minimi obbligatori (Allegato II), si osserva che in via prioritaria l’obiettivo prestazionale dei suddetti requisiti è volto a fronteggiare, a protezione dei passeggeri, quasi esclusivamente l’incremento di rischio, rispetto al rischio ferroviario ordinario, per le emergenze post-incidentali in galleria dovute essenzialmente all’effetto di confinamento della galleria stessa sulla evoluzione di incendi/emissioni ed alle conseguenti difficoltà di autosalvamento e soccorso.

Sugli scenari di emergenza dovuti a collisione e/o deragliamento l’effetto del confinamento è di fatto trascurabile sia nella probabilità di accadimento che sulla entità delle conseguenze. A rigore sulla probabilità di accadimento l’ambiente galleria ha un effetto positivo nel senso di ridurlo.

<sup>1</sup> La misura del **livello di Rischio Atteso Individuale (RI)** si ottiene, normalizzando il valore dell’indicatore **livello di Rischio Atteso Totale (R)**  $R = \sum_{i=1}^n p_i \times C_i$  rispetto alla popolazione esposta in un intervallo di tempo prefissato (un anno) e per chilometro percorso in galleria.

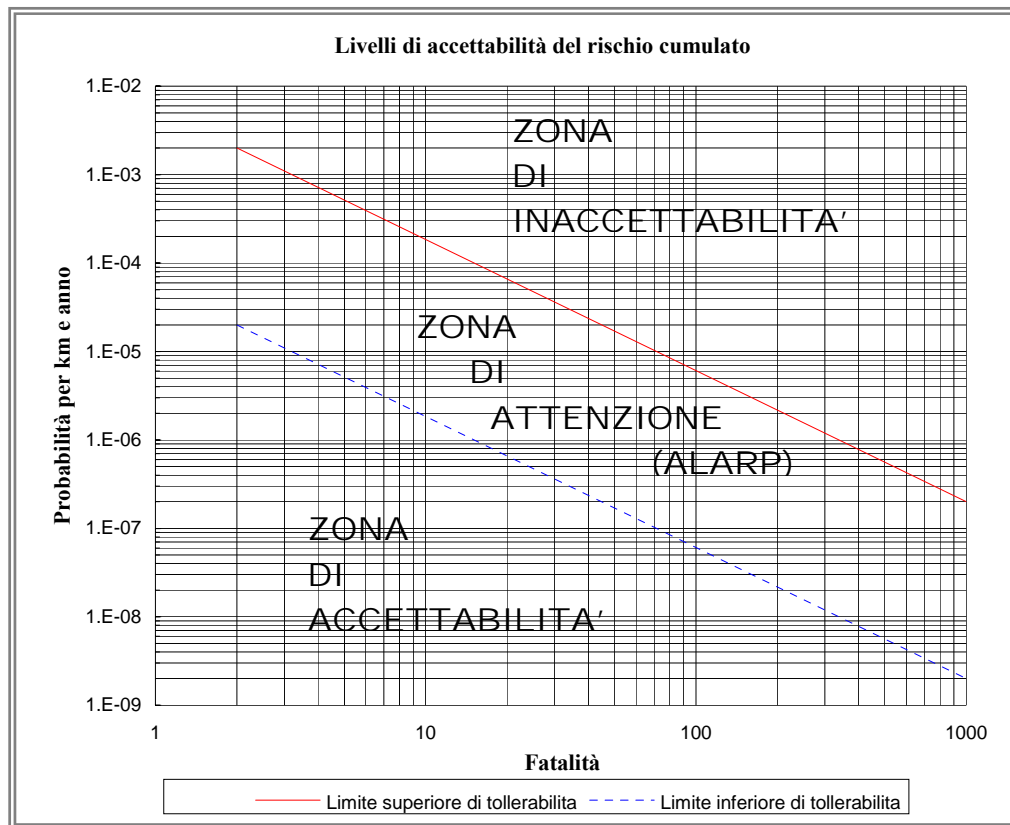


Fig.5: Livelli di accettabilità del Rischio Cumulato nelle gallerie ferroviarie ex D.M. 28.10.2005. Il dato della probabilità di superamento  $1-F(x)$  è normalizzato rispetto ai chilometri di percorrenza annua sulla rete

Il decreto, attraverso l'introduzione dei Requisiti di Sicurezza obbligatori, mira a neutralizzare l'effetto del confinamento sulla pericolosità dell'incendio e sulle difficoltà di esodo e quindi a riportare le condizioni di sicurezza ad un "equivalente cielo aperto", senza aumentare in modo significativo per i passeggeri il rischio ferroviario ordinario quando si percorrono tratti in galleria. Gli indicatori RI e RC si riferiscono agli effetti complessivi degli eventi pericolosi di collisione, deragliamento ed incendio, ma è tuttavia possibile identificare i contributi dei singoli pericoli e verificare che le rispettive conseguenze siano compatibili con i criteri di accettabilità.

In definitiva, nello spirito del decreto, l'indicatore RI, con riferimento alla definizione offerta prima, caratterizza il rischio incrementale per un passeggero di rimanere vittima durante un incidente che si verifichi in galleria e che dia eventualmente luogo ad incendio; riguarda essenzialmente i rapporti tra gestore e passeggeri in termini di livello di sicurezza del servizio offerto nonché tra gestore e soccorritori che intervengono a gestire l'emergenza.

L'indicatore RC invece, se visto in termini di periodi di ritorno relativi ad eventi disastrosi a gravità crescente, è adatto a qualificare il livello di sicurezza complessivo offerto a lungo termine dal sistema di gallerie presenti sulla rete.

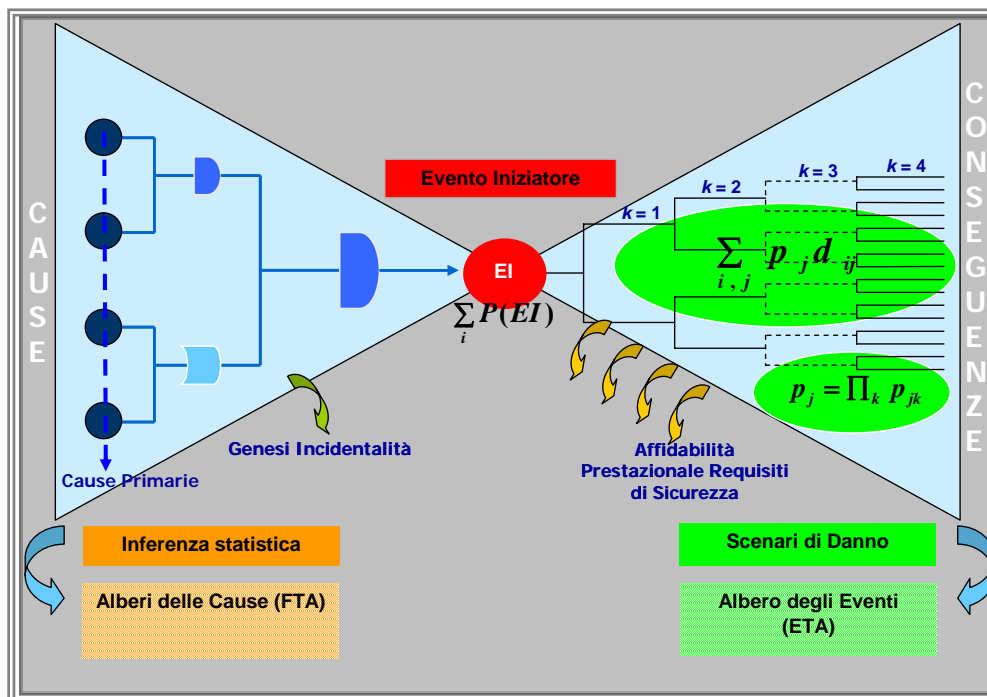
Nell'Allegato III del D.M. vengono precisate la metodologia generale nonché lo schema indicativo delle fasi operative dell'analisi di rischio che è necessario seguire per calcolare i valori degli indicatori RI e RC (Allegato III, D.M. 28.10.2005).

#### 4 Metodologia di Analisi di Rischio

La misura quantitativa del livello di sicurezza e quindi del rischio si può realizzare adottando opportuni indicatori come quelli introdotti prima.

Gli eventi critici iniziatori sono determinati da pre-condizioni (cause) e possono evolvere a seconda delle condizioni al contorno e della eventuale presenza ed efficacia di sistemi di protezione, mitigazione e facilitazione a scenari di fine emergenza caratterizzati da diversi 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 pre-condizioni (cause) e gli effetti (conseguenze): tale rappresentazione logico-strutturata della sequenza degli eventi è rappresentata nella figura che segue e definita nella letteratura anglosassone Bow-Tie Model.



**Figura 6: Bow-Tie Model**

Il lato sinistro da conto dei possibili effetti delle misure preventive in termini di riduzione della probabilità dell’evento iniziatore. Il lato destro si riferisce agli effetti di mitigazione della severità delle conseguenze e della facilitazione delle condizioni di autosalvamento e soccorso.

Di seguito di discutono brevemente le finalità e le caratteristiche degli strumenti metodologici utilizzati per la valutazione delle probabilità degli eventi iniziatori e di quelli di fine emergenza.

- **Analisi ad Albero delle Cause** (FTA: Fault Tree Analysis): si configura come un procedimento di decomposizione di un evento critico iniziatore in sottoeventi logicamente connessi in modo tale da individuare sequenze di eventi che conducono al verificarsi dell’evento critico.
- **Analisi ad Albero degli Eventi** (ETA: Event Tree Analysis): si configura come una 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, che risulterà caratterizzato da una probabilità di accadimento e da un livello di gravità delle conseguenze di danno.

Dall’insieme dei valori stimati di probabilità e gravità relativi ai suddetti scenari alternativi di fine emergenza, è possibile calcolare i valori quantitativi degli indicatori.



In particolare, i vari percorsi alternativi di evoluzione degli scenari di pericolo non rappresentano altro se non gli ambiti e le prestazioni delle componenti materiali ed impiantistiche dei sottosistemi.

- **Misura del Danno e Analisi di Scenario:** l'analisi di scenario è un passo intermedio propedeutico alla misura del danno connesso ad ogni scenario di pericolosità di fine emergenza. Nel caso di incendio in ambiente confinato si utilizzano i simulatori termofluidodinamici computazionali che riproducono in modo quantitativo i campi tridimensionali di Temperatura, Visibilità e Tossicità generati dai processi di combustione innescati da un focolaio di incendio ed eventualmente modificati dall'azione dei sottosistemi di protezione e mitigazione.

Per la misura del danno è necessario accoppiare al simulatore di incendio un simulatore di esodo che riproduce le condizioni iniziali di distribuzione spaziale dei soggetti presenti nell'ambito del pericolo al momento dell'innescò dell'evento critico iniziatore e che ne simula i percorsi di esodo fino all'eventuale autosalvamento assumendo, per ognuno di essi, funzione velocità e modalità comportamentali eventualmente modificate dall'azione di misure di facilitazione. Le misure del danno così ottenute si riferiscono ai singoli rami dell'albero degli eventi ed insieme alle probabilità di fine ramo dell'albero degli eventi costituiscono tutti i dati necessari e sufficienti per il calcolo degli indicatori di rischio.

## 5 Considerazioni Conclusive

La tendenza di una crescente aspettativa, in termini di miglioramento del livello di sicurezza nelle infrastrutture di trasporto ed in particolare nelle gallerie, è dimostrata dagli obiettivi indicati nei testi di Direttive, Decisioni e Documenti europei ed internazionali di settore.

In particolare si osserva una crescente preferenza per i criteri di valutazione prestazionali contro i criteri puramente prescrittivi.

I metodi dell'analisi di rischio quantitativa uniti ad una progettazione integrata che include la sicurezza delle gallerie in una logica generale di sistema, sono indicati come base per misurare l'ottenimento dei livelli di sicurezza compatibili con i livelli di sicurezza prefissati.

## Bibliografia

- Direttiva Europea 54/2004/CE “On minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network”
- D.Lgs. 05.10.2006 n° 264 “Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea”
- D.M. n° 89 28.10.2005 “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie”
- Risk Analysis for Road Tunnels – working group 2 management of road tunnel safety-PIARC, 2006





## **5.2 Risk Analysis and acceptability criteria**

M. Guarascio, M. Lombardi, G. Rossi, G. Sciarra  
*Safety Engineering “Sapienza” – Rome University*

### **Abstract**

The basic concepts and tools for the Quantitative Probabilistic Risk Analysis are presented. The rationale of the risk acceptability criteria is discussed in the case of rail tunnel safety in Italy.  
*Keywords: Quantitative Probabilistic Risk Analysis, risk acceptability criteria*

### **Introduction**

In general risk analysis is a risk assessment tool which initially has been developed to investigate safety of potentially dangerous industrial processes (e.g. in the chemical industry) or potentially dangerous industrial plants (such as nuclear power plants). Now days quantitative probabilistic risk analysis is a powerful common tool in many sectors of engineering design and operating practice both industrial and civil. The application of risk analysis should help to establish a proactive safety strategy by investigating potential risks. This safety strategy was to replace merely experience-based concepts learned from incidents or accidents, that had already happened.

Generally speaking, risk analysis deal with potential negative consequences of events that could occur when considering a technical system in a social environment. The only option in such a situation is to develop a representative model of the risks associated to the system in question. As exists an unlimited number of possibilities how dangerous effects may develop it is impossible to take all possible situations into account; therefore the only investigation is restricted to a limited number of selected representative scenarios. For that reasons it should always be kept in mind that risk analysis is a model relying on preconditions and assumptions and is not a copy of reality. Nevertheless risk analysis provides a much better understanding of risk-related processes than merely experience-based concepts ever may achieve.

The characteristics of Quantitative Probabilistic Risk Analysis and its applications can be summarized as follows:

- Quantitative Probabilistic Risk Analysis is a systemic approach to analyse sequences and interrelations in potential incidents or accidents, considering the logic chain events, critical dangerous events and undesired consequences.
- Quantitative Probabilistic Risk Analysis makes the quantification of risks establishing the basis of a performance-based approach for the assessment of safety standards

Quantitative Probabilistic Risk analysis can be used:

- to check general consistency of safety planning;
- to choose between alternatives design solution;
- to demonstrate that safety standards are fulfilled, e.g. in case of deviations from prescriptions;
- to optimize safety planning in terms of cost-effectiveness.

To guarantee safety for human beings is nowadays done in many countries on the basis of prescriptive regulations: A prescriptive requirement specifies particular safety features, actions, or programmatic elements to be included in the design of building as well as tunnels or industrial processes, as the means for achieving a desired objective. The



implementation of these requirements has more or less to be done without considering the individual characteristics of a building or industrial process or a tunnel.

By contrast the process of a risk-based approach allows a structured, harmonised and transparent assessment of risks for an individual specific hazard situation including the consideration of the local risk conditions in terms of relevant influence factors, their interrelations and possible consequences of incidents for a specific case. Moreover, it allows coming up with the best additional safety measures in terms of risk mitigation and enables a comparison of different alternatives. Although risk can be reduced to very low levels, this may be considerably expensive and inappropriate to the assets to be protected. A risk based cost/effectiveness analysis ensures that the money spent to reduce risk is allocated in such a way that an optimum level of safety is obtained. Thus a risk based cost/effectiveness analysis can be the basis to assure that for every reduction of a unit of damage exactly the same unit is invested in protection.

Hence, the risk-based approach in the context of safety management offers the opportunity to get a transparent and consistent approach to decision-making about risks and can be an appropriate supplement to the implementation of measures to respect the requirements of standards and guidelines.

The implementation of Risk Analysis and Risk Assessment in the Risk Management process can be based on the following three elements:

**Risk Analysis:** Quantitative Probabilistic Risk analysis is concerned with the fundamental question: “What might happen and what are the consequences?”. In case of a quantitative analysis probabilities of accidents and their consequences for different damage indicators (e.g. in terms of fatalities, injuries, property damage, interruption of services) and the resulting risk are estimated.

**Risk Evaluation:** Quantitative Probabilistic Risk evaluation is directed towards the question of acceptability and the explicit discussion of safety criteria. For a systemic and operable risk evaluation one has to define safety criteria and to determine whether a given risk level is acceptable or not. In other words risk evaluation has to give an answer to the question “Is the estimated risk acceptable?”

**Risk and Safety Management:** If the estimated risk is considered as not acceptable, additional safety measures have to be proposed. Therefore the effectiveness and also cost-effectiveness of different safety measures can be determined by using the initial frequency and consequence analysis of the scenarios which will be positively or negatively affected under the assumption that the investigated safety measure has been implemented. Planning of safety measures has to answer the question “Which measures are necessary to get a safe (and cost-efficient) system?”



## Basic of risk analysis methodology

Hazardous conditions can develop from root events which evolve and generate an initiating critical event.

From this critical event several scenarios can develop according to specific final hazard potential.

To each one hazard scenario can correspond several final consequence events according to the mode of occurrence and number of people involved.

The mentioned logical and sequential structure of events is graphically presented considering the “initiating critical event” as a “nodal point” separating the root events (“causes”) and the consequence events (“effects”).

The above described graph, usually named Bow-Tie Model, is presented in fig.1

The left hand side gives account of the prevention activities aimed to the reduction of the probability of the initiating critical event.

The right hand side shows the mitigation of the severity of the consequences due to the effectiveness of the safety systems and rescue services (the so called safety requirements).

The probabilistic operating tools used are the statistical inference techniques and Fault Tree Analysis (FTA) for the estimation of the probability of the initiating events.

The Event Tree Analysis (ETA) for the estimation of the probabilities of all the final consequence events, where the severity is evaluated with the help of specific simulators reproducing the hazard scenario (computational fluid dynamics codes in case of fire hazard) as well as exodus and rescue scenarios.

The numerical result ( $p_{jh}, d_{jh}$ ) obtained by the implementation of the methodology illustrated in figg. 1-2, namely the probabilities of the final consequence events together with the corresponding severity estimates (i.e. in terms of Number of Fatalities), are used to build up the various Risk Indicators according to given criteria (ref.1).

Here below are defined the Risk Indicators to be used in Italy, according to the government act (2005) on “Safety in rail tunnels”.

### Individual Risk Indicators

- $IR$  = Individual Risk (Probability to be “victim” in a “fatal” accident occurred in a specific tunnel in a year)
- $IR(x)$  = Point Individual Risk (Probability to be “victim” in a “fatal” accident occurred in a specific point  $x$  of a tunnel in a year).

### Societal Risk (Mode 1)

- $R$  = Expected Risk Value (Fatalities/Year-Tunnel)

### Societal Risk (Mode 2)

- $BCR$  = Back Cumulated Risk Distribution so called FN curve (Probability  $P(N \geq N_t)$  /Year-Tunnel)

where:

-  $F$  = Back Cumulated Probability

-  $N$  = Number of victims in a consequence event (Fatalities/Year-Tunnel)

-  $N_t$  = Threshold value

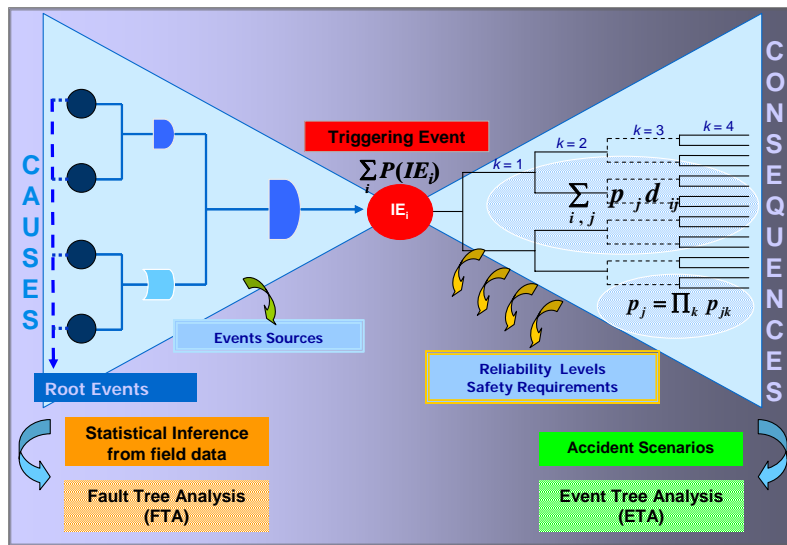


Figure 1: Bow Tie Model:  
 $P(IE_i)$  = Probability of the  $i^{th}$   $IE_i$   
 $p_j$  = Probability of the  $j^{th}$  hazard scenario  
 $p_{jk}$  = Reliability of the  $k^{th}$  safety requirement

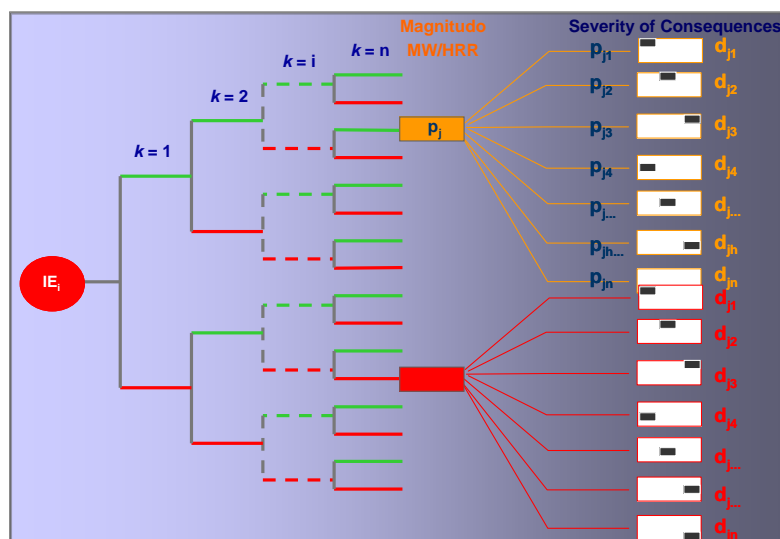


Figure 2: Event Tree Analysis  
 $p_{jh}$  = Probability of the  $h^{th}$  consequences event given the  $j^{th}$  hazard scenario  
 $d_{jh}$  = Severity of the  $h^{th}$  consequences event given the  $j^{th}$  hazard scenario

### Acceptability criteria

The decision making on the level of safety to achieve in a given sector of activity (e.g. transport, industry) and consequently the level of risk to be accepted is undoubtedly a responsibility of the governmental authorities.

The hazard potential on one side and the technical as well as operational capability to face and manage the hazard scenarios on the other should back up the decision on what level of risk is to be considered acceptable.

The historical safety performance in similar environment could also be considered in order to identify an appropriate safety target.



In quantitative and numerical terms the acceptability criteria are defined by fixing a specific threshold when considering the risk indicators like  $IR$ ,  $IR(x)$  or  $R$ .

In the case of the  $BCR$  distribution the bilog representation plane F-N is used and a straight line is located at an appropriate position and slope with the role of separation line between acceptability and unacceptability zones.

Here below are given examples of acceptability criteria included in the above mentioned governmental act in Italy regarding the “Safety in Rail Tunnels”.

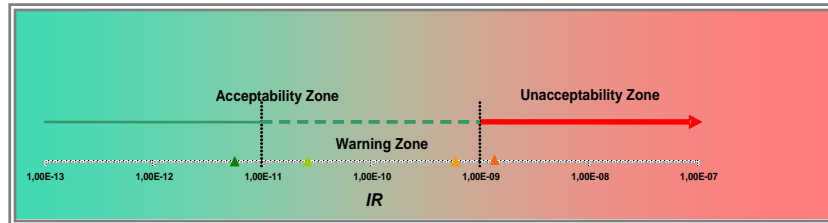


Figure 3: Individual Risk Acceptability Criterion (Italian Rail Tunnels)

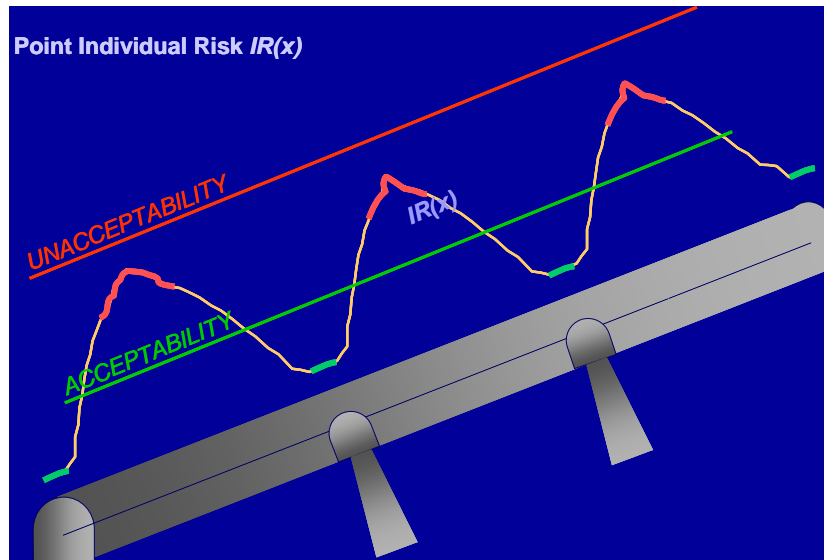


Figure 4: Point Individual Risk Criterion (Italian Rail Tunnels)

## Conclusive remarks

The Quantitative Probabilistic Risk Analysis methodology allows to measure the level of risk using specific numerical indicators and then to compare them with threshold values according to appropriate acceptability criteria.

The aim and meaning of the various indicators and criteria reflect the relationships among government, authorities, owners or operators, users and people.

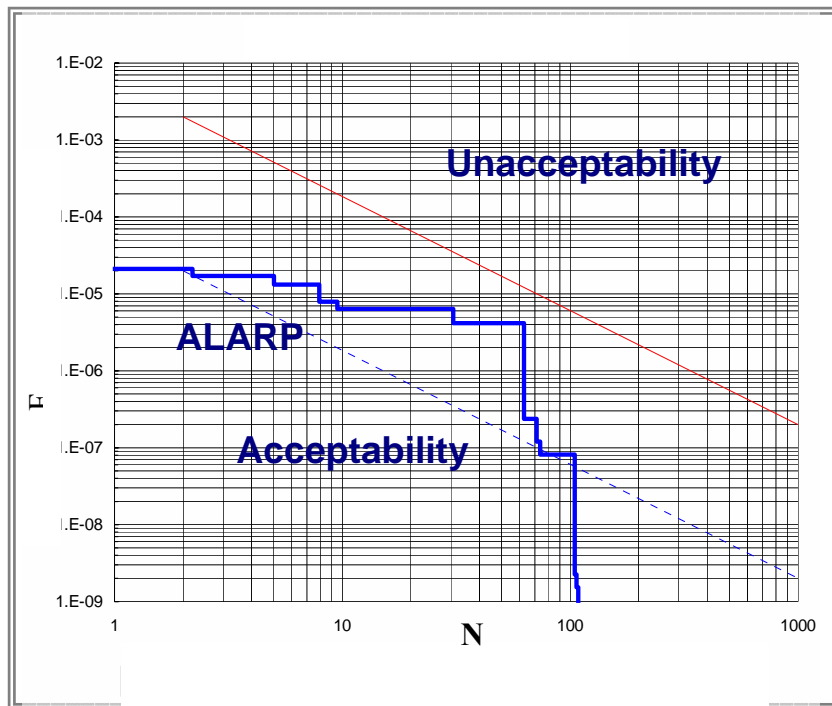


Figure 5: Societal Risk (Mode 2) Acceptability Criterion (Italian Rail Tunnels) - an example of Back Cumulated Risk Distribution

The fig. 6 schematically illustrate the specific use of *IR* and *BCR* in the framework of Rail Safety Tunnels where “*IR*” give the measure of the safety performance that the operator is able to offer to the single user whereas “*BCR*” defines the general level of the safety with respect to the target fixed by the government authorities.

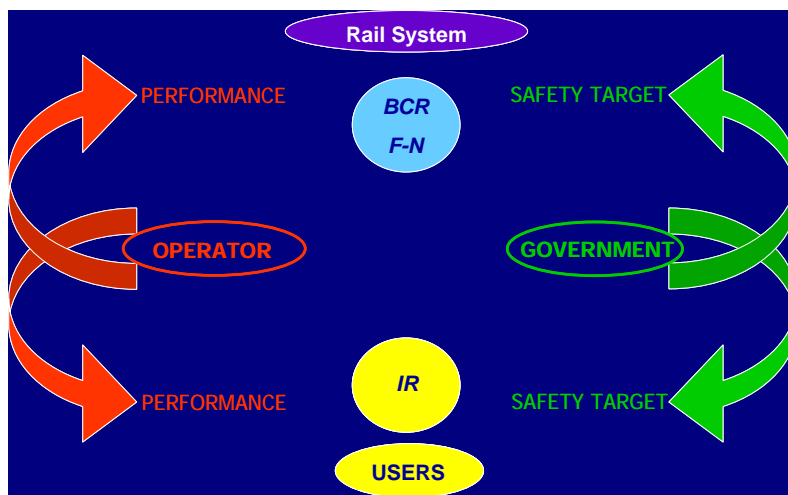


Figure 6: Rail Safety Tunnel Targets and Risk Indicators

## References

- [1] Guarascio, M. et al., *Road tunnels safety rules in Italy: the tunnel country*, Malta, Safe, 2007
- [2] EU Directive 54/2004/CE, *On minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network*
- [3] D. M. 28.10.2005, *Rail Tunnel Safety*



## **5.3 Road tunnels safety rules in Italy: the tunnel country**

M. Guarascio, M. Lombardi, G. Rossi, G. Sciarra  
*Safety Engineering “Sapienza” – Rome University*

### **Abstract**

A case study is presented illustrating the application of the Quantitative Probabilistic Risk Analysis Methodology requested in Italy for the tunnels of the motorway road network.

*Keywords: Quantitative Probabilistic Risk Analysis*

### **Introduction**

Italy in the framework of both rail and road network of the European Union holds significantly more than the half of the overall length to be ran in tunnel.

That’s why Italy can be considered the veritable “Tunnel Country”.

Now days the European and Italian authorities are very active and productive as for as tunnels safety rules are considered.

Expert’s communities perceived the Authorities concern with respect to the tunnels safety conditions.

See for instance the European Directive [54/2004/CE] “on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network” as well as the two Italian governmental acts [D.M. 25.10.2005] “Rail Tunnel safety” and [D. Lgs. 05.06.2006] “Actuation of the D.54/2004/CE”.

The aim of all the above acts is to upgrade the expected level of safety in tunnels.

The expectation of a higher level of safety is clearly declared in the Italian acts, both for rail and road cases, where are indicated in quantitative form the values to be achieved as well as criteria and procedure for demonstrating the above results.

The achievement of the requested level of safety occurs when in a specific tunnel with given traffic, length and design only if exist an adequate number of safety requirements operating at an appropriate level of performance.

These requirements consist of infrastructural measures, like the emergency exits, or technological subsystems like ventilation and smoke control, lighting, monitoring and communication.

The rules of course take into account the specific features and hazard conditions of the rail and road environments.

In the rail world the maximum number of people involved in a fire tunnel accident could be of the order of magnitude 1000 whereas in the road case is of 100.

The emergency exits offer different conditions of exodus and consequently different times for the evacuation from the



fire and smoke zones. In the case of road tunnels in Italy emergency exits should be compulsory located at minimum 500 m distance apart

The fire size, in terms of Heat Release Rate (HRR), megawatts (MW), temperature and smoke flow along the time in the case of rail tunnels has been identified with the reference value of 10 MW, whereas in the road case the values should range from 15 MW to 150 MW according to the specific traffic and transport conditions.

As for as the air and smoke flow control in the road tunnels ventilation and air control system should be provided with a performance level increasing significantly when the length and traffic increase as well.





## Risk analysis for road tunnels: Italian rules

Definition of the problem

The Table shown ten types of tunnels whose reference values (European Directive 2004/54/EC / D. Lgs. 05.06.2006 “Actuation of the D.54/2004/CE”, Italian Act), for the safety parameters length (L) and traffic volume (A.A.D.T. – Annual Average Daily Traffic), comply with ten specific sets of minimum safety requirements.

The Table below summarizes the ten types of tunnel.

**Test tunnels: safety parameters versus safety requirements**

	500 <L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	L>3000
<b>Unidirectional tunnel</b>					
T < 2000 v/l-d	I	II		IV	V
T > 2000 v/l-d			III		
<b>Bidirectional tunnel</b>					
T < 2000 v/l-d	VI	VII			
2000 < T < 10000 v/l-d			VIII	IX	X

Roman numerals identify safety requirement groups  
The value T = 10000 v/l d identifies the transition to twin tube tunnels

Figure 7: Types of tunnel

Two examples of safety requirements groups are given below

IV Group  $\left\{ \begin{array}{l} 1000 < L < 3000, \\ T > 2000 \text{ v/l-d} \end{array} \right.$

- Walkways
- Slope < 5%
- Emergency exits  $\leq 500\text{m}$
- Lay-bys every 1000 m
- Access for emergency services
- By pass outside the portal
- Drainage (ADR)
- Fire resistance and fire reaction of structures and materials
- Ordinary –Emergency lighting system
- Emergency ways lighting system
- Ventilaiton system
- Emergency station
- Water supply
- CCTV
- Incident and fire detection systems
- Traffic lights
- Radio communications for users (FM) and emergency services
- Loudspeaker system for shelters
- Power supply
- Fire resistance and fire reaction of devices

V Group  $\left\{ \begin{array}{l} L > 3000, \\ T > 2000 \text{ v/l-d} \end{array} \right.$

- Walkways
- Slope < 5%
- Emergency exits  $\leq 500\text{m}$
- Lay-bys every 1000 m
- Access for emergency services
- By pass outside the portal
- Drainage (ADR)
- Fire resistance and fire reaction of structures and materials
- Ordinary –Emergency lighting system
- Emergency ways lighting system
- Ventilaiton system
- Requirements for semi-transverse ventilation systems
- Emergency station
- Water supply
- Control Center
- CCTV
- Incident and fire detection systems
- Traffic lights
- Radio communications for users (FM) and emergency services
- Loudspeaker system for shelters
- Power supply
- Fire resistance and fire reaction of devices

Figure 8: Safety Requirements Groups IV, V



The European Directive does not explicitly fix any upper limit for the safety parameters as length (L) and traffic volume (AADT).

An analysis of the rate of road accidents versus traffic volume, carried out on the basis of data relative to the Italian motorway network, shows that the regression curve presents an abrupt change in slope:

- for unidirectional tunnels the critical value of the traffic volume is 15000 vehicles/ lane day.
- for bidirectional tunnels the traffic volume value of 10000 vehicles/ lane day.

A similar analysis of the casualty and fatality rate due to fires in the tunnel versus tunnel length, carried out on the basis of data contained in the PIARC document (1999), and updated to 2005, has led to the identification of the following reference values:

- for unidirectional tunnels the safety parameter limit value for length (L) is 5000 m;
- for bidirectional tunnels the safety parameter limit value for length (L) is 3000 m.

In the framework of a performance-based approach to the design of transport systems (IEC Regulation n° 61508) attributes specific performance functions to the safety subsystems (i.e. D. Lgs. “Road tunnel Safety”). Moreover, each safety subsystem is characterized by a specific level of integrity expressed in terms of reliability.

The above observations suggested the introduction of the following auxiliary concepts.

**Virtual tunnel:** a tunnel that wholly complies with the provisions of the European Directive in terms of both safety parameters and minimum requirements and for which the safety subsystems that implement the minimum requirements are characterized by ideal reliability and efficiency.

**Theoretical tunnel:** an existing tunnel, or its upgrading design, or a final design of the new tunnel, where not all the safety requirements are adopted, but it behaves according to ideal reliability and efficiency.

**Actual tunnel:** an existing tunnel, or its upgrading design, or a final design of the new tunnel, where not all the safety requirements are adopted but it behaves according to actual reliability and efficiency as per best practices.

The developed risk analysis procedure adopts the F-N plane for representing risk.

The straight line tangent envelope to the Back Cumulated Distributions (B.C.D.) derived from the Event Tree Analyses associated with virtual tunnels defines a reference limit condition on the risk representation plane.

According to the risk analysis presented below, the virtual tunnels are used as references in determining the risk level of actual tunnels.

The presented risk analysis procedure assumes the performance-based design of the structure as the characterizing feature of the tunnel safety design.

## **Steps of the quantitative probabilistic risk analysis methodology**

The essential steps in the proposed Quantitative Probabilistic Risk Analysis procedure are:

- Characterization of the tunnel structure: Structural measures, systems measures
- Identification of the sources of hazard and corresponding incident rate: Passenger cars, coaches, heavy goods vehicles
- Identification of potential hazards: Mechanical- thermal, chemical-thermal



- Characterization of Hazard Scenarios: Probability of triggering events, energetic characterization of sources, event tree analysis (ETA)
- Quantification and zoning of the hazard flow in the tunnel: Field of airflow, temperature, concentration of combustion products (models for mass transport and energy), Size of the lethal hazard zones (effective fractional dose)
- Quantification of the damage: Exposed population (models of vehicle queues), Fatalities (models for the evacuation process)
- Risk estimation and risk representation: Damage Expected Values, Back Cumulated Distributions (**B.C.D.**)
- Risk evaluation: Comparison of Back Cumulated Distributions (**B.C.D.**) to predefined reference terms and acceptability criteria

### Event Tree Analysis

The Event Tree represents the risk estimation tool adopted in the proposed procedure. It includes the impact that the safety subsystems, expressed in terms of dependability (reliability and efficiency), have on the evolution of the hazard flow in the tunnel system along an emergency scenario (S<sub>j</sub>).

The issues of the Event Tree Analysis (see art. “Risk Analysis and acceptability criteria” [1, 5]) repeated for a representative complete group of Initiating Events and developed up to the severity of consequences events evaluation, are used to calculate the various Risk Indicators.

As for as the fire hazard is considered in the case of the motorway network in Italy, according to the average traffic conditions it seems appropriate to adopt as independent initiating events fire accidents with thermal HRR ranging from 15 to 150 according the different class of vehicles and transported goods.

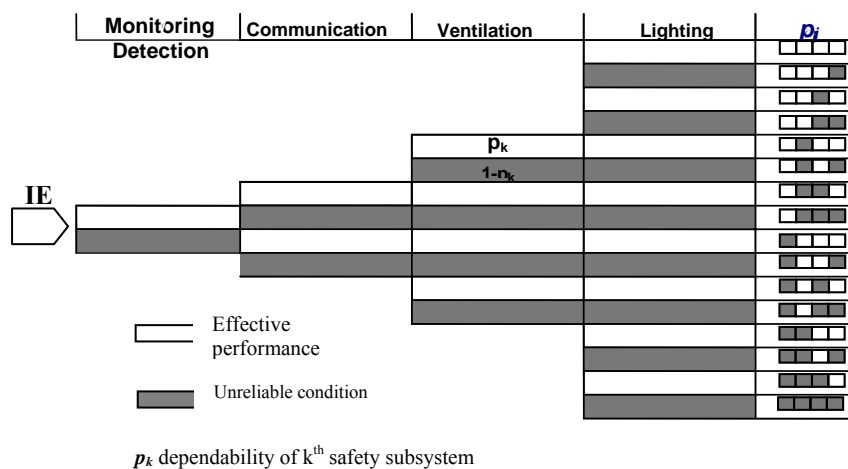


Figure 9: Event Tree Analysis

A study must be able to explain the effectiveness of the safety requirements on the risk level reduction when different significant values of the safety parameters length and traffic are assumed, for each value of fire hazard in terms of H.R.R.

The most appropriate risk indicator in the above case to be use is the expected value of the number of fatalities  $N$  conditioned by the occurrence of a given Initiating Event ( $HRR_i = 15, \dots, 150 \text{ MW}$ ) and by the existence of the requested safety requirements offering the effective performance.

In the example below the Test Tunnels corresponding to the extreme values of the  $L$  and  $T$  defining the groups of safety requirements have been simulated by using a 3D CFD code and Exodus simulator considering the maximum crowded traffic condition (150 people in fire and smoke influence area).

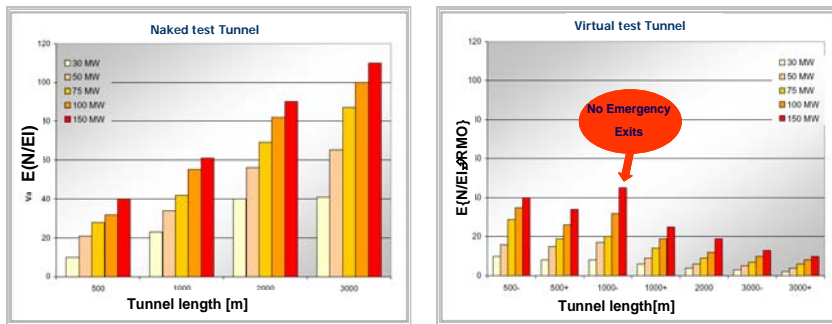


Figure 10: Left- Conditioned Expected Value of N (no Safety Requirements); Right- Conditioned Expected Value of N (Safety Requirements)

## Case study

Description of the tunnel systems analysed [4]

The presented case study concerns:

- the application of the proposed risk analysis procedure to types V and X of virtual test tunnels in order to identify on the Plane F-N, a limit condition defined as the straight line tangent envelope to the back cumulated distributions associated with virtual test tunnels;
- the application of the proposed risk analysis procedure to three existing tunnels of the Italian road network that present various deficits with regard to the minimum safety requirements.

The tables presented below give the characterising values for virtual test tunnels types V and X.

<b>Name</b>	<b>TEST Tunnel Type V</b>
Tunnel System	Unidirectional
Tunnel Length [m]	5000
Lanes	2
Traffic (annual average daily traffic-v/d. l.)	15000
Heavy goods vehicles [%]	15
Emergency Exits Distance [m]	500
Minimum Requirements Deficit	-

<b>Name</b>	<b>TEST Tunnel Type X</b>
Tunnel System	Bidirectional
Tunnel Length [m]	3000
Lanes	1
Traffic (annual average daily traffic-v/d. l.)	10000
Heavy goods vehicles [%]	15
Emergency Exits Distance [m]	500
Minimum Requirements Deficit	-

<b>Name</b>	<b>Autostrade</b>
Tunnel System	Unidirectional
Tunnel Length [m]	3200
Lanes	2
Traffic (annual average daily traffic-v/l-d)	5500
Heavy goods vehicles [%]	10
Emergency Exits Distance [m]	700
Minimum Requirements Deficit	1-Emergency Exits Distances. 2- Water supply. 3-Drainages.

<b>Name</b>	<b>ANAS 1</b>
Tunnel System	Unidirectional
Tunnel Length [m]	3200
Lanes	2
Traffic (annual average daily	12000



traffic-v/l·d)  
 Heavy goods vehicles [%] 10  
 Emergency Exits Distance [m] 450  
 Minimum Requirements Deficit -

**Name** ANAS 2  
**Tunnel System** Bidirectional  
**Tunnel Length [m]** 2400  
**Lanes** 1  
**Traffic (annual average daily traffic-v/l·d)** 10000  
 Heavy goods vehicles [%] 10  
 Emergency Exits Distance [m] 800-1200  
 Minimum Requirements Deficit 1- Emergency Exits Distances.

The diagram presented below shows the Back Cumulated Distributions (**B.C.D.**) for virtual tunnels of types V and X.

The straight line shown in the diagram, represents the envelope that is tangent to the Back Cumulated Distributions (**B.C.D.**) associated with virtual tunnels, and it defines a reference limit condition.

The diagram presented below shows the Back Cumulated Distributions (**B.C.D.**) for virtual tunnels of types V and X.

The straight line shown in the diagram, represents the envelope that is tangent to the Back Cumulated Distributions (**B.C.D.**) associated with virtual tunnels, and it defines a reference limit condition.

The tree diagrams below show the **B.C.D.** for three existing tunnels of the Italian road network.

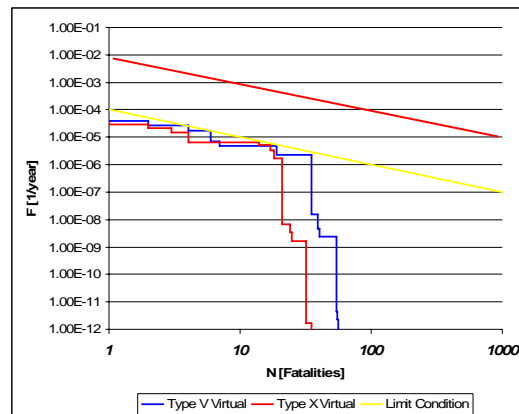


Figure 11: B.C.D. for V.T. of types V and X

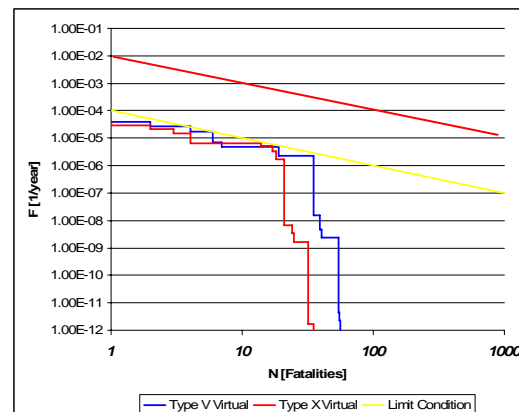


Figure 12: Virtual, Theoretical, Actual B.C.D. of the “Autostrade”

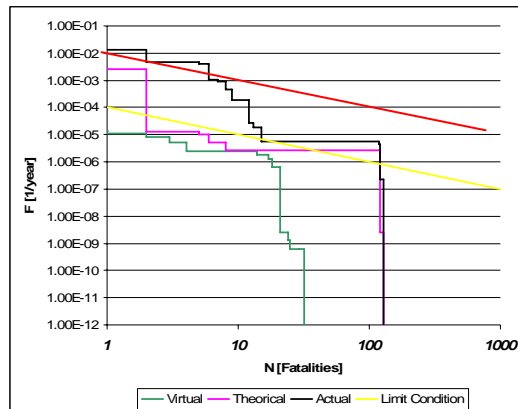


Figure 13: Virtual, Theoretical, Actual B.C.D. of the “ANAS 1”

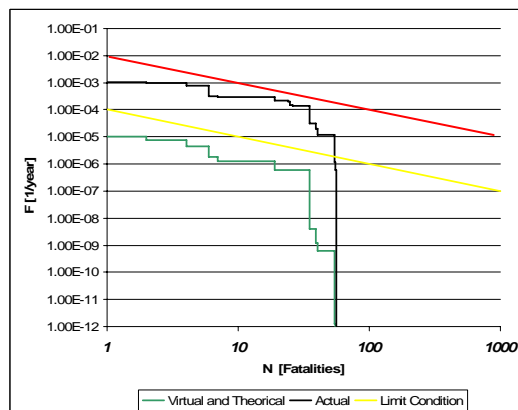


Figure 14: Virtual, Theoretical, Actual B.C.D. of the “ANAS 2”

## Conclusive remarks

The results of the risk analysis obtained according to the proposed procedure can be a decisional-making tool for the Administrative Authority (Article 4, European Directive 2004/54/CE). The European Directive as been completed and supplemented by an Italian Government Authorities act where are included appropriated criteria for both risk comparative analysis and absolute acceptability limit and relative ALARP Zone.

## References

- [4] Guarascio, M. et al., *Risk Analysis and acceptability criteria*, Malta, Safe, 2007
- [5] EU Directive 54/2004/CE, *On minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network*
- [6] D. Lgs. 05.06.2006, *Road Tunnel Safety*
- [7] *Risk Analysis for Road Tunnels*, working group 2 management of road tunnel safety, PIARC, 2006
- [8] Cafaro, E. et al., *Metodo di progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali*, Torino, INTERTunnel 2006, convegno SIG, maggio 2006



***“Analisi di Rischio per gallerie ferroviarie”***



## **5.4 Procedura “La Sapienza” per l’analisi semplificata del rischio in galleria ferroviaria**

### **1. Premessa**

La procedura di seguito presentata nasce dall’applicazione critica di metodi probabilistici di valutazione del rischio secondo alberi delle cause e degli eventi (Event Tree Analysis e Fault Tree Analysis) combinati a studi di scenario.

La procedura si basa sulla classificazione delle caratteristiche strutturali e tecniche dei componenti il sistema treno/galleria proposta da Italferr attraverso una analisi critica sinottico – comparativa di tutte le norme in materia esistenti.

### **2. Caratterizzazione e misura quantitativa del rischio attraverso l’analisi degli eventi e delle cause**

L’analisi ad albero degli eventi (ET) e l’analisi ad albero delle cause (FT) è necessariamente preceduta da una accurata valutazione del sistema ingegneristico in esame come ad esempio il “Sistema di Trasporto Ferroviario”. In particolare è in questa fase necessario realizzare quattro tipi di collezioni informative:

- i DATI del sistema, da esso direttamente ricavati o ottenuti secondo valutazioni in analogia da sistemi simili;
- le FONTI DI RISCHIO del sistema che comprendono il fattore umano, le procedure e in generale l’organizzazione produttiva nell’ambito della quale tali fattori interagiscono;
- la SCENARIZZAZIONE, che consiste nel definire scenari verosimili caratterizzati dalla realizzazione del flusso del pericolo;
- i BERSAGLI, che rappresentano i soggetti / oggetti esposti che subiscono danno a seguito del flusso del pericolo.





Tale analisi preliminare consente un affinamento della valutazione del sistema e contribuisce a riconoscere sia gli indicatori caratteristici di ciascuno degli ambiti precedentemente definiti sia quelli complessivi del sistema. Tali indicatori (variabili di stato, variabili aleatorie, condizioni booleane...) sono complessivamente tra loro in relazione a comporre un sistema di condizioni analitiche e logiche che descrive in modo efficace e sintetico lo stato del sistema in modo tale che corrisponde una n-pla di valori (in senso lato) degli indicatori corrisponda a una opportuna classe di configurazioni del sistema.

Questo insieme di valutazioni è realizzato attraverso la convergenza delle competenze di tutti i soggetti in relazione col sistema in esame, e in particolare:

- i professionisti responsabili del progetto e/o della gestione del sistema;
- gli addetti alle fasi produttive particolari;
- le autorità di controllo;
- gli istituti di ricerca;
- la rappresentanza politica della pubblica opinione in generale e della popolazione sensibilmente influenzata dal sistema in esame (in qualità di cliente, fruitrice del servizio, residente prossimale l'impianto).

La raccolta di tali elementi di studio preliminare richiede una contestuale valutazione sull'affidabilità del dato e sulla sua oggettività strumentale. In particolare è necessario che siano garantite:

- rappresentatività;
- veridicità;
- completezza.

La rappresentatività è una condizione rispettata dai dati relazionati in modo consistente agli indicatori valutati consistenti ai fini della descrizione dello stato del sistema.

La veridicità garantisce sulla provenienza del dato rispetto ad errori di carattere procedurale e rispetto alla professionalità dell'operatore che ne ha curato la collezione.

La completezza è una condizione che garantisce rispetto ad assenze di osservazioni e reticenze, colposamente o dolosamente motivabili.

La possibilità dell'applicazione dei metodi di analisi precedentemente descritti è condizionata al rispetto assoluto delle precedenti condizioni, senza le quali il risultato scientifico – ingegneristico scade a mera opinione.



Sotto tali condizioni il metodo congiunto FTA – ETA consente la valutazione del comportamento del sistema in relazione al verificarsi di sue particolari configurazioni a qualunque soggetto (competente) interessato, motivato da necessità di carattere professionale (valutazione in fase di progetto, studi di revisione, analisi sulla gestione, attività di controllo autoritativa...) o di carattere scientifico (ricerca applicata e teorica sui sistemi e sulla sicurezza), sia in un’ottica di previsione che al fine di ricostruire uno scenario incidentale realizzatosi.

La realizzazione di un FT muove dalla necessità di definire le realizzazioni parziali (sottoeventi) generanti un Top Event (TE - guasto, incidente).

Dato un sistema ingegneristico possiamo definire come TE l’assunzione effettiva o inevitabile di una configurazione del sistema cui si associa un valore della funzione di stato caratterizzante superiore ad un valore di soglia ritenuto limite.

La metodologia ha il pregio essenziale di schematizzare la genesi del TE secondo il seguente semplice processo logico: a partire da una valutazione statistica delle singole realizzazioni dei sottoeventi e basandosi su concetti elementari di logica booleana (introduzione degli operatori AND / OR) l’uso di strumenti di calcolo probabilistico permette di determinare la probabilità di accadimento del TE.

La potenza teorica del metodo viene effettivamente espressa nella doppia ipotesi di:

- corretta definizione del TE;
- completezza delle realizzazioni parziali generanti il TE (percorsi critici).

A questo fine è necessario che il gruppo di lavoro abbia una conoscenza accurata del sistema, che garantisca una competenza fenomenologica, congiunta ad una necessaria terzietà intellettuale rispetto alla sua effettiva (teorica e pratica) gestione, e che sia presente nel gruppo una competenza empirico – statistica.

Queste condizioni consentono la realizzazione di un FT che comprenda tutti i percorsi critici possibili e assegni a ciascuna singola realizzazione la corretta probabilità di realizzazione.

Concettualmente il sistema si carica di un potenziale di pericolo durante il percorso critico e raggiunta la realizzazione del TE si assiste alla liberazione di tale potenziale sotto forma di flusso del pericolo.

Per la valutazione della probabilità di accadimento del singolo sottoevento si possono utilizzare anche dati e serie storiche, che consentono quindi una valutazione della probabilità su base



frequentista, o si può procedere ad assegnazione di probabilità soggettiva motivata da esperienza e competenza, raccogliendo elementi di valutazione dal contorno all'evento o da eventi in analogia con quello in esame. E' altresì possibile avvalersi di processi di limitazione dell'incertezza riuscendo comunque a chiudere in un intervallo definito il campo di variabilità dell'incognita  $P(E)$ .

L'analisi così sviluppata rappresenta una analisi dei guasti o delle cause, cui è quindi associata la seconda analisi ET che procede alla identificazione e gerarchizzazione degli eventi o conseguenze, cioè allo studio dell'evoluzione del sistema una volta realizzato il TE. L'analisi, in analogia con quanto visto per lo studio del FT, richiede completezza dei percorsi generati dal TE.

Tale completezza si ottiene valutando tutte le possibili combinazioni e, per ciascuna combinazione possibile, tutte le possibili interazioni tra le fonti del pericolo e i bersagli nello scenario caratterizzato dal TE. Si può utilizzare a tale scopo la matrice di adiacenza che consente di valutare le possibili interazioni tra tutte le entità che in modo diretto o indiretto entrano nel quadro di studio; in questo caso si procede come segue: si dispongono le varie entità di processo (operatori, macchinari, materiale, strutture, infrastrutture) una per ogni riga e per ogni colonna, in modo tale che la generica cella  $a_{ij}$  corrisponda all'interazione dell'entità associata alla riga  $i$  con quella associata alla colonna  $j$ ; gli elementi sulla diagonale corrispondono all'interazione di una variabile di processo con se stessa.

La procedura segue le evoluzioni del sistema fino al raggiungimento, per ciascun percorso evolutivo, di una configurazione stabile del sistema, cioè di un valore stazionario (di minimo) di potenziale del pericolo. Ogni percorso di sviluppo avrà in tal modo realizzato una evoluzione di scenario completa, rispetto alla quale risulta possibile procedere alla valutazione dei danni.

La valutazione sulle conseguenze procede alla valutazione del danno materiale verso le cose (alle infrastrutture esterne e interne al sistema, all'ambiente), del danno verso persone (in termini di morti, feriti gravi, lievi) e del danno sociale, in relazione ad esempio alla reazione della pubblica opinione all'accadimento e alle conseguenze di carattere economico derivanti.

La stima di tali grandezze avviene in genere attraverso l'utilizzo di modelli di simulazione che consentono di valutare l'evoluzione del sistema in occasione di accadimenti caratterizzati da grande liberazione di energia (modelli meccanici 2D e 3D agli elementi finiti o alle differenze finite per la valutazione dell'evoluzione dello scenario in caso di studio di sicurezza strutturale, modelli di simulazione idraulica, modelli box o gaussiani per la dispersione in atmosfera di gas...). Si procede quindi alla valutazione del danno nei termini presentati.



Il risultato complessivo di una analisi integrata così realizzata può essere presentato in un quadro sinottico dove a ciascun TE è assegnata la stima della  $P(E)$ , composta dalla probabilità stimata dei singoli percorsi critici generanti, e una serie di scenari evoluti, ognuno dei quali corredato di una stima articolata dei danni e della probabilità associati alla sua realizzazione.

Un ulteriore fase analitica può realizzare, per ogni foglia dell'ET, la condensazione di tali indicatori di danno in una sola etichetta valutativa trasformando i dati ottenuti dai calcoli con modelli di simulazione e valutazioni empiriche (numero di morti, feriti gravi, lievi, danni alle strutture) in moneta equivalente, sfruttando i fattori di conversione utilizzati dalle compagnie assicurative per liquidare il danno biologico. E' comunque possibile stabilire fattori di conversione differenti, ponderando i danni secondo valutazioni diverse che attengono alla sfera delle responsabilità politiche.

Tale risultato consente di realizzare le scelte operative e di ottimizzare gli investimenti sul sistema ai fini del miglioramento della prestazione in relazione alla scelta (politica) su quale/i rischi operare in mitigazione.

### **3. Definizione generale del problema**

Lo procedura proposta consente di trattare il tema “rischio in galleria” attraverso la definizione di macroeventi, articolati in macrofasi e macrocomponenti, secondo una procedura sintetica e completa. Tale procedura non pretende di definire un canone standard per ogni analisi di rischio, relativamente al tema specifico dei rischi in galleria in fase di esercizio; al contrario vuole semplicemente fornire un metodo semplificato che permetta di caratterizzare la classe di soluzioni progettuali (identificate rispetto ad un opportuno set di parametri caratterizzanti) per le quali non debba essere richiesta una dettagliata analisi di rischio.

Con riferimento all'insieme di “*Requisiti di sicurezza per le gallerie ferroviarie*” individuati da ITALFERR (si veda documento allegato), la procedura semplificata proposta definisce un metodo di analisi per la validazione di tali requisiti non solo come condizioni necessarie alla sicurezza in galleria ma anche come condizioni sufficienti. Il criterio di validazione si basa sul concetto di rischio e dunque su un opportuno procedimento di analisi decisionale (DA).

L'idea di base è quella di un approccio integrato basato sulle citate tecniche ETA e FTA, per l'analisi dello scenario “Emergenza in Galleria” che in questo contesto si intende ben descritto dall'insorgenza dei seguenti scenari ( si veda [TAV 1]):



- **INCENDIO ( $S_1$ );**
- **DERAGLIAMENTO ( $S_2$ );**
- **COLLISIONE ( $S_3$ ).**

A questi si debbono aggiungere per completezza i casi di:

- **ATTO VANDALICO;**
- **ATTENTATO;**

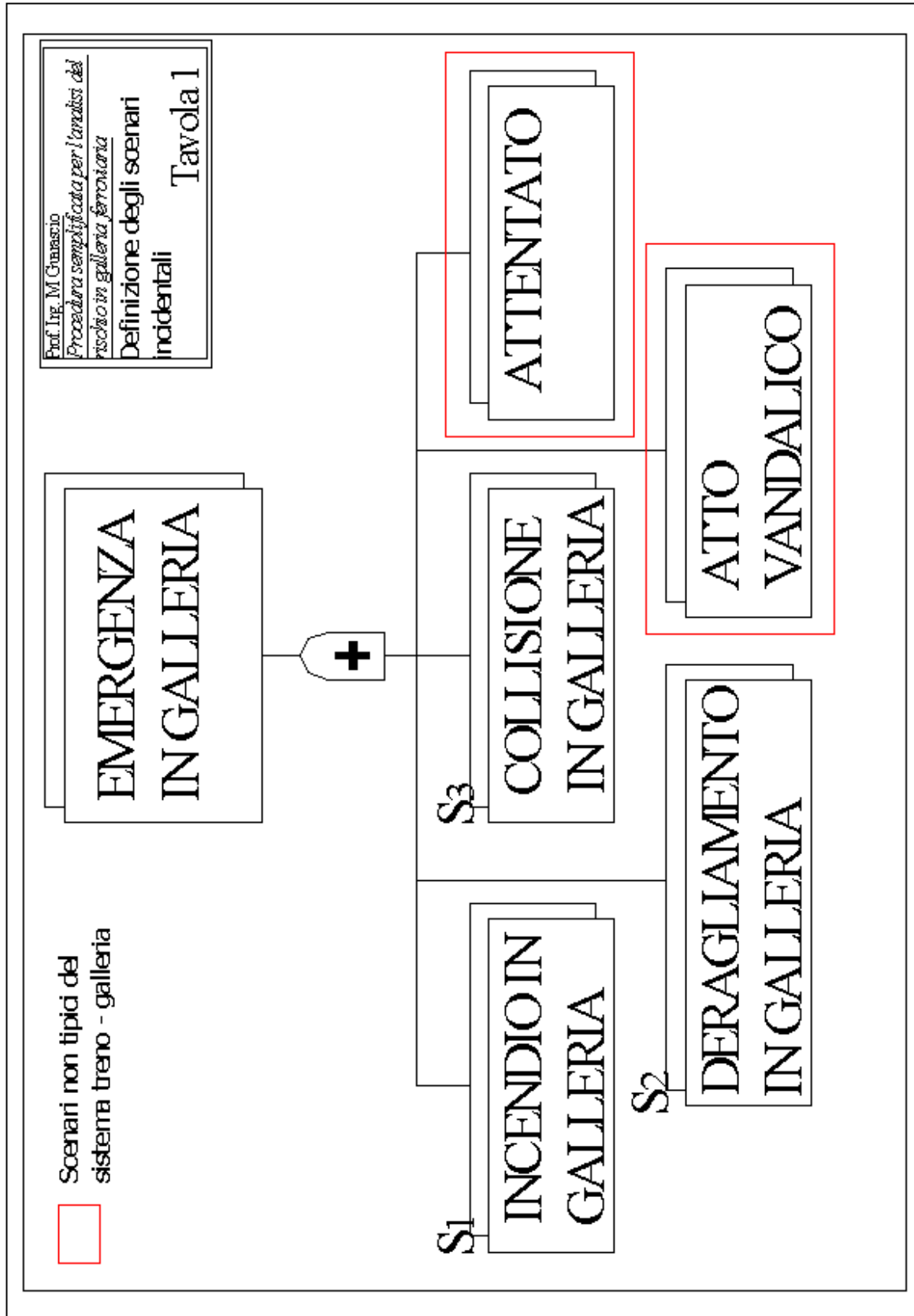
la cui trattazione non rientra nell'oggetto dello studio dal momento che questi non rappresentano scenari incidentali tipici del sistema treno – galleria in analisi.

I tre scenari (macroeventi) considerati si assumono mutuamente disgiunti, vale a dire che non si dettaglia la possibilità che ad un deragliament (o ad una collisione) faccia seguito un incendio, che ad una collisione faccia seguito un deragliament (o viceversa) etc ... Sulla base di tale ipotesi lo scenario globale sarà caratterizzato da un livello di rischio somma dei singoli livelli di rischio associati a ciascun macroevento.

E' importante sottolineare come un'analisi ET in generale prescinda dall'analisi delle cause di innesco dell'evento iniziatore o di scenario preso in considerazione; tale analisi quindi non pone l'accento sulla probabilità che l'evento iniziatore si verifichi, ma sulla probabilità che si verifichino date conseguenze a seguito del verificarsi (certo) del suddetto evento critico.

E' tuttavia ragionevole sviluppare la medesima procedura di analisi ET parametrizzando le probabilità di accadimento degli otto eventi conseguenza rispetto alle probabilità degli eventi iniziatori; in questo modo fissato un livello di rischio ritenuto accettabile (secondo un criterio del tipo di quello adottato in Olanda) sarà possibile determinare la combinazione tra le probabilità di accadimento dei citati eventi iniziatori di scenario che garantisca il livello di rischio assunto (di seguito indicata come vincolo di accettabilità). Tale procedura inversa presenta l'innegabile vantaggio di richiedere solamente una verifica a posteriori sull'effettiva compatibilità del vincolo di accettabilità piuttosto che un'analisi dettagliata delle cause di innesco dell'evento iniziatore.

Nel caso in cui il suddetto vincolo non sia verificato, ovvero definisca condizioni troppo severe per le probabilità di accadimento degli eventi critici iniziali, il sistema oggetto di analisi risulterà caratterizzato da un rischio in esercizio non accettabile, richiedendo dunque investimenti infrastrutturali e organizzativi supplementari rispetto a quelli specificati dai requisiti minimi.





I tre scenari incidentali di riferimento evolvono verso configurazioni stazionarie di fine emergenza caratterizzate da danni all'uomo e all'infrastruttura condizionati dal funzionamento corretto o dal malfunzionamento delle protezioni realizzate a livello di:

- **INFRASTRUTTURA ( $E_1$ );**
- **MATERIALE ROTABILE ( $E_2$ );**
- **PROCEDURE OPERATIVE ( $E_3$ );**

che rappresentano i tre sottoambiti del pericolo condizionanti l'evoluzione dell'emergenza. Lo schema generale di TAV2 riporta sinteticamente quanto ora definito.

Lo studio proposto si articola dunque nello studio ET di ognuno degli scenari presentati, ottenuto attraverso l'analisi FT di ciascun sottoambito del pericolo [TAV 3 – 11].

Per ogni sottoevento del FT si porrà in evidenza la dipendenza della probabilità di accadimento del TE di riferimento dai parametri principali caratterizzanti il sistema infrastruttura – treno:

<b>Codice</b>	<b>Parametro</b>	<b>Sottoclasse</b>	
<b>A</b>	Sviluppo della galleria		
<b>B</b>	Tipologia di traffico		
<b>C</b>	Specificità del progetto	<b>C1</b>	Presenza di deviatori / interconnessioni in galleria
		<b>C2</b>	Possibilità / impossibilità dell'incrocio di treni in galleria
		<b>C3</b>	Andamento altimetrico della galleria
		<b>C4</b>	Ambito di inserimento della galleria (urbano / extraurbano)
		<b>C5</b>	Rischi specifici agli imbocchi

Inoltre si espliciteranno le correlazioni tra il sottoevento schematizzato nel FT e la lista delle azioni protettive elementari (articolate in mitigazione del danno, autosoccorso, gestione dell'emergenza) sulla base di quanto riportato nell'allegato Italferr (di cui è riportato un estratto nel seguito).



**Azioni elementari di PROTEZIONE – livello dell’INFRASTRUTTURA**

		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>				
<b>COD.</b>	<b>AZIONI ELEMENTARI DI MITIGAZIONE</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>
<b>INFRASTRUTTURA</b>	b2	Requisiti di resistenza e reazione al fuoco				X
	b3	Rivelazione di incendio, fumo e gas		X	X	X
	b4	Sistema di controllo TVCC				X
	b5	Sistemi di estinzione incendi automatici				X
	b6	Sistemi di estrazione dei fumi / sistema di ventilazione				X
	b7	Sistema di drenaggio				X
		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>				
<b>COD.</b>	<b>FACILITAZIONE ALL'AUTOSOCCORSO</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>
<b>INFRASTRUTTURA</b>	c1	Vie d'esodo (marciapiede)	X	X	X	X
	c2	Corrimano	X	X	X	X
	c3	Nicchie				X
	c4	Segnaletica d'emergenza	X	X	X	X
	c5	Uscite / accessi		X	X	X
	c6	Collegamenti trasversali				X
	c7	Galleria parallela di servizio e di sicurezza				X
	c8	Distanze vie di fuga				X
	c9	Illuminazione di emergenza	X	X	X	X
	c10	Mezzi di comunicazione	X	X	X	X
		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>				
<b>COD.</b>	<b>FACILITAZIONE AL SOCCORSO</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>
<b>INFRASTRUTTURA</b>	d1	Sistema di interruzione e messa a terra della linea TE				X
	d2	Binari accessibili per veicoli stradali				X
	d3	Aree di soccorso all'esterno della galleria		X	X	X
	d4	Strade di accesso		X	X	X
	d5	Impianto idrico antincendio		X	X	X
	d6	Disponibilità di energia elettrica per i soccorsi		X	X	X
	d7	Affidabilità delle installazioni elettriche	X	X	X	X
	d8	Postazioni di controllo		X	X	X
	d9	Mezzi di soccorso				X
	d10	Binario senza ballast				X
	d11	Sezionamento della linea TE		X	X	X





**Azioni elementari di PROTEZIONE – livello del MATERIALE ROTABILE**

		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>					
<b>COD.</b>	<b>AZIONI ELEMENTARI DI MITIGAZIONE</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>	
<b>MATERIALE ROTABILE</b>	f1	Indicatori di deragliamento sul treno					X
	f2	Neutralizzazione freno di emergenza	X	X	X	X	
	f3	Mantenimento della capacità di movimento	X	X	X	X	
	f4	Attrezzatura di estinzione incendio a bordo	X	X	X	X	
	f5	Equipaggiamento delle carrozze viaggiatori per facilitare l'autosoccorso	X	X	X	X	
	f6	Scomposizione dei treni					X
	f7	Equipaggiamento di primo soccorso a bordo	X	X	X	X	
		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>					
<b>COD.</b>	<b>FACILITAZIONE ALL'AUTOSOCCORSO</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>	
<b>M R</b>	g1	Equipaggiamento e progetto delle carrozze per facilitare l'esodo dei passeggeri e l'accesso delle squadre di soccorso					X

**Azioni elementari di PROTEZIONE – livello delle PROCEDURE OPERATIVE**

		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>					
<b>COD.</b>	<b>AZIONI ELEMENTARI DI MITIGAZIONE</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>	
<b>PROCEDURE OPERATIVE</b>	l1	Portare il treno fuori della galleria					X
	l2	Blocco della circolazione					X
		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>					
<b>COD.</b>	<b>FACILITAZIONE ALL'AUTOSOCCORSO</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>	
<b>PROCEDURE OPERATIVE</b>	m1	Informazioni preventive d'emergenza ai viaggiatori					X
	m2	Formazione del personale ferroviario	X	X	X	X	
		<b>REQUISITI OBBLIGATORI</b>					
<b>COD.</b>	<b>FACILITAZIONE AL SOCCORSO</b>	1 – 3 Km	3 -8 Km	8 -15 Km	> 15 Km	<b>RACCOMANDAZIONE</b>	
<b>PROCEDURE OPERATIVE</b>	n1	Piani di emergenza e soccorso		X	X	X	
	n2	Esercitazioni regolari con le squadre di soccorso		X	X	X	
	n3	Informazioni sul trasporto di merci pericolose	X	X	X	X	
	n4	Disponibilità delle attrezzature di soccorso		X	X	X	



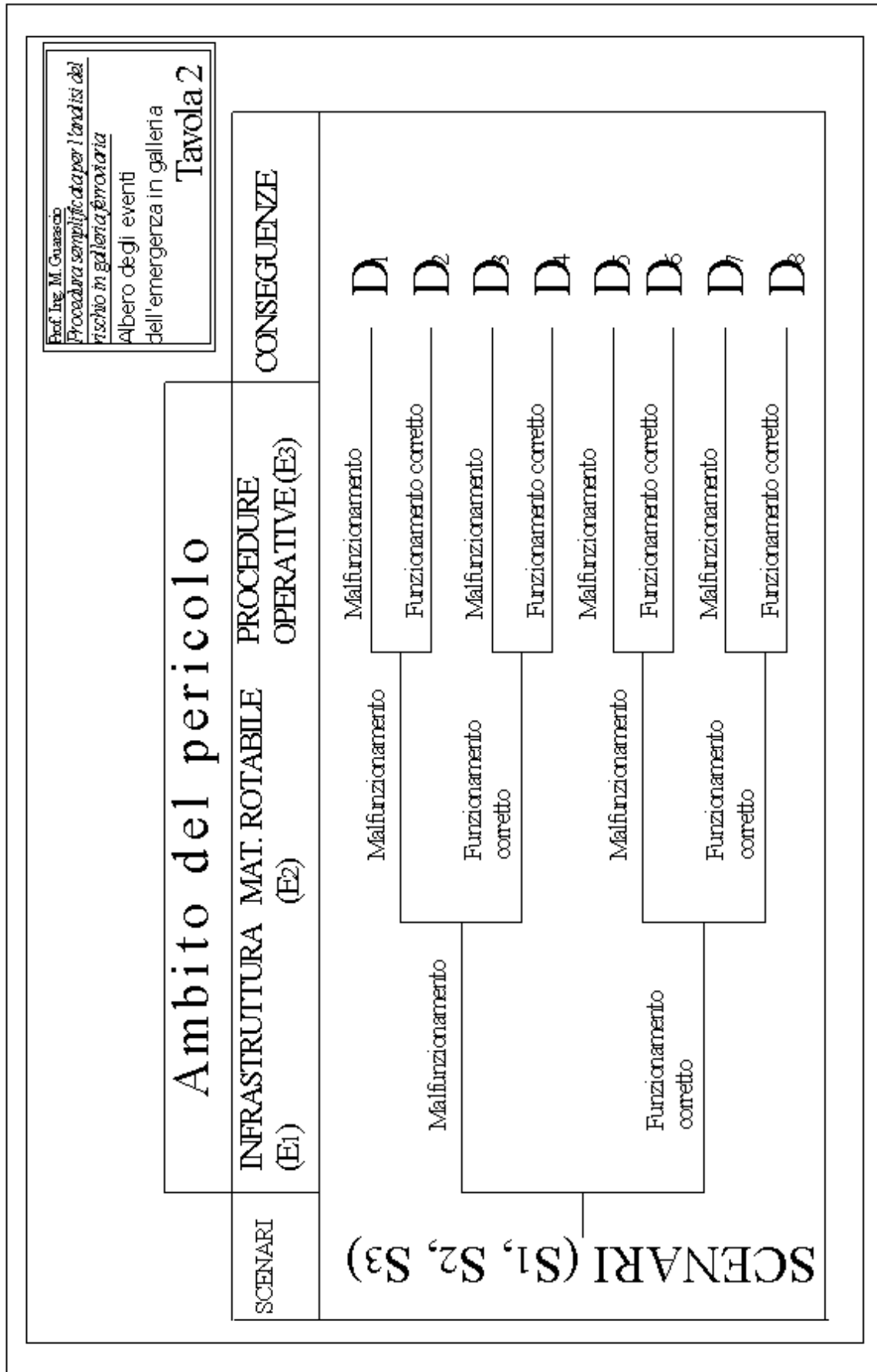
Lo schema ET di TAV 2 mostra l'evoluzione dello scenario iniziale S in relazione (i) all'errata concezione costruzione o manutenzione dell'infrastruttura (EI), (ii) al malfunzionamento del materiale rotabile (MMR), (iii) all'errata concezione e/o esecuzione di procedure operative (EPO), fino alla realizzazione di otto possibili conseguenze (la soprallineatura indica complementarietà, se ad esempio l'evento EI indica errata concezione costruzione o manutenzione dell'infrastruttura,  $\overline{EI}$  indica invece corretta concezione costruzione e manutenzione dell'infrastruttura considerata):

1. EI, MMR, EPO;
2. EI, MMR,  $\overline{EPO}$ ;
3. EI,  $\overline{MMR}$ , EPO;
4. EI,  $\overline{MMR}$ ,  $\overline{EPO}$ ;
5.  $\overline{EI}$ , MMR, EPO;
6.  $\overline{EI}$ , MMR,  $\overline{EPO}$ ;
7.  $\overline{EI}$ ,  $\overline{MMR}$ , EPO;
8.  $\overline{EI}$ ,  $\overline{MMR}$ ,  $\overline{EPO}$ .

Appare immediato verificare come le conseguenze (in termini di costi umani) più severe si abbiano nel caso 1 e quelle meno severe si abbiano nel caso 8, rispetto ad una misura di utilità determinata dal livello di sicurezza associato alla generica conseguenza. Per quanto riguarda le altre possibili conseguenze si ritengono peggiori quelle caratterizzate da malfunzionamento dell'infrastruttura, e dunque si assumono  $D_2, D_3, D_4$  peggiori di  $D_5, D_6, D_7$ . Assumendo inoltre  $D_2 \approx D_3$  e  $D_6 \approx D_7$  si ha che  $D_4$  è peggiore di  $D_2 \approx D_3$  e  $D_5$  è migliore di  $D_6 \approx D_7$ . Relativamente ad una stima basata sul livello di sicurezza la gerarchia complessiva tra le conseguenze elementari definite è dunque la seguente:

$$D_8 \succ (D_7 \approx D_6) \succ D_5 \succ D_4 \succ (D_3 \approx D_2) \succ D_1$$

(ove  $A \succ B$  significa A è migliore di B,  $A \prec B$  significa A è peggiore di B,  $A \approx B$  significa A è equivalente a B).





I valori dell'indicatore di utilità preso in esame andranno opportunamente tarati con un indicatore di costo (variabile al variare dei parametri caratteristici individuati precedentemente); a tal fine verrà introdotta una opportuna misura adimensionale di danno o dualmente una funzione utilità  $U$  che tenga conto dei due aspetti ora citati.

Il livello di rischio sarà determinato, in corrispondenza di ciascuno scenario dal valore di utilità attesa ottenuto come somma dei prodotti utilità per probabilità associata a ciascun evento conseguenza. Una volta determinato il livello di rischio globale come somma dei rischi associati a ciascuno scenario si posizionerà la corrispondente curva isorischio nel piano  $P D$  in modo tale da poter paragonare il livello di rischio associato alla scelta progettuale corrispondente all'insieme di valori assunti per i parametri caratterizzanti con il livello di rischio minimo accettabile.

#### **4. Analisi dettagliata degli alberi delle cause**

Una volta individuate le classi di sottoeventi caratteristici nell'analisi ET, per ciascuno degli scenari di riferimento, si tratta di analizzare attraverso una decomposizione di tipo FT ciascuno dei sottoeventi la cui combinazione dà luogo alle otto conseguenze qualitativamente individuate in precedenza.

Al fine di discutere e analizzare i Fault Tree (alberi delle cause), cioè al fine di assegnare ad ogni sottoevento una probabilità di realizzazione, saranno necessari dati ottenibili da:

- BANCHE DATI di funzionamento, prestazioni e incidenti riferiti al sistema galleria (best practice);
- BANCHE DATI di dettaglio sui singoli componenti di sistema in relazione a guasti, malfunzionamenti e difettosità (best technology).

E' inoltre possibile far riferimento a dati derivanti da sperimentazioni e/o simulazioni numeriche, come nel caso della valutazione dei tempi di esodo dei passeggeri. La caratterizzazione delle suddette probabilità di accadimento può inoltre derivare da ragionamenti in analogia con eventi incidentali di riferimento che consentano un dimensionamento di grandezze condizionanti il calcolo altrimenti difficilmente stimabili. Questo è ad esempio il caso della valutazione degli effetti



dell'incendio in relazione alla distribuzione delle temperature e delle condizioni di respirabilità nella galleria, per cui si farà riferimento al Monte Bianco e al Gottardo.

Si presenta di seguito, per ogni sottoevento critico individuato nell'analisi di scenario, ovvero per i sottoeventi critici “errata concezione, costruzione e/o manutenzione dell'infrastruttura”, “malfunzionamento del materiale rotabile” ed “errata concezione e/o esecuzione di procedure operative”, relativamente a ciascuno degli scenari di riferimento, un'analisi del corrispondente albero delle cause.

In particolare si intende:

- sottolineare la dipendenza dei singoli sottoeventi (o gruppi di sottoeventi) dai parametri caratterizzanti A, B, C;
- proporre una metodologia per la valutazione della probabilità di realizzazione del singolo sottoevento;
- costruire uno schema Flow Chart per ogni sottoevento che procedurizzi l'immissione dati e consenta di strutturare in termini logici una interfaccia utente;
- ottenere in definitiva una quantificazione della probabilità di realizzazione del singolo sottoevento e quindi la risoluzione dell'albero delle cause di cui è parte.

Nel seguito verranno presentate analisi di dettaglio dei diversi FT, sottolineando ove possibile analogie e differenze degli alberi relativi al medesimo top-event innestato sui diversi scenari incidentali considerati; i FT presi in considerazione sono basati essenzialmente sull'analisi delle condizioni potenzialmente in grado di determinare una riduzione dell'efficacia dei sistemi di protezione intesi in un senso sufficientemente ampio da comprendere sia i sistemi di corredo dell'infrastruttura sia le procedure di gestione dell'emergenza.

A conclusione della descrizione della metodologia adottata verrà inoltre fornito uno schema della procedura di valutazione delle probabilità di accadimento dei singoli sottoeventi che caratterizzano i diversi alberi delle cause.



## 4.1 Scenario: INCENDIO

### Evento: Malfunzionamento infrastruttura

Si analizzano separatamente i due aspetti connessi al problema della mitigazione delle conseguenze dell'incendio in galleria considerando separatamente gli aspetti connessi alla resistenza intrinseca dell'infrastruttura e alle procedure di autosoccorso e/o emergenza.

#### 4.1.1 Resistenza intrinseca dell'infrastruttura

Per quanto riguarda il primo aspetto del problema (vedi sotto-eventi b2, b345, b6 dell'albero delle cause relativo al top-event considerato) si caratterizzano le condizioni critiche del sistema per superamento del limite di rottura nel rivestimento in calcestruzzo a causa dell'insorgere degli sforzi termici indotti dalla presenza del focolaio all'interno della galleria, o per raggiungimento delle condizioni di liquefazione del calcestruzzo stesso.

Un'analisi sommaria individua, in corrispondenza di assegnate variazioni di temperatura, all'interno della galleria quali delle predette condizioni critiche possono essere verificate.

	<b>ROTTURA</b>	<b>LIQUEFAZIONE</b>
$\Delta T_1$	NO	NO
...	...	...
$\Delta T_m$	SI	NO
...	...	...
$\Delta T_n$	SI	SI

**Tabella 5** Identificazione di classi termiche per lo studio delle condizioni critiche associate allo sviluppo di un incendio in ambiente confinato.

L'evento critico associato alle proprietà di resistenza intrinseca dell'infrastruttura sarà dunque caratterizzato, in termini di probabilità di accadimento, sulla base della probabilità che vengano superate la resistenza massima a rottura nel rivestimento e la soglia limite di liquefazione del calcestruzzo; e dunque con riferimento all'esempio riportato in tabella alla probabilità che  $\Delta T > \Delta T_m$  per quanto riguarda le condizioni critiche di rottura del materiale di rivestimento della galleria e alla probabilità che  $\Delta T = \Delta T_n$  per quanto riguarda la probabilità di superare il limite di liquefazione del materiale di rivestimento. E' evidente dunque che, risultando i due eventi critici annidati – la condizione di liquefazione si verifica tipicamente per temperature superiori rispetto a quelle che inducono sforzi termici critici all'interno



dell’anello di rivestimento – la probabilità di accadimento dell’evento critico “inaffidabilità dell’infrastruttura” rispetto alla resistenza alle alte temperature sarà prescritta dalla probabilità che si raggiungano condizioni di rottura all’interno del rivestimento della galleria.

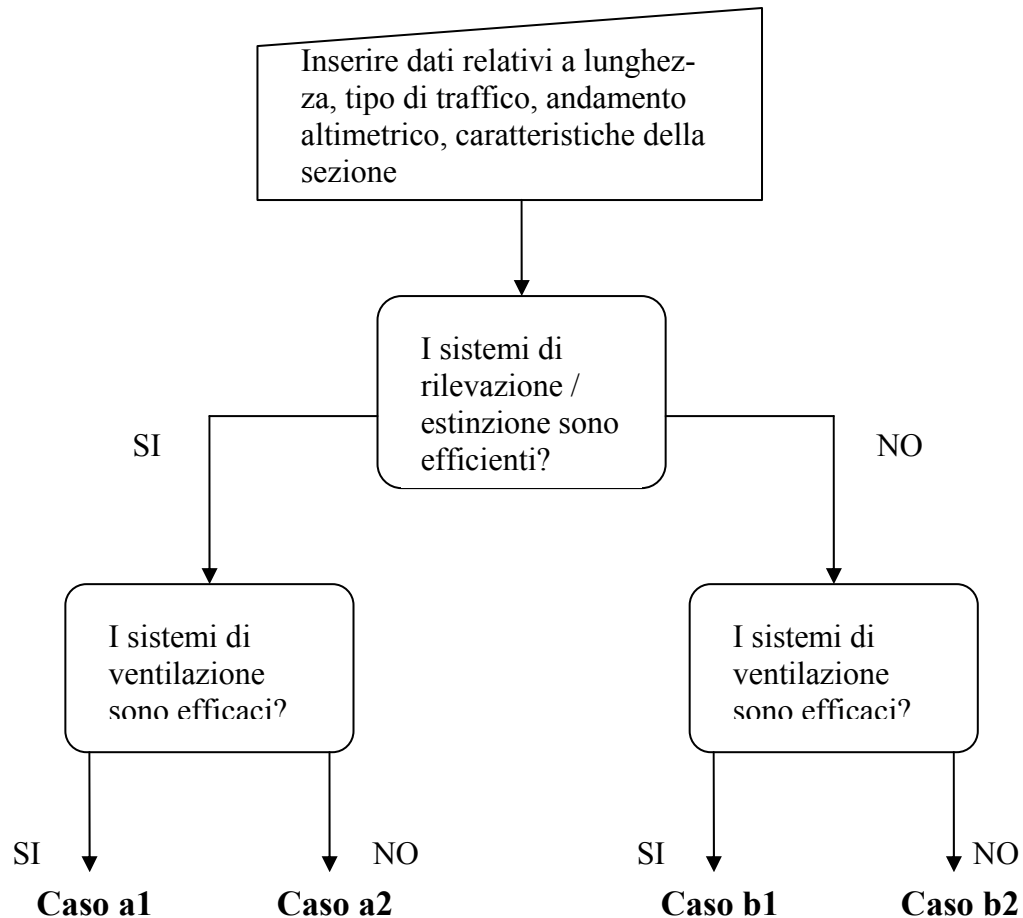
Al fine di individuare una procedura di valutazione delle probabilità di accadimento dei suddetti eventi critici si individuano innanzitutto quali e quanti tra i parametri caratterizzanti incidano sul verificarsi del gruppo di sottoeventi considerati; in secondo luogo viene presentata una semplice procedura per la determinazione della probabilità di accadimento basata sulla definizione di un questionario di rilevazione cui dare risposta sulla base delle informazioni contenute nelle banche dati di funzionamento, prestazioni e incidenti, riferiti al sistema galleria, nonché ove necessario nelle banche dati di dettaglio relative ai singoli componenti di sistema.

Parametri caratterizzanti: A, B, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>.

Questionario (primo gruppo di domande – sottoevento B2): Per gallerie di lunghezza A, nel caso di una tipologia di traffico di tipo B e nell’ipotesi che la galleria abbia andamento altimetrico di tipo C<sub>3</sub> con quali probabilità (o frequenze) si sviluppa una variazione di temperatura  $\Delta T_i$  in corrispondenza di un incendio in galleria?

- a1 Nel caso in cui i sistemi di rilevazione/estinzione incendio siano efficienti e contemporaneamente siano efficienti i sistemi di ventilazione
- a2 Nel caso in cui i sistemi di rilevazione/estinzione incendio siano efficienti ma contemporaneamente non siano efficienti i sistemi di ventilazione
- 1. Nel caso in cui i sistemi di rilevazione/estinzione incendio non siano efficienti e invece siano efficienti i sistemi di ventilazione
- b2 Nel caso in cui i sistemi di rilevazione/estinzione incendio non siano efficienti e contemporaneamente non lo siano neppure i sistemi di ventilazione

Al fine di raccogliere le informazioni precedenti si propone lo schema riportato nel seguito.



Questionario (seconda domanda – sottoeventi B345): Con quale probabilità (o frequenza) si verificano guasti al sistema di controllo e rilevamento incendi?

Tale frequenza dovrebbe essere valutata sulla base di dati relativi al funzionamento degli apparati di controllo e rilevamento e misurata in *guasti a chiamata / anno* o in *guasti / ore di funzionamento* (rispettivamente nel caso di sistemi in stand – by o in funzionamento continuo). Nel caso di assenza di dati in merito è possibile realizzare procedure HazOp o FMECA per la quantificazione del tasso di guasto del sistema.

Questionario (terza domanda – sottoevento B6): Con quale probabilità (o frequenza) si verificano guasti al sistema di estrazione fumi in galleria?

Per la riduzione degli effetti dell'incendio riferendosi all'efficienza degli impianti di estrazione fumi si farà riferimento ancora una volta a dati di guasto misurati in termini di *guasti a chiamata / anno* o in *guasti / ore di funzionamento* (rispettivamente nel caso di sistemi in stand – by o in funzionamento continuo). Anche in questo caso l'assenza eventuale di Banche Dati consistenti si potrebbe ovviare con studi di affidabilità HazOp o FMECA





Sulla base delle risposte fornite al precedente questionario la probabilità di accadimento del sottoevento considerato – “inaffidabilità dell’infrastruttura” rispetto alla resistenza alle alte temperature – verrà determinata attraverso le seguenti formula di rappresentazione:

$$P[B2 \cup (B345) \cup B6] = P(B2) + P(B345) + P(B6) - P(B2 \cap B345) - P(B345 \cap B6) - P(B6 \cap B2) + P(B2 \cap B345 \cap B6)$$

Per quanto riguarda la probabilità di accadimento del sottoevento  $B2$ , è chiaramente necessario identificare le diverse classi termiche precedentemente individuate e potenzialmente sviluppate a seguito di un incendio in galleria. L’identificazioni di tali classi di temperatura, al variare anche della progressiva della galleria, si determina considerando:

- carico d’incendio medio atteso (in funzione del traffico) in GW totali;
- condizioni di ventilazione;
- un gradiente di temperatura che realizzi un decadimento di  $1^{\circ}\text{C} / \text{m}$  nella direzione di propagazione preferenziale dei fumi e  $2^{\circ}\text{C} / \text{m}$  nella direzione opposta, nel caso in cui questa sia riconoscibile, e altrimenti un decadimento di  $1.5^{\circ}\text{C} / \text{m}$  in entrambe le direzioni.

Per la valutazione della probabilità di realizzazione della classe di temperatura  $\Delta T_i$  si ha:

$$P(\Delta T_i) = P(\Delta T_i | a_1)P(a_1) + P(\Delta T_i | a_2)P(a_2) + P(\Delta T_i | b_1)P(b_1) + P(\Delta T_i | b_2)P(b_2)$$

ove si sia tenuto conto dei dati derivanti dal questionario per la valutazione delle probabilità condizionate (probabilità che si sviluppi un variazione di temperatura  $\Delta T_i$  quando si verifica una delle condizioni – mutuamente disgiunte – identificate nel primo gruppo di domande del questionario). Si noti che le probabilità di accadimento degli eventi  $a_1, a_2, b_1, b_2$  sono determinate da intersezioni tra i sottoeventi  $B345$  (malfunzionamento del sistema di controllo e rilevazione incendio) e  $B6$  (malfunzionamento del sistema estrazione fumi) e/o dei corrispondenti eventi complementari:  $a_1 = \overline{B345} \cap \overline{B6}$ ,  $a_2 = \overline{B345} \cap B6$ ,  $b_1 = B345 \cap \overline{B6}$  e  $b_2 = B345 \cap B6$ .

A partire dalla precedente formula di rappresentazione di  $P(\Delta T_i)$  - per ogni possibile classe di temperature - la probabilità che i requisiti di resistenza al fuoco siano inadeguati è stimata da:



$$P(B2) = P(\Delta T_i > \Delta T_m) + P(\Delta T_i = \Delta T_n) - P((\Delta T_i > \Delta T_m) \cap (\Delta T_i = \Delta T_n)).$$

Sulla base di quanto osservato in precedenza, le condizioni di rottura del rivestimento a causa dell'insorgenza di sforzi termici superiori alla resistenza massima del materiale si verificano tipicamente per temperature inferiori a quelle in grado di produrre liquefazione del calcestruzzo; conseguentemente la probabilità dell'evento B2 può essere ritenuta univocamente determinata dalla  $P(\Delta T_i > \Delta T_m)$ .

L'evento complessivo “inaffidabilità dell'infrastruttura” rispetto alla resistenza alle alte temperature necessita inoltre di valutare le seguenti probabilità  $P(B2 \cap B345)$ ,  $P(B345 \cap B6)$ ,  $P(B6 \cap B2)$ ,  $P(B2 \cap B345 \cap B6)$ ; sulla base dei dati derivanti dalle risposte al questionario di rilevazione, relativamente alle condizioni di malfunzionamento degli impianti di corredo e alla frequenza con cui si possano raggiungere date variazioni di temperatura qualora i suddetti sistemi siano o meno efficaci, si perviene alle seguenti stime:

$$P(B2 \cap B345) = P(B2 | B345) \cdot P(B345) = P(B2 | b_1 \cup b_2) \cdot P(b_1 \cup b_2)$$

derivante dalla somma delle probabilità associate ad una variazione di temperatura  $\Delta T = \Delta T_i$  ( $i \geq m$ ) in funzione del solo mancato funzionamento dei sistemi di rilevazione / estinzione incendio:  $P(\Delta T_i | b_1 \cup b_2) = P(\Delta T_i | b_1) \cdot P(b_1) + P(\Delta T_i | b_2) \cdot P(b_2)$ ;

$$P(B2 \cap B6) = P(B2 | B6) \cdot P(B6) = P(B2 | a_2 \cup b_2) \cdot P(a_2 \cup b_2)$$

derivante dalla somma delle probabilità associate ad una variazione di temperatura  $\Delta T = \Delta T_i$  ( $i \geq m$ ) in funzione del solo mancato funzionamento dei sistemi di estrazione fumi:  $P(\Delta T_i | a_2 \cup b_2) = P(\Delta T_i | a_2) \cdot P(a_2) + P(\Delta T_i | b_2) \cdot P(b_2)$ ;

$$P(B345 \cap B6) = P(B345) \cdot P(B6)$$

ottenuta direttamente dai dati estratti dal questionario relativamente ai dati di funzionamento degli impianti di corredo, posta l'ipotesi di indipendenza statistica tra gli eventi B345, malfunzionamento dei sistemi di controllo e rilevamento incendio, e B6, malfunzionamento del sistema di estrazione fumi;



$$P(B2 \cap B345 \cap B6) = P(B2 | b_2) \cdot P(b_2)$$

derivante dalla somma delle probabilità associate ad una variazione di temperatura  $\Delta T = \Delta T_i$  ( $i \geq m$ ) in funzione del malfunzionamento dei sistemi di estrazione fumi e contemporaneamente del sistema di controllo e rilevazione incendio:  $P(\Delta T_i | b_2)$ .

#### **4.1.2 Inefficacia dei sistemi di soccorso**

Per quanto riguarda l'efficacia delle procedure di autosoccorso e/o emergenza si considera in modo esplicito la distinzione tra le prime e le seconde.

Parametri caratterizzanti: A, B, C<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>. In particolare i parametri A e B influiscono sulla efficacia della procedura di emergenza, mentre i parametri C sulle condizioni di realizzazione dell'autosoccorso.

Questionario (prima domanda – relativa alle condizioni di efficacia dell'autosoccorso): A seconda delle specificità del progetto e in particolare a seconda del tipo di galleria - monotubo o bi-tubo - quale è la probabilità (o frequenza) che la distanza tra le vie di fuga garantisca che il tempo minimo disponibile per l'esodo sia superiore o al più uguale ad un prefissato tempo di riferimento?

Risulta basilare, al fine di comprendere quale tipologia di dati debba essere presa in esame per caratterizzare la suddetta probabilità, la seguente osservazione: la probabilità che i passeggeri e/o gli addetti riescano a raggiungere la via di fuga più vicina dipende dall'interdistanza tra le zone di esodo rapido nel caso di galleria monotubo o dall'interdistanza tra collegamenti trasversali nel caso di gallerie bitubo; con la particolarità che l'interdistanza tra zone di esodo rapido sarà certamente superiore all'interdistanza tra collegamenti trasversali (il che va a vantaggio delle gallerie bitubo) mentre la dimensione caratteristica della galleria sarà superiore nel caso di galleria monotubo (il che costituisce un vantaggio dal punto di vista della densità dei fumi e conseguentemente del livello di temperatura raggiunto a seguito della presenza di un focolaio di incendio).

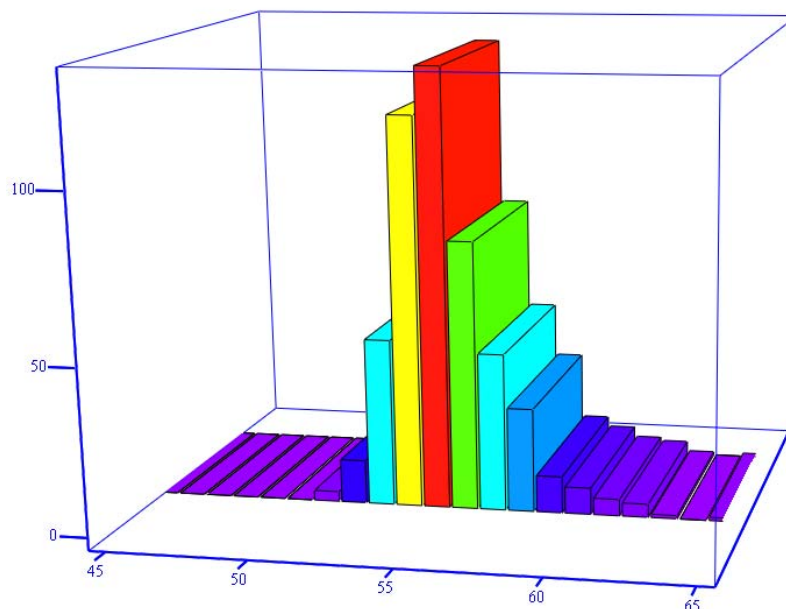
La risposta alla domanda posta nel questionario richiede dunque la conoscenza:



- della dinamica dell'incendio in relazione a tempo stimato di sviluppo, intensità delle radiazioni termiche, quantità e qualità dei fumi sviluppati, campo di temperature che si realizza nella galleria;
- simulazioni in merito all'esodo passeggeri in relazione alle condizioni materiali del pavimento della galleria, del marciapiede, della presenza o meno di attrezzature per il supporto all'esodo
- verifica della capacità di passeggeri e/o addetti di raggiungere la via di fuga più vicina in dipendenza dall'efficienza dei sistemi di illuminazione d'emergenza della galleria.

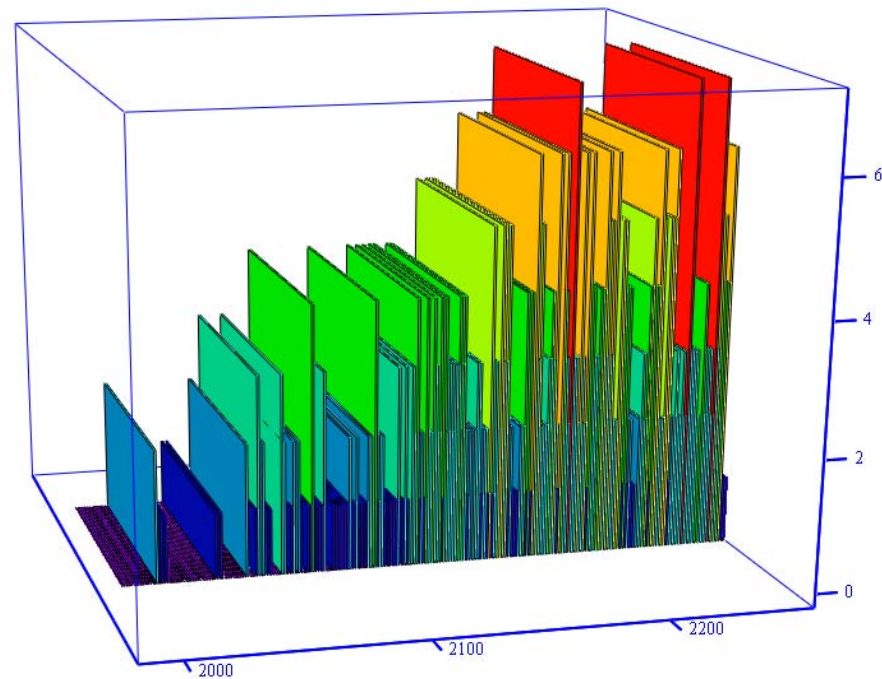
Per quanto riguarda questo ultimo aspetto vengono di seguito presentati, a titolo di esempio, alcuni risultati derivanti da simulazioni numeriche del flusso di passeggeri all'interno della carrozza e sulla banchina nel caso di galleria monotubo caratterizzata dalla presenza di Zone di Esodo Rapido (ZER). In particolare vengono analizzate le due seguenti situazioni di riferimento relativamente alla distanza tra le porte delle carrozze e gli ingressi della ZER:

- scostamento porte carrozze – ingresso ZER: 10m
- scostamento porte carrozze – ingresso ZER: 1000m.



Soluzione\_ottima\_Distribuzione

**Figura 6** Distribuzione dei tempi di esodo corrispondenti alla seguente configurazione: **minima distanza tra la porta della carrozza e il primo imbocco della ZER disponibile pari a 10m**, 24 file di poltrone per ogni carrozza, 4 posti per ogni fila, 10 carrozze costituenti il treno. I risultati ottenuti derivano da 500 esecuzioni dell'algoritmo di simulazione di esodo e determinano un **valore medio del tempo di esodo pari a 56.3 sec** e una varianza pari a 3.726



Soluzione\_ottima\_Distribuzione

**Figura 7** Distribuzione dei tempi di esodo corrispondenti alla seguente configurazione: **minima distanza tra la porta della carrozza e il primo imbocco della ZER disponibile pari a 1000m**, 24 file di poltrone per ogni carrozza, 4 posti per ogni fila, 10 carrozze costituenti il treno. I risultati ottenuti derivano da 500 esecuzioni dell’algoritmo di simulazione di esodo e determinano un **valore medio del tempo di esodo pari a 2171 sec** e una varianza pari a  **$3.106 \cdot 10^3$** .

Il primo caso corrisponde evidentemente ad una situazione in cui il treno riesce a arrestare la propria corsa rispettando sostanzialmente le condizioni di progetto (la distanza tra le porte delle carrozze e l’ingresso della ZER è uguale a zero), la seconda situazione invece descrive condizioni impreviste rispetto ai canoni di progetto.

Per quanto riguarda il terzo aspetto dell’analisi, ossia la valutazione della probabilità che si abbiano guasti all’illuminazione di emergenza in caso di chiamata, è necessario procedere alla valutazione dell’efficienza del sistema di illuminazione di emergenza della galleria, la cui affidabilità è assegnata sulla base di dati di guasto in *guasti a chiamata / anno* o in *guasti / ore di funzionamento* (rispettivamente nel caso di sistemi in stand – by o in funzionamento continuo). Anche in questo caso l’assenza eventuale di Banche Dati consistenti si potrebbe ovviare con studi di affidabilità HazOp o FMECA.



Questionario (seconda domanda – relativa alle condizioni di efficacia dell'autosoccorso): quale è la probabilità che i soccorsi riescano a raggiungere il teatro dell'incidente per una distanza non inferiore ad una data soglia di riferimento?

La probabilità di cui sopra è determinata dunque attraverso lo studio della probabilità che si raggiunga l'area di soccorso esterna alla galleria e che si riesca ad avvicinarsi alla zona critica entro una distanza limite definita da una soglia di riferimento che garantisce l'efficacia dell'intervento.

Al fine di sviluppare queste valutazioni è necessario verificare:

- i tempi di arrivo dei soccorsi dal momento di allarme;
- la compatibilità tra i mezzi disponibili ai soccorritori e le condizioni strutturali della galleria, nonché le condizioni effettive dell'incidente;

La probabilità che la distanza minima dal punto critico sia minore o uguale ad una data distanza di riferimento dal focolaio di incendio dipende dalla distribuzione di temperatura all'interno della galleria e in particolare dalla temperatura raggiunta in corrispondenza del punto critico; tale dipendenza determina evidentemente la distanza minima dei soccorritori dall'incendio sulla base della temperatura giudicata tollerabile per soccorritori opportunamente equipaggiati.

Posto che i soccorritori siano in grado di entrare all'interno della galleria in tempi utili per soccorrere passeggeri e/o addetti, la probabilità  $P(\Delta x_i < \Delta \bar{x})$  che distanza minima dal punto critico sia minore o uguale ad una data distanza di riferimento viene ricondotta alla stima della probabilità che la temperatura all'interno della galleria rimanga al di sotto di una soglia linearmente dipendente dalla distanza minima di riferimento ora introdotta.

Assumendo  $\Delta T_i - \Delta T_{acc} / \Delta x_i = m$  la probabilità che distanza minima dal punto critico sia minore della distanza di riferimento  $\Delta \bar{x}$  è determinata dalla  $P(\Delta T_i < m \Delta \bar{x} + \Delta T_{acc})$ , dove il coefficiente di decadimento  $m$  è assunto pari a un  $1^\circ\text{C} / \text{m}$  nella direzione di propagazione preferenziale dei fumi e  $2^\circ\text{C} / \text{m}$  nella direzione opposta, nel caso in cui questa sia riconoscibile, e altrimenti un decadimento di  $1.5^\circ\text{C} / \text{m}$  in entrambe le direzioni.



Per questo motivo la probabilità che i soccorritori possano addentrarsi il più possibile all'interno della galleria e il più possibile vicino al focolaio dipende dalle caratteristiche di resistenza al fuoco dell'infrastruttura e dal buon funzionamento dei sistemi di spegnimento automatico e di ventilazione. Tali dati derivano direttamente da quanto esposto nel paragrafo 4.1.1.

## **4.2 Scenario: INCENDIO**

### **Evento: Malfunzionamento materiale rotabile**

Si analizzano separatamente i due aspetti connessi al problema dell'inefficacia delle dotazioni di bordo e dell'impossibilità che il treno riesca a sottrarsi alle condizioni critiche.

#### **4.2.1 Inefficienza delle dotazioni di bordo**

La realizzazione dell'inefficienza delle dotazioni di bordo può essere in prima battuta ritenuta dipendente da aspetti legati alla corretta progettazione del rotabile in termini di:

- completezza teorica delle dotazioni di soccorso e autosoccorso previste e effettivamente allestite a bordo in relazione all'incendio (sottoevento F4);
- efficacia del posizionamento degli stessi presidi all'interno delle carrozze in particolare in quanto a visibilità diretta o a chiarezza delle indicazioni relative, semplicità di raggiungimento e di liberazione dei presidi dai supporti (sottoevento G1);
- efficacia dei presidi in termini di semplicità d'uso (sottoevento G1).

Considerando il sistema galleria / treno è rilevante ai fini della sicurezza considerare in particolare le dotazioni di:

- estintori a polvere e CO<sub>2</sub> (presidio preventivo e protettivo);
- coperta antincendio (presidio protettivo);
- ascia e/o martello (presidio protettivo);
- autorespiratori (presidio protettivo);
- torce e presidi per l'illuminazione portatile.



Si propone quindi di procedere all’analisi delle dotazioni di bordo dei rotabili che impegnano l’infrastruttura in esame, valutando quindi la probabilità che il generico rotabile presenti le dotazioni sopra elencate.

Parametri caratterizzanti: B

Questionario: Le dotazioni precedentemente citate sono presenti a bordo? Quale è la frequenza di guasto di estintori, autorespiratori e torce?

Tali dati sono misurati in termini di *guasto a chiamata* registrati dalle banche dati di FS ovvero vengono definiti assegnando tassi di guasto teorici correlati all’efficienza della manutenzione programmata ed effettivamente realizzata secondo le rilevazioni di FS.

In definitiva si ha:  $P(F4 \cap G1) = P(F4) P(G1)$ .

#### **4.2.2 Impossibilità del treno di sottrarsi alle condizioni critiche**

Per quanto riguarda l’impossibilità del treno di sottrarsi alle condizioni critiche si considerano le seguenti azioni elementari descritte dai sottoeventi:

- neutralizzazione del freno di emergenza (F2);
- mantenimento della capacità di movimento (F3);

Parametri caratterizzanti: A, B, C<sub>1</sub>.

Questionario (prima domanda): Con quale probabilità (o frequenza) si ha la neutralizzazione del freno di emergenza?

La probabilità di realizzare la neutralizzazione del freno di emergenza dipende dalla probabilità di avere il sistema allestito sul treno atteso (cioè dalla frequenza di presenza del sistema sul totale dei treni che costituiscono il traffico che utilizza l’infrastruttura) e dalla probabilità di corretto funzionamento dello stesso:

$$P(F2) = P(\text{presenza}) \cdot P(\text{funzionamento})$$





Al fine di ottenere la probabilità di corretto funzionamento anche in questo caso pare opportuno utilizzare le banche dati FS al fine di ricavare un tasso di guasto sotto forma di *guasti per chiamata*.

Questionario (seconda domanda): Data la lunghezza della galleria e considerando l'esperienza in merito ai danni da incendio sugli organi di controllo del convoglio atteso, quale è la probabilità che il treno, con un focolaio a bordo e impegnante una galleria, possa sottrarsi alle condizioni critiche?

### **4.3 Scenario: INCENDIO**

#### **Evento: Inefficacia delle procedure operative**

##### ***4.3.1 Impossibilità procedurale all'uscita del treno dalla galleria***

Per impossibilità procedurale si intende la impossibilità al movimento causata dalla presenza di un segnale a via impedita nel percorso in galleria, in caso di tipologia di galleria con interconnessioni o in caso di galleria in area urbana (sottoevento L1)

Parametri caratterizzanti: C<sub>1</sub>, C<sub>4</sub>.

Lo studio del sottoevento è quindi ridotto al riconoscimento dell'esistenza di tali specifiche di progetto.

##### ***4.3.2 Inefficacia dell'emergenza***

L'inefficacia in emergenza che qui si tratta è quella, in particolare, riferibile a discostamenti sensibili tra le condizioni effettive di operatività durante l'emergenza e quelle previste nel piano di emergenza (PE) stilato. La serie di sottoeventi (M1, M2, N1, N2) individuati riguarda quindi in sostanza la probabilità di una cattiva pianificazione dell'emergenza.

Parametri caratterizzanti: A, B, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>.

Questionario: Quale è la probabilità che si realizzi un quadro d'emergenza a seguito d'incendio sensibilmente differente da quello atteso da PE?.



#### **4.4 Scenario: DERAGLIAMENTO**

##### **Evento: Inefficienza infrastruttura**

##### **4.4.1 Autosoccorso**

Il sottoevento in esame coincide esattamente, secondo lo schema ad albero delle cause riportato nella tavola di riferimento, con il corrispondente ramo relativo allo scenario incendio. Valgono pertanto esattamente le medesime considerazioni ivi sviluppate, in particolare per quanto attiene alla valutazione dei tempi di esodo dal treno verso le zone di esodo, al variare delle condizioni materiali del pavimento della galleria, del marciapiede o della presenza o meno di attrezzature per il supporto all'esodo.

##### **4.4.2 Emergenza**

Anche in questo caso il sottoevento in esame coincide esattamente, secondo lo schema ad albero delle cause riportato nella tavola di riferimento, con il corrispondente ramo relativo allo scenario incendio. Valgono pertanto esattamente le medesime considerazioni ivi sviluppate.

#### **4.5 Scenario: DERAGLIAMENTO**

##### **Evento: Inefficienza materiale rotabile**

##### ***Assenza di illuminazione di emergenza a bordo e di attrezzatura di autosoccorso a bordo***

Con riferimento alla tavola di rappresentazione dell'albero delle cause si evidenzia una dipendenza di tale sottoevento dai sottoeventi F5 (assenza di illuminazione di emergenza) e F4, F7, G1 (assenza e/o malfunzionamento di attrezzature di autosoccorso a bordo).

In particolare l'inefficienza delle dotazioni di bordo può essere in prima battuta ritenuta dipendente da aspetti legati alla corretta progettazione del rotabile in termini di:

- completezza teorica delle dotazioni di soccorso e autosoccorso previste e effettivamente allestite a bordo in relazione all'incendio (sottoevento F4);
- efficacia del posizionamento degli stessi presidi all'interno delle carrozze in particolare in quanto a visibilità diretta o a chiarezza delle indicazioni relative, semplicità di raggiungimento e di liberazione dei presidi dai supporti (sottoevento G1);
- efficacia dei presidi in termini di semplicità d'uso (sottoevento G1).



Parametri caratterizzanti: B

Questionario (prima domanda): Quale è la probabilità di malfunzionamento del sistema di illuminazione di emergenza di bordo in caso di chiamata?

Questionario (seconda domanda): Le dotazioni di autosoccorso sono presenti a bordo? Quali sono le probabilità (o frequenze) di guasto corrispondenti?

#### **4.6 Scenario: DERAGLIAMENTO**

##### **Evento: Inefficacia procedure operative**

##### **4.6.1 Inefficacia del piano di emergenza**

In analogia con quanto stabilito nel caso di incendio, l'inefficacia in emergenza che qui si tratta è quella riferibile a discostamenti sensibili tra le condizioni effettive di operatività durante l'emergenza a seguito di deragliamento e quelle previste nel PE stilato.

#### **4.7 Scenario: COLLISIONE**

L'analisi dello scenario collisione ricalca esattamente lo scenario incendio.



## **5 Livello di rischio accettabile**

Esistono in merito definizioni differenti tuttavia in generale il livello di rischio accettabile è una misura della probabilità di perdere la vita a seguito della realizzazione di un determinato incidente

$$IR = P_f \cdot P_{d|f}$$

cioè l'indice di rischio è pari alla probabilità di accadimento dell'incidente per la probabilità di perdere la vita nell'incidente stesso per il bersaglio umano (utilizzatore, abitante prossimale, addetto, fruitore...) medio atteso.

Il livello di rischio ritenuto in Olanda discriminante tra l'accettabilità condizionata e la non accettabilità assoluta secondo il criterio VROM – standard (standard of Dutch Ministry of Housing, Spatial planning and Environment) è

$$IR < 10^{-6} [Y^{-1}].$$

Al di sopra di tale limite le norme olandesi non consentono la realizzazione dell'impianto oggetto di analisi, mentre nei casi di rischio inferiore od uguale è necessario garantire uno sforzo continuo per ridurre il rischio residuo.

La norma olandese (definita nelle sue linee generali nel Netherlands National Environmental Policy Plan (NEPP) del 1988) ha costituito un riferimento per altre legislazioni nazionali realizzate a seguire, come nel caso di quelle canadesi e britanniche, che indicano livelli di rischio limite accettabile molto prossime a queste.

La ricerca dell'Ingegneria della Sicurezza ha però negli ultimi anni proposto una discriminazione del rischio individuale accettabile funzione del tipo di bersaglio, in relazione al grado di volontarietà di essere sottoposti al rischio in oggetto, o più comunemente in relazione al beneficio che dalla relazione con la sorgente del pericolo si ricava.

In quest'ottica il criterio di rischio proposto nel TAW– standard, (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) è:

$$IR < \beta \cdot 10^{-5} [Y^{-1}]$$

con  $\beta$  fattore politico.



Nel caso dell'applicazione allo studio del sistema treno / galleria si identificano due componenti di bersaglio distinte:

- bersagli interni: gli utilizzatori del vettore (passeggeri) e gli addetti del servizio;
- bersagli esterni: gli abitanti delle zone circostanti l'infrastruttura.

In questa ottica si propone in analogia con criteri olandesi di limitazione del rischio:

<b>Bersaglio</b>	<b><math>\beta</math></b>
Dipendenti FS	1
Passeggeri	0.1
Abitanti	0.01

Per l'analisi di accettabilità del rischio dovuto a infrastrutture critiche, la norma olandese prevede anche una analisi complessiva basata sulla definizione del rischio sociale:

$$E_N = \iint_A IR(x, y) \cdot d(x, y) dx dy$$

in cui:

- $IR(x, y)$  è la funzione di rischio individuale sull'area di rischio;
- $d(x, y)$  è la funzione di densità dei bersagli;
- $E(N)$  è il numero di vittime atteso per anno per il sito in esame, anche definibile come:

$$E(N) = \int_0^x x \cdot f_N(x) dx$$

Si consideri tuttavia l'imprecisione della valutazione ottenuta secondo la scrittura precedente che non considera la forma della distribuzione di cui  $E(N)$  è il valore atteso.

Il rischio sociale è rappresentato in modo completo attraverso la funzione di densità di probabilità  $f_N(x)$ , di cui  $E(N)$  è il valor medio, e più in particolare dalla sua primitiva  $F_N(x)$  funzione di distribuzione di probabilità definita come:

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^{\infty} f_N(x) dx$$



Le legislazioni dei paesi più avanzati nella pianificazione del rischio hanno realizzato norme di legge che intervengono nella limitazione del piano di rappresentazione secondo lo schema di seguito riportato.

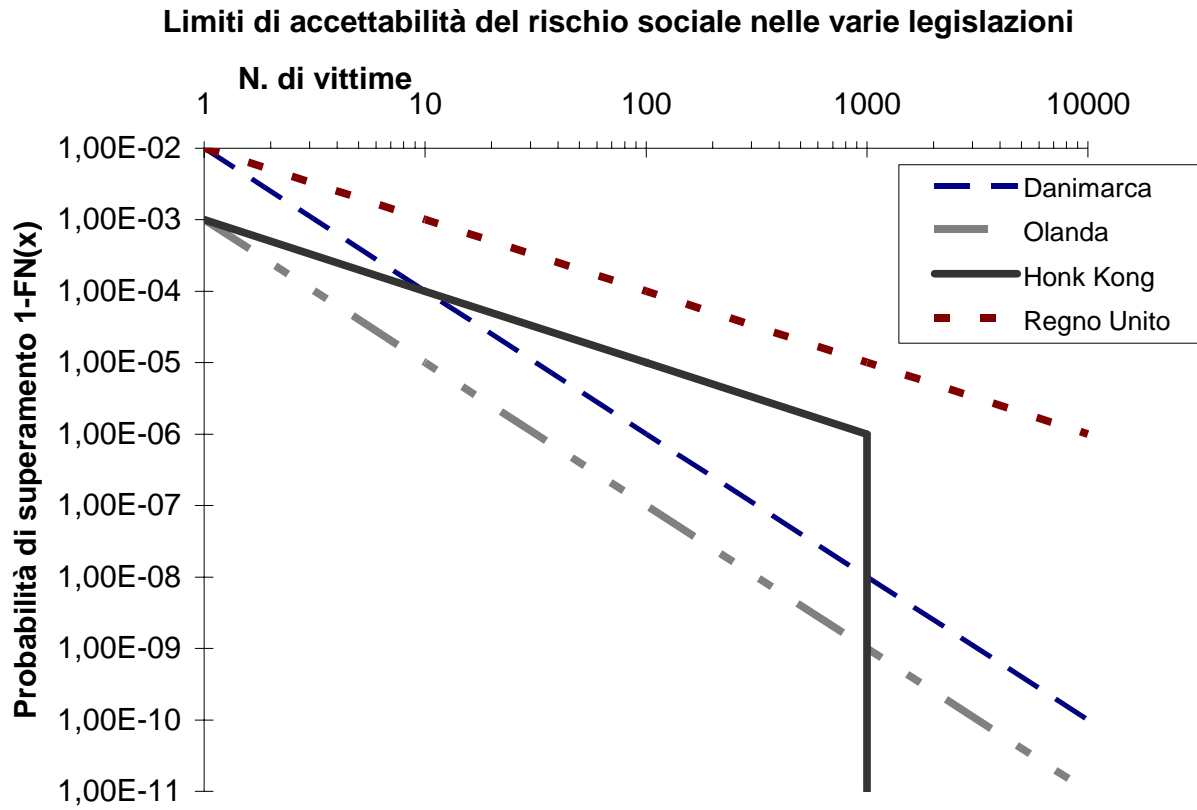




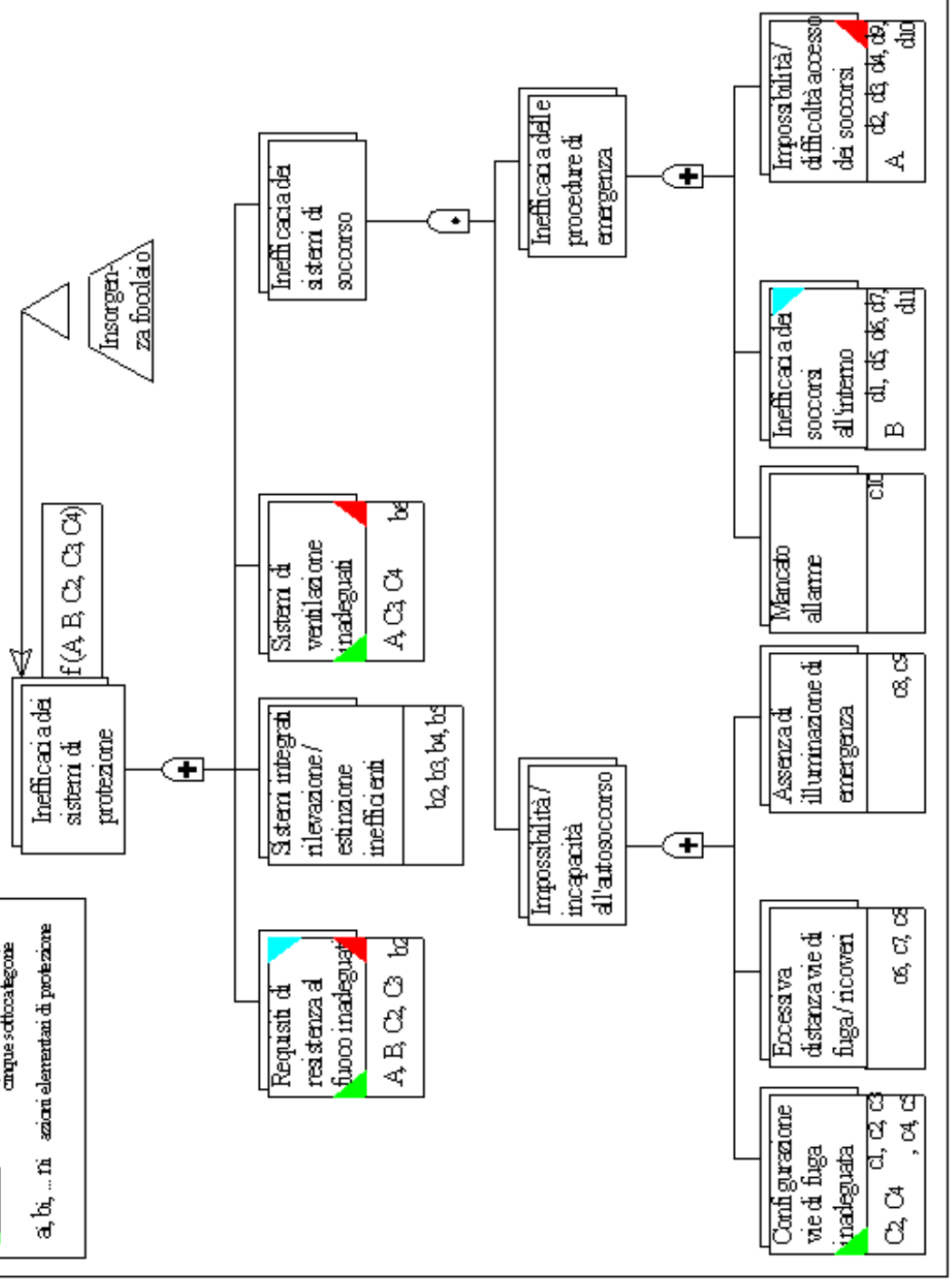
Tavola 3

Procedura semplificata per l'analisi del rischio in gestione emergenza

**Evento incidentale: INCENDIO**  
**Albero delle cause: Malfunzionamento infrastruttura**

**Legenda**

- A f (sviluppo della gallena)
- B f (tipologia traffico)
- C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- a, b, ... f: azioni elementari di protezione



Insofferenza focolaio

Tavola 4

Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

### Evento incidentale: INCENDIO

Albero delle cause: Malfunzionamento mat. rotabile

**Legenda**

- A f (sviluppo della galleria)
- B f (tipologia traffico)
- C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- a, b, ... n sezioni elementari di protezione

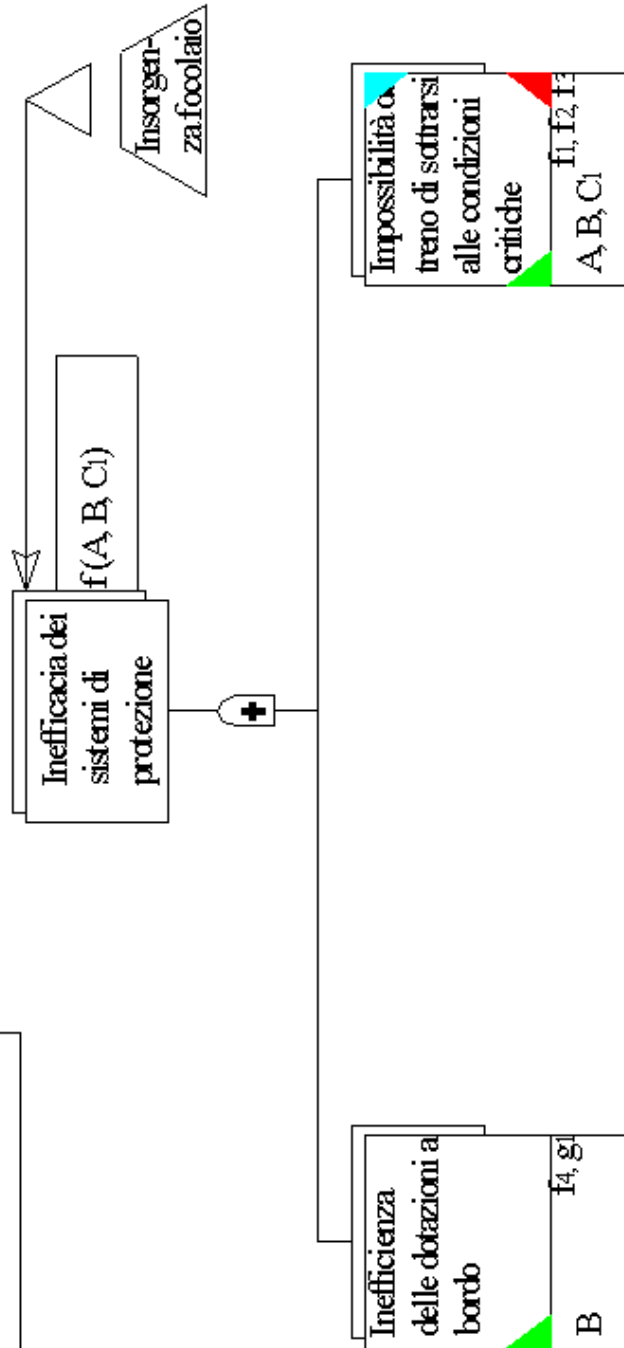




Tavola 5

FIG. 10.11. Uomini  
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

**Evento incidentale: INCENDIO**  
**Albero delle cause: Inefficacia Procedure Operative**

**Legenda**

- A f (sviluppo della galleria)
- B f (tipologia traffico)
- C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- ai, bi, ... ni azioni elementari di protezione

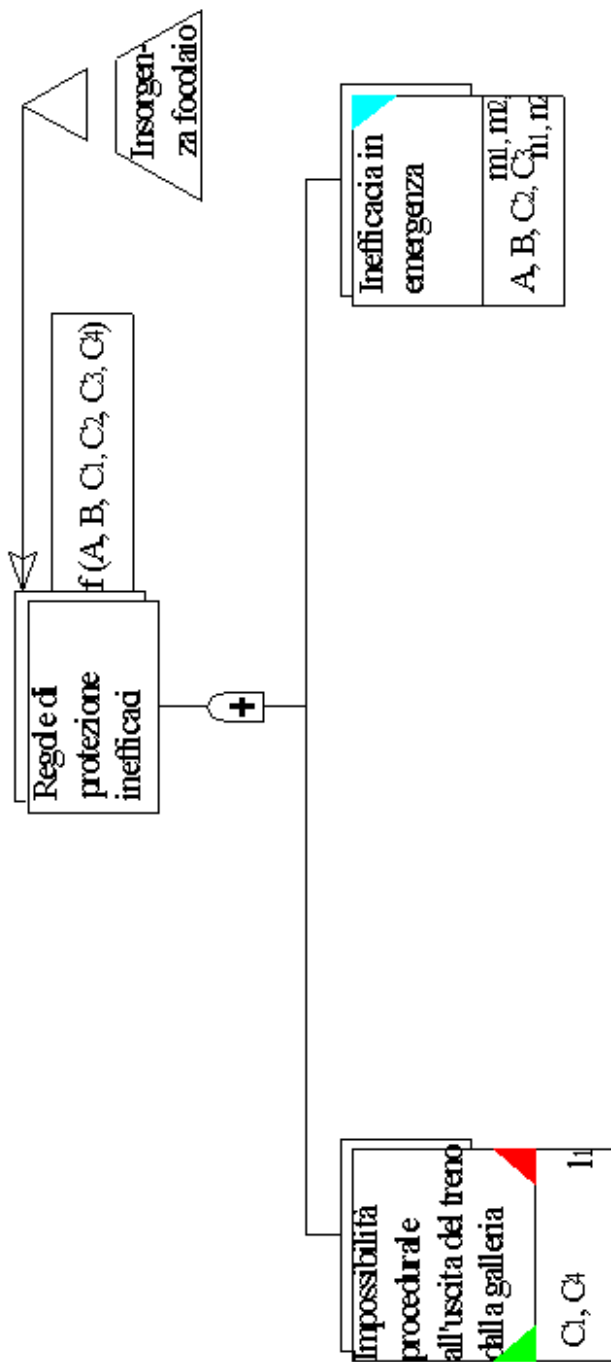


Tavola 6

Analisi di rischio  
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

**Evento incidentale: DERAGLIAMENTO**  
**Albero delle cause: Malfunzionamento infrastruttura**

- Legenda**
- A f (sviluppo della galleria)
  - B f (tipologia traffico)
  - C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>, ... n<sub>i</sub> azioni/elementari di protezione

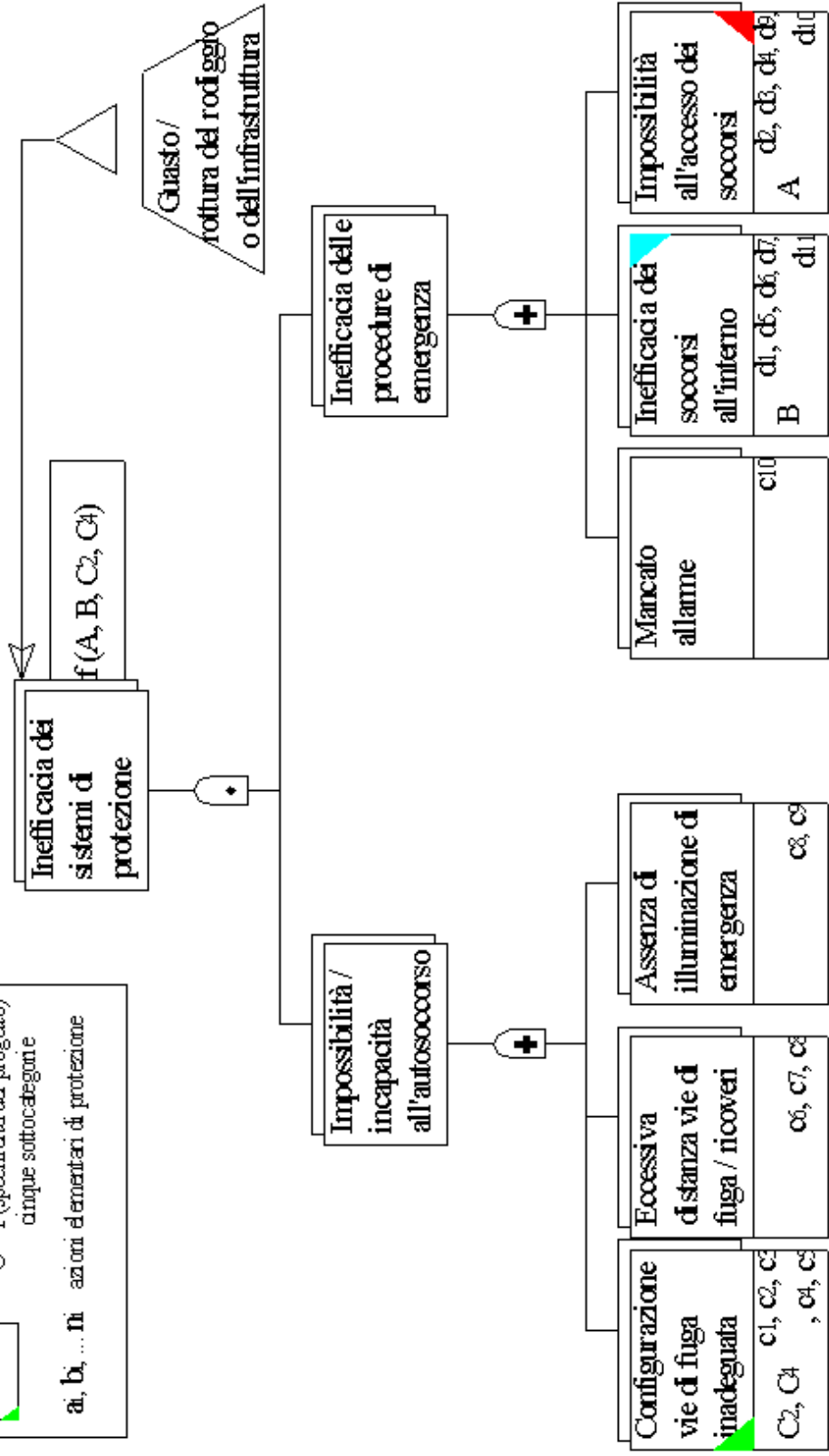


Tavola 7

INGEGNERIA  
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

**Evento incidentale: DERAGLIAMENTO**

**Albero delle cause: Malfunzionamento mat. rotabile**

**Legenda**

- A f (sviluppo della galleria)
- B f (tipologia a traffico)
- C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie

a, b, ... ni azioni elementari di protezione

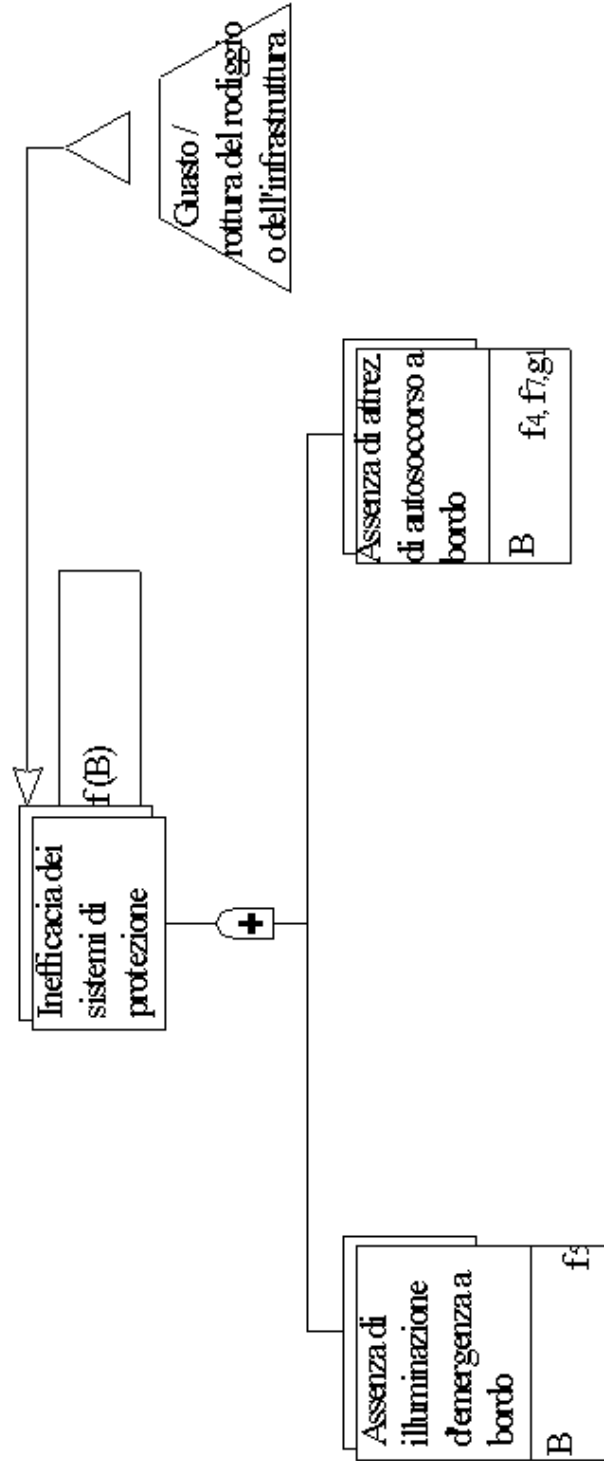





Tavola 8

REGIA DI VIAREGIO  
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

**Evento incidentale: DERAGLIAMENTO**

**Albero delle cause: Inefficacia Procedure Operative**

**Legenda**

-  A f (sviluppo della galleria)
-  B f (tipologia traffico)
-  C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- a, bi, ... ni** azioni elementari di protezione

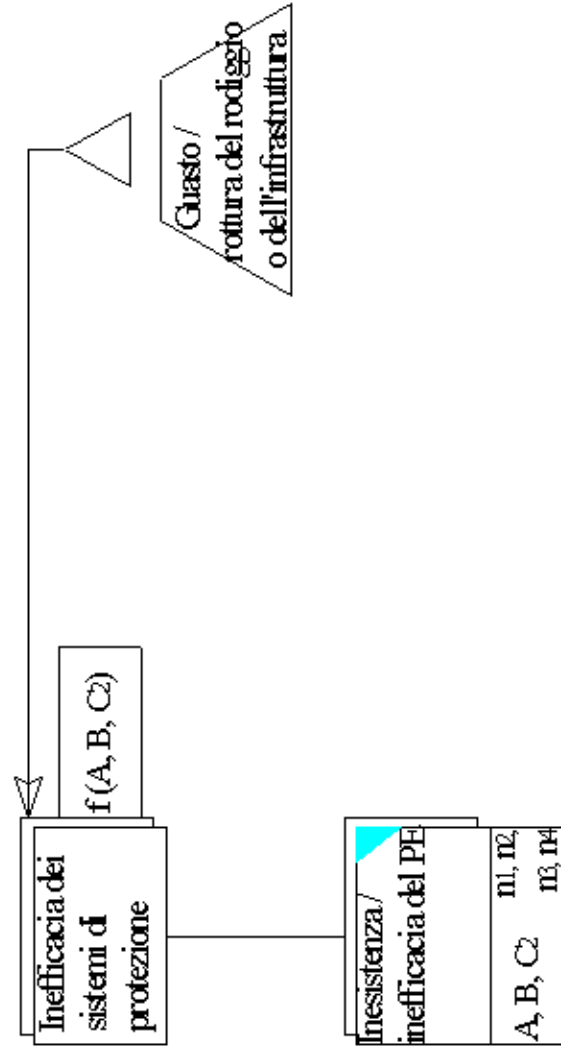
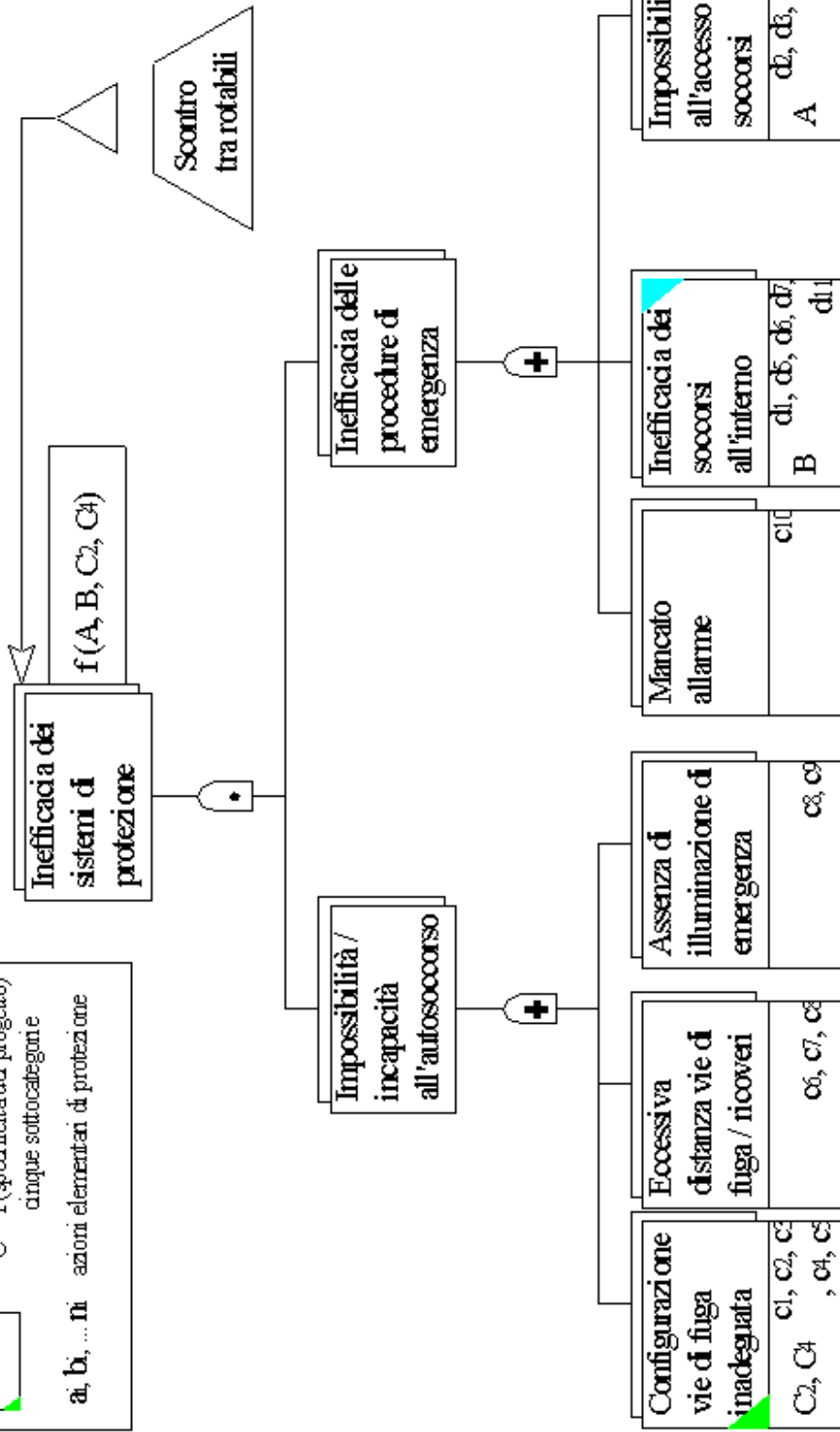


Tavola 9

FIG. 102.11.11 CORSO  
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

**Evento incidentale: COLLISIONE**  
**Albero delle cause: Malfunzionamento infrastruttura**



**Legenda**

- A f (sviluppo della galleria)
- B f (tipologia traffico)
- C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- a, b, ... n azioni elementari di protezione

Tavola 10

Avvicinamento  
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

Evento incidentale: COLLISIONE

Albero delle cause: Malfunzionamento mat. rotabile

**Legenda**

	A	f (sviluppo della galleria)
	B	f (tipologia traffico)
	C	f (specificità del progetto) cinque sottocategorie

**ai, ... ni** azioni elementari di protezione

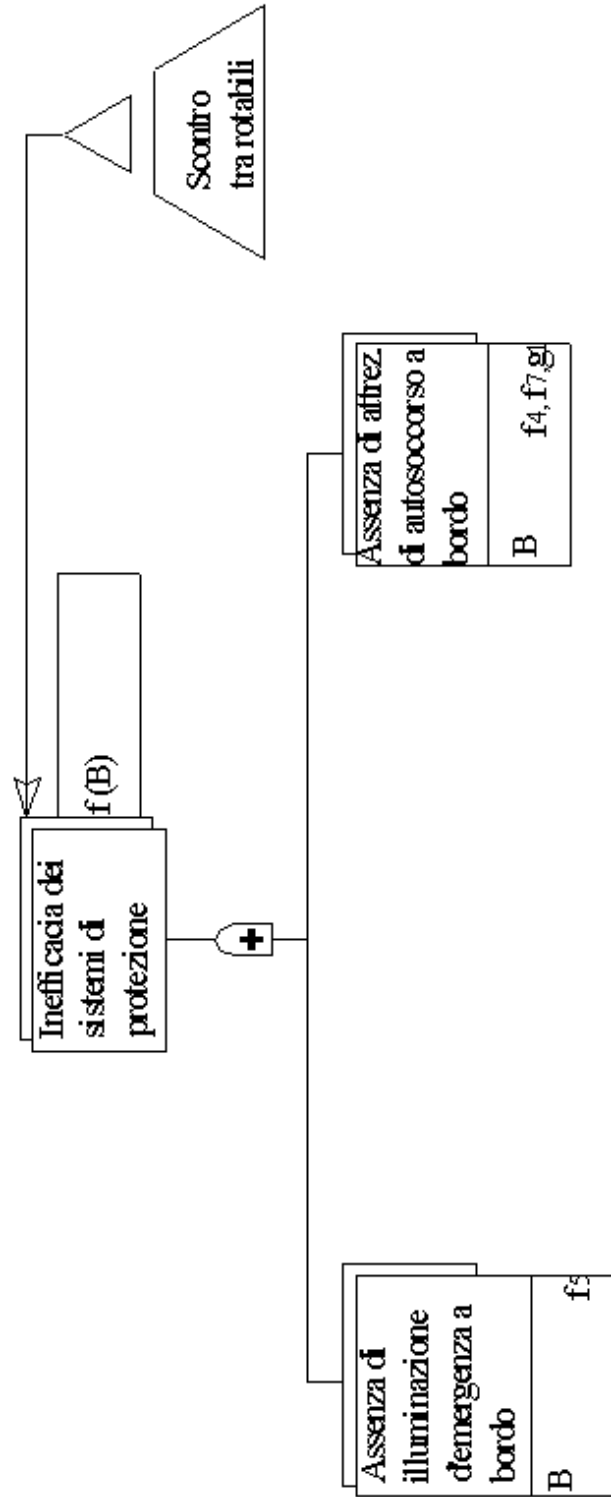





Tavola 11

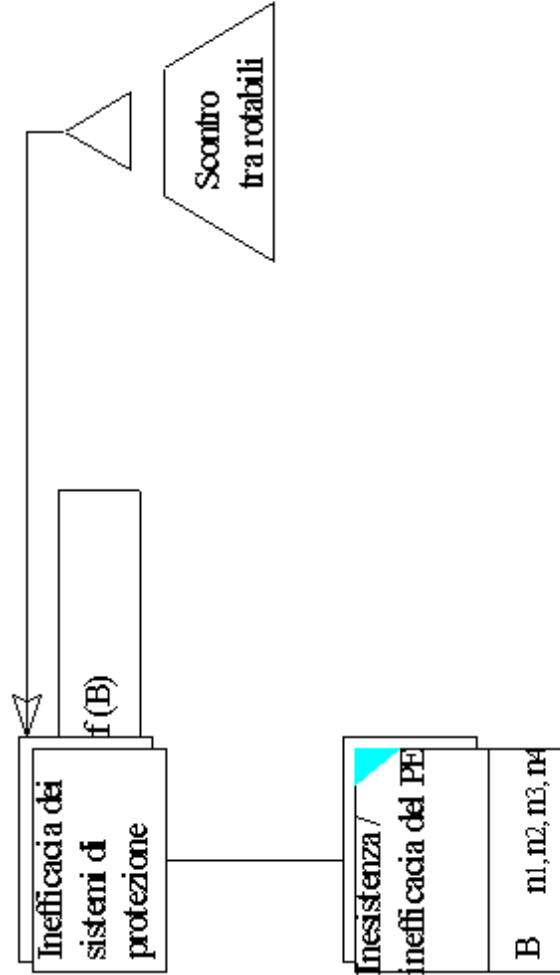
Procedura semplificata per l'analisi del rischio in galleria ferroviaria

### Evento incidentale: COLLISIONE

#### Albero delle cause: Inefficacia Procedure Operative

#### Legenda

-  A f (sviluppo della galleria)
-  B f (tipologia traffico)
-  C f (specificità del progetto) cinque sottocategorie
- a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>, ... n<sub>i</sub> azioni elementari di protezione





## Bibliografia

<b>An overview of quantitative risk measures and their application for calculation of flood risk</b>	<b>Bas Jonkman</b> (Road and Hydraulic Engineering division Ministry of Transport, Public Works and Water Management), <b>Pieter van Gelder e Han Vrijling</b> (Delft University of Technology Faculty of Civil engineering)	2000
<b>A Framework for Risk criteria for critical infrastructures: Fundamentals and Case Studies in the Netherlands</b>	<b>J. (Han) K. Vrijling e Pieter H.A.J.M. van Gelder e Hessel G. Voortman</b> (Delft University of Technology Faculty of Civil engineering), <b>Louis H.J. Goossens</b> (Safety Science and Technology Assessment Group Faculty of Technology), <b>Maresh D. Pandey</b> (University of Waterloo Dept. of Civ. Eng.)	2001
<b>An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage</b>	<b>Bas Jonkman</b> (Road and Hydraulic Engineering division Ministry of Transport, Public Works and Water Management), <b>Pieter van Gelder e Han Vrijling</b> (Delft University of Technology Faculty of Civil engineering)	2002
<b>Evaluation of tunnel safety and cost effectiveness of measures</b>	<b>Bas Jonkman</b> (Road and Hydraulic Engineering division Ministry of Transport, Public Works and Water Management), <b>Pieter van Gelder e Han Vrijling</b> (Delft University of Technology Faculty of Civil engineering)	2003
<b>The Netherlands National Environmental Policy Plan (NEPP)</b>	National Institute for Health and Environment (RIVM, Dep. Of VROM)	1988, 1992, 1996, 2000
<b>Societal risk and the concept of risk aversion</b>	<b>Pieter van Gelder e Han Vrijling</b> (Delft University of Technology Faculty of Civil engineering)	1995
<b>The Value of Road and Railway Safety - an overview</b>	<b>Lena Winslott Hiselius</b> Department of Economics Lund University Sweden	2002
<b>Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept</b>	<b>Mr. Terje Andersen, Mr. Børre J. Paaske</b> (Norske Veritas (DNV), ESReDA 23 Seminar	2002





## 5.5

### *“Analisi di Rischio per gallerie stradali”*



1.1	<i>Introduzione</i> .....	3
1.2	<i>Ambito di applicazione</i> .....	3
1.3	<i>Obiettivi</i> .....	4
1.4	<i>Finalità della direttiva 2004 / 54 / CE</i> .....	5
1.4.1	Definizione di livello di sicurezza accettabile .....	6
1.4.2	Metodologia di Analisi di Rischio .....	6
1.4.3	Ruolo dell’Autorità Amministrativa .....	7
<b>2</b>	<b>Classificazione funzionale delle gallerie</b> .....	<b>7</b>
2.1	<i>Modello di classificazione delle gallerie</i> .....	9
2.1.1	Schede di classificazione delle gallerie.....	10
<b>3</b>	<b>Statistiche incidentali in galleria</b> .....	<b>10</b>
3.1	<i>Frequenza di accadimento degli eventi di incendio</i> .....	13
<b>4</b>	<b>Requisiti minimi</b> .....	<b>26</b>
4.1	<i>Le misure di sicurezza indicate dalla Direttiva 2004 / 54 / CE e dal D. Lgs. 05/10/2006</i> .....	26
4.2	<i>Sintesi delle misure di sicurezza indicate dalla Direttiva 2004/54/CE e dal D. Lgs. 05/10/2006</i> .....	27
<b>5</b>	<b>Analisi di rischio</b> .....	<b>31</b>
5.1	<i>Introduzione</i> .....	31
5.1.1	Tollerabilità del rischio .....	35
5.1.2	Misure del Rischio .....	35
5.1.3	Criteri di Rischio Individuale.....	36
5.1.4	Criteri di Rischio Sociale .....	37
5.2	<i>Procedura di Analisi di Rischio</i> .....	40
5.3	<i>Malfunzionamenti e concatenazione dei sottosistemi di sicurezza</i> .....	46
5.4	<i>Analisi di scenari possibili</i> .....	47
<b>6</b>	<b>Indicazioni per la progettazione degli impianti di sicurezza nelle gallerie stradali</b> .....	<b>54</b>
6.1	<i>Analisi di rischio e progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali</i> .....	55
6.1.1	Progetto della sicurezza nelle gallerie stradali .....	57
6.1.2	Stesura del progetto di sicurezza.....	62
6.1.3	Parametri di sicurezza .....	63
6.1.4	Requisiti minimi di sicurezza.....	65



## **Premessa Interpretativa**

### ***1.1 Introduzione***

I contenuti dei documenti promulgati a livello nazionale inerenti la sicurezza nelle gallerie stradali in genere (D.M. 05/06/2001) e la sicurezza della circolazione nelle gallerie stradali in particolare (Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 6/12/1999 n. 7938, Circolare dell’Ente Nazionale Strade 8/9/99 n. 7735) sono richiamati per determinare il grado di aderenza ed eventuale adattamento sia alle raccomandazioni contenute nella Direttiva 2004/54/CE emanata dal Parlamento Europeo concernente l’individuazione dei requisiti minimi di sicurezza per le gallerie stradali nella Rete Trans-Europea, sia alle successive indicazioni fornite dal Decreto Legislativo 5 ottobre 2006, n. 264 "Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea".

Sono inoltre recepite le soluzioni della buona pratica progettuale, codificate in norme e regolamenti promulgati a livello nazionale ed internazionale, nell’ambito di un approccio prestazionale alla progettazione ed all’adeguamento della sicurezza nelle gallerie stradali basato sulla metodologia di Analisi di Rischio Quantitativa Probabilizzata in conformità alla raccomandazione della Direttiva 2004/54/CE e del Decreto di recepimento.

E’ evidente che la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali nazionali deve in ogni caso rispettare le prescrizioni del codice della strada e le norme che definiscono geometricamente e funzionalmente il sistema galleria quale il DM 05/11/01 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”.

### ***1.2 Ambito di applicazione***

Le raccomandazioni contenute nei decreti e nelle linee guida si applicano alle gallerie stradali della Rete Trans-Europea.

Nelle nuove costruzioni dovranno essere osservati almeno i requisiti minimi definiti in questo documento.

Nelle gallerie esistenti e in corso di realizzazione, qualora non sia possibile una completa applicazione dei requisiti minimi di sicurezza, occorrerà effettuare un’analisi dei rischi che dimostri il conseguimento di un livello globale di sicurezza del sistema galleria almeno equivalente al livello fissato dall’osservanza dei requisiti minimi di sicurezza.



### **1.3 Obiettivi**

A partire dalle indicazioni fornite dai suddetti decreti è possibile formulare linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali, basata sui principi ed il metodo dell'analisi di rischio, in ottemperanza alle disposizioni contenute nella Direttiva 2004/54/CE e nel D. Lgs. n°264.

Il tratto caratterizzante le linee guida è la definizione di una procedura di identificazione della soluzione progettuale ottima, in termini di analisi costi-sicurezza, rispetto ad una pre-determinata classe di alternative possibili.

I principi ed il metodo dell'analisi di rischio sono utilizzati per:

determinare il livello di sicurezza di una generica galleria stradale in funzione delle caratteristiche strutturali delle infrastrutture, di traffico, nonché dell'efficacia/efficienza dei sottosistemi di sicurezza adottati (impianti, dispositivi, procedure);

individuare soluzioni impiantistiche e dotazioni di sicurezza idonee ad assicurare l'incolumità e l'esodo degli utenti dalla struttura, e facilitare l'intervento dei servizi di soccorso e spegnimento, quando si verificano all'interno di una galleria eventi incidentali ad elevata pericolosità.

Il termine accidente individua un evento aleatorio, quale un malfunzionamento dei dispositivi e degli impianti installati, un incidente stradale, uno sversamento di sostanze infiammabili, un incendio, un rilascio di sostanze pericolose, per il quale gli utenti della galleria agiscono in uno scenario di pericolo.

In considerazione dello spirito e della lettura della direttiva (UE 2004/54/CE) il presente documento riguarda prevalentemente le misure di protezione, mitigazione e facilitazione per la sicurezza delle gallerie stradali da adottare al fine di ridurre le conseguenze di eventi pericolosi, ovvero utili ad indirizzare il flusso del pericolo verso stati di fine emergenza caratterizzati da elevata salvabilità.

Le tre fasi identificate come rilevanti nella progettazione della sicurezza in galleria sono:

*Determinazione delle condizioni critiche all'interno della struttura*, ovvero, determinazione delle condizioni di innesco di eventi incidentali ritenuti significativi ai fini della sicurezza e descrizione dei processi ammissibili secondo i quali gli eventi iniziatori possono evolversi. I sottosistemi di sicurezza analizzati in questa prima fase sono gli impianti di sorveglianza, rivelazione e comunicazione, preposti a segnalare le condizioni di emergenza all'interno della galleria.



*Identificazione e quantificazione degli scenari ammissibili e determinazione del flusso del pericolo*, ovvero, identificazione e quantificazione degli stati iniziali e delle evoluzioni possibili per le condizioni critiche instauratesi all'interno della struttura in conseguenza di predeterminati eventi iniziatori. La risposta delle misure di sicurezza strutturali e dei sottosistemi di sicurezza analizzati in questa seconda fase deriva dalle caratteristiche di reazione e resistenza al fuoco dei materiali con i quali sono realizzati la struttura e gli impianti; dal sistema di controllo ed estrazione dei fumi (impianto di ventilazione), dal sistema di mitigazione e spegnimento e dal sistema di comunicazione di emergenza.

*Definizione delle procedure di gestione delle misure di sicurezza*, ovvero, definizione di procedure di esodo efficaci per l'auto-salvamento degli utenti e la stesura di piani di intervento per gli addetti al soccorso ed allo spegnimento. Le misure di sicurezza strutturali ed i sottosistemi di sicurezza analizzati in questa terza fase sono: vie di fuga e rifugi, impianto di illuminazione di emergenza, impianto di ventilazione, sistema di mitigazione.

Ogni fase del processo di progettazione della sicurezza è inserita nell'ambito di una opportuna procedura di analisi di rischio basata su metodi di analisi ad Albero degli Eventi e ad Albero delle Cause e finalizzata alla determinazione del livello di sicurezza di una galleria in funzione dei requisiti di sicurezza prescritti o proposti come requisiti alternativi e/o integrativi equivalenti in termini di sicurezza.

#### ***1.4 Finalità della direttiva 2004 / 54 / CE***

La Direttiva 2004/54/CE si prefigge “lo scopo di garantire un livello minimo di sicurezza agli utenti della strada” nella intera Rete Stradale di Trasporto Europea, per il complesso delle gallerie di lunghezza superiore ai 500 metri per qualsivoglia volume di traffico.

Lo scopo può essere perseguito attraverso:

la realizzazione di un livello di protezione dell'utente uniforme, omogeneo, costante ed elevato per tutte le gallerie appartenenti alla Rete Stradale TransEuropea;

l'indicazione degli equipaggiamenti minimi di sicurezza tenendo conto delle caratteristiche geometrico-strutturali della galleria e delle caratteristiche del traffico;

l'adozione della metodologia dell'analisi del rischio come strumento analitico idoneo a dimostrare che le misure di riduzione del rischio integrative e/o alternative ai requisiti minimi introdotti dalla Direttiva garantiscano un livello di sicurezza equivalente o accresciuto;



l'adozione di livelli di sicurezza per le gallerie della Rete Stradale di Trasporto Nazionale compatibili con le misure minime suggerite dalla Direttiva.

#### ***1.4.1 Definizione di livello di sicurezza accettabile***

Il livello di sicurezza accettabile è definito come il livello conseguito adottando i requisiti minimi proposti dalla Direttiva.

I requisiti minimi di sicurezza, dettagliatamente descritti nell'Allegato I della Direttiva, stabiliscono livelli di sicurezza minimi accettabili, ovvero, soglie di accettabilità del rischio in termini di:

parametri geometrici, tipologici, ambientali e di traffico (punto 1.1. dell'Allegato I);

misure di sicurezza minime altrimenti dette “requisiti minimi” (punto 1.2. dell'Allegato I);

volume di traffico (punto 1.3. dell'Allegato I);

misure infra-strutturali ed impiantistiche (paragrafo 2. dell'Allegato I);

misure riguardanti l'esercizio (paragrafo 3. dell'Allegato I).

I parametri introdotti caratterizzano lo *status quo* (ovvero previsto) del sistema galleria, cioè del complesso costituito dagli utenti, dalla struttura e, dai sottosistemi di sicurezza. Il sistema galleria si assume localizzato nel territorio ed in interazione con l'ambiente.

Qualora i requisiti minimi non possano essere applicati, per impossibilità tecnica o/e per costi di adeguamento non sostenibili, è consentito adottare misure di sicurezza alternative per le quali un'adeguata procedura di analisi di rischio stabilisca e dimostri l'equivalenza al livello di sicurezza garantito dai requisiti minimi obbligatori.

#### ***1.4.2 Metodologia di Analisi di Rischio***

L'Analisi di Rischio è effettuata, quando necessario, da un organo funzionalmente indipendente dal gestore della galleria. Il contenuto ed i risultati dell'Analisi di Rischio, sono inseriti nella documentazione di sicurezza trasmessa all'Autorità Amministrativa.

La metodologia di Analisi di Rischio riguarda l'analisi dei rischi connessi al sistema galleria, determinati in funzione delle caratteristiche geometrico - strutturali (lunghezza, sezione, pendenza) e di traffico (volume di traffico, percentuale di veicoli pesanti in transito giornaliero).



L'analisi di rischio è indicata come strumento necessario per valutare l'adozione di misure di sicurezza integrative e/o di equipaggiamenti complementari oltre che nel caso in cui i parametri di sicurezza (punto 1.1.2.dell'Allegato I) abbiano, per la specifica galleria, caratteristiche speciali e singolari.

### ***1.4.3 Ruolo dell'Autorità Amministrativa***

L'Autorità Amministrativa – istituita a livello nazionale, regionale ovvero locale - è nominata dallo Stato per assumere la responsabilità di assicurare che vengano rispettati i molteplici aspetti connessi con la sicurezza delle gallerie e per garantire l'osservanza delle disposizioni contenute nella Direttiva 2004/54/CE. Inoltre, l'Autorità Amministrativa provvede alla messa in servizio della galleria, su cui estende la propria responsabilità, ed eventualmente a limitarne o sospenderne l'esercizio.

Essa deve garantire l'effettuazione di prove, ispezioni, valutazioni e collaudi nelle gallerie di sua esclusiva competenza, assumendo la responsabilità di pianificare - sia organizzativamente che operativamente - opportuni modelli di intervento di emergenza, definendo la procedura da adottarsi in caso di chiusura della galleria e l'attuazione delle relative misure necessarie per la riduzione del rischio.

L'Autorità Amministrativa è custode e destinataria della documentazione di sicurezza (di cui è parte integrante l'Analisi dei Rischi) delle gallerie di sua competenza esclusiva ed è l'unica che può accordare deroghe ai requisiti prescritti (previa autorizzazione della Commissione Europea), accogliendo le soluzioni alternative a sicurezza equivalente ovvero le soluzioni progettuali a più elevato livello di protezione di quelle indicate come ammissibili dal complesso dei requisiti minimi presenti nella Direttiva 2004/54/CE.

## ***2. Classificazione funzionale delle gallerie***

I requisiti minimi indicati nell'Allegato I della Direttiva, stabiliscono livelli di sicurezza accettabili, ovvero, soglie di accettabilità del rischio per una data galleria caratterizzata in termini dei parametri precedentemente introdotti.

La Tabella 1 riporta le caratteristiche del sistema galleria che sono rilevanti ai fini dell'analisi di rischio:

caratteristiche strutturali



caratteristiche di traffico

caratteristiche impiantistiche

caratteristiche ambientali e gestionali

Caratteristiche Strutturali	Lunghezza
	Numero Fornici
	Numero corsie
	Geometria della sezione trasversale
	Pendenza
	Tipo di Costruzione
	Vie di accesso esclusive per il soccorso
	Larghezza delle Corsie
	Distanza tra le Vie di Fuga
Caratteristiche di Traffico	Volume di Traffico
	Percentuale di Veicoli Pesanti
	Frequenza di congestione
	Velocità di Percorrenza
	Rilevazione <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Il termine Sistema di Rilevazione congloba i sistemi di video-sorveglianza, controllo automatico del traffico agli ingressi, controllo automatico del traffico all'interno, controllo automatico di incidente – SOS, rilevazione incendio nonché il sistema di rilevazione della qualità ambientale.





Caratteristiche Impiantistiche	Comunicazione <sup>3</sup>
	Ventilazione
	Illuminazione
Caratteristiche Ambientali e Gestionali	Condizioni Meteoclimatiche ai portali
	Interdistanza idranti
	Tempo di intervento dei Servizi di Pronto Intervento

**Tabella 1 - Parametri di sicurezza del sistema galleria**

Le caratteristiche riportate nella tabella sono elementi essenziali per sviluppare la procedura di analisi di rischio della galleria. In particolare, esse consentono di identificare il deficit di sicurezza per un generico sistema galleria rispetto ai requisiti minimi previsti in funzione dei valori assunti per i parametri di sicurezza.

Tali deficit, tipicamente associati a condizioni d'impossibilità tecnica o/e costi di adeguamento sproporzionati, possono essere colmati con soluzioni progettuali alternative per le quali un'adeguata procedura di analisi di rischio stabilisca e dimostri l'equivalenza del livello di sicurezza, ovvero l'accresciuto livello di sicurezza della struttura rispetto al livello conseguito con l'adozione dei requisiti minimi di sicurezza.

### **2.1 Modello di classificazione delle gallerie**

Di seguito si introducono classificazioni distinte dei parametri di sicurezza delle gallerie stradali, indicate come *classificazioni base*, mirate a definire *classi omogenee* di parametri rispetto alle indicazioni fornite dal decreto.

I risultati di tale classificazione sono utilizzati per la gerarchizzazione del livello di pericolosità della singola galleria, attraverso l'introduzione di un'opportuna *funzione di (dis)-utilità* del sistema che aggrega le informazioni relative alle caratteristiche geometriche, tipologiche e ambientali

<sup>3</sup> Il termine Sistemi di Comunicazione congloba il sistema di tele-gestione e controllo, gli impianti radio e di telefonia mobile.



determinate a partire dai dati estratti dalle classificazioni di base nonché le informazioni sulle caratteristiche dei sottosistemi di sicurezza di cui il sistema galleria è dotato.

I *parametri di sicurezza* considerati nella formulazione delle classificazioni base sono:

il tipo di galleria (singola o doppia canna),

la lunghezza della galleria,

l'area della sezione trasversale della galleria per corsia,

la pendenza della galleria,

la tipologia di traffico (mono-direzionale o bidirezionale),

il volume di traffico<sup>4</sup>.

### ***2.1.1 Schede di classificazione delle gallerie***

Un'analisi preliminare dei parametri di sicurezza definiti nel decreto costituisce il dato iniziale per la valutazione dei deficit del progetto o delle condizioni di esercizio (considerati gli obblighi di adeguamento della sicurezza per gallerie esistenti) della singola galleria allo scopo di identificare le condizioni che richiedono lo sviluppo della procedura di analisi di rischio.

L'analisi dei parametri di sicurezza serve ad identificare le configurazioni del sistema galleria suscettibili di analisi di rischio: configurazioni per le quali l'analisi di rischio è raccomandata e configurazioni per le quali l'analisi di rischio è obbligatoria.

### ***3. Statistiche incidentali in galleria***

L'aumento del numero e della lunghezza delle gallerie stradali esistenti, l'intensificarsi del traffico pesante e la diversificazione dei materiali con i quali sono costruiti gli attuali mezzi di trasporto, hanno prodotto un incremento della probabilità di accadimento di eventi di incendio e di sversamento. Nella Tabella1 sono sintetizzati gli eventi di incendio caratterizzati da un'elevata intensità (verificatisi negli ultimi venti anni in gallerie stradali nel mondo).

---

<sup>4</sup> Il volume di traffico è rappresentativo anche dei parametri velocità di percorrenza, frequenza di congestione e percentuale di veicoli pesanti  
La distanza tra le vie di fuga viene assimilata alla lunghezza “efficace” della galleria.



Anno	Nome della galleria	Nazione	Lunghezza (m)	Morti	Feriti	Veicoli	Tipo di incidente
1949	Holland	USA	2250		66	23	Perdita del Carico
1978	Velsen	Olanda	770	5	5	6	Urto con incendio
1979	Nihonzaka	Giappone	1045	7	2	173	Urto con incendio
1980	Sakai	Giappone	459	5	5	10	Urto con incendio
1982	Caldecott	USA	1028	7	2	8	Urto con incendio
1983	Pecrile	Italia	600	8	22	10	Urto con incendio
1986	L'armé	Francia	1105	3	5	5	Urto con incendio
1987	Gumefens	Svizzera	340	2		3	Urto con incendio
1993	Serra Ripoli	Italia	442	4	4	16	Urto con incendio
1994	Hugouenot	Sud Africa	6111	31	28	1	Guasto meccanico
1995	Pfaender	Germania	6719	53	4	4	Urto con incendio
1996	I.Femmine	Italia	148	5	10	20	Urto con incendio
1999	M. Bianco	Italia	11600	39		26	Sconosciuta
1999	Tauren	Austria	6400	12		40	Urto con incendio
2000	Gotthard	Svizzera	17600	11		2	Urto con incendio
2003	Vicenza	Italia		6	50		Ribaltamento

**Tabella 2. Incidenti gravi avvenuti nelle gallerie stradali dal 1940. Per incidenti gravi si devono intendere quelli che hanno comportato la morte di più di una persona o il ferimento di più di dieci**



L'analisi dei dati riportati in tabella evidenzia come:

gli eventi di incendio in gallerie stradali sono eventi caratterizzati da bassa probabilità di accadimento;

le cause di incidente sono da identificare essenzialmente con guasti meccanici dei veicoli e con incidenti da traffico, mentre risultano assai remote cause intrinseche alla struttura.

Il successivo grafico conferma, inoltre, come il numero delle vittime conseguenti ad eventi di incendio in gallerie stradali abbia subito un incremento di tipo esponenziale, per effetto dei fattori di rischio precedentemente indicati.

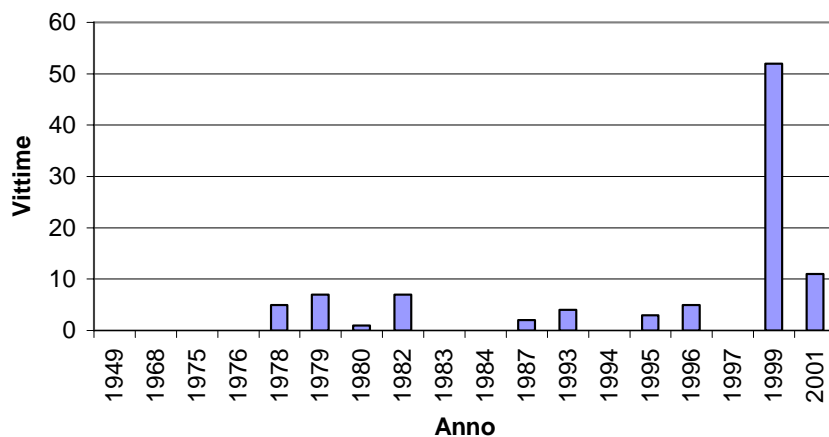


Grafico 1. Numero di vittime dovuti ad incidenti in

Le statistiche, inoltre, evidenziano come:

gli incidenti nelle gallerie sono inferiori agli incidenti che avvengono nei tratti a cielo aperto;

Gli eventi incidentali, identificati come rilevanti nell'ambito dell'Analisi di Sicurezza della struttura galleria, sono gli eventi di sversamento di liquidi infiammabili e di incendio. La configurazione del dominio all'interno del quale l'evento si sviluppa, amplifica i danni sia alle persone che alle strutture che agli impianti per effetto del confinamento.

L'analisi degli incidenti in galleria stradale evidenzia che lo sviluppo di un incendio non sempre è una diretta conseguenza della collisione fra due veicoli. Spesso la causa è da ricercarsi nella rottura del circuito di alimentazione del carburante, in inconvenienti ai circuiti elettrici, in guasti di tipo meccanico.



I mezzi pesanti costituiscono, dal punto di vista statistico e per caratteristiche intrinseche, i potenziali focolai di eventi di incendio caratterizzati da elevato rilascio di energia termica e conseguente intensa generazione di fumi. Un maggior numero di circuiti elettrici e parti meccaniche, una maggiore capacità del serbatoio del carburante, l'entità e le caratteristiche merceologiche del carico trasportato, costituiscono un aggravio di rischio in caso d'incidente o di guasto.

La successiva Tabella 2 sintetizza le frequenze di accadimento di eventi iniziatori caratteristici dell'eventi di incendio in galleria.

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

**Tabella 3. Eventi iniziatori di incendio in galleria (da XVIII World Road Congress, dati aggiornati al 1987)**

### *3.1 Frequenza di accadimento degli eventi di incendio*

La frequenza di accadimento di eventi di incendio in galleria risulta dipendere in modo essenziale dai seguenti parametri:

- lunghezza,
- densità del traffico,
- velocità di percorrenza dei veicoli,



- pendenza della strada.

I parametri introdotti, possono essere considerati come elementi di confronto per la determinazione del livello di sicurezza attribuibile ad una galleria.

La frequenza di accadimento di un evento di incendio in galleria, può essere valutata in diversi modi:

- numero di incendi per galleria per anno
- numero di incendi per numero di veicoli e per chilometro.

A titolo di esempio si riporta il calcolo del tasso degli incendi nel tunnel dell'Elba per gli anni 1990-1991 in accordo alla seconda metodica, correntemente utilizzata in letteratura.

Dati:

Periodo di osservazione	2 anni
Lunghezza del tunnel	3,3 km
Numero di veicoli transitanti	$37 \times 10^6$
Percentuale veicoli pesanti	15 %
Numero di incendi a vetture private	13
Numero di incendi a veicoli pesanti	9

A partire da questi dati i tassi di evento incendio, in termini di casi di incendi per veicolo e per chilometro, sono così calcolati:

**autovetture**

$$VL = \frac{13}{2 \times 37 \times 10^6 \times (1 - 0,15) \times 3,3} \quad \frac{\text{casi}}{\text{veicoli} \times \text{Km}}$$

**VL = 6,3** casi su  $10^8$  veicoli per chilometro.

**veicoli pesanti :**

$$PL = \frac{9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 0,15 \times 3,3} \quad \frac{\text{casi}}{\text{veicoli} \times \text{km}}$$



**$PL = 24,6$**  casi su  $10^8$  veicoli per chilometro.

Considerando invece ***tutti i veicoli***, senza distinzione, si ha

$$VL + PL = \frac{13 + 9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 3,3} \quad \frac{\text{casi}}{\text{veicoli} \times Km}$$

**$VL + PL = 30,9$**  casi su  $10^8$  veicoli per chilometro

Le frequenze di accadimento di eventi di incendio, per diverse gallerie nel mondo sono riportati nelle successive tabelle:



PAESE	GALLERIA	LUNG (m)	ANNI DI INDAGINE	VOLUME DI TRAFFICO ANNUALE (10 <sup>6</sup> veic/anno)	EVENTI DI INCENDIO					
					Automobili		Mezzi pesanti		Tutti i veicoli	
					n°	Tasso (10 <sup>8</sup> veic/anno)	n°	Tasso (10 <sup>8</sup> veic/anno)	n°	Tasso (10 <sup>8</sup> veic/anno)
Canada	Ville-Marie	2.800	1988-1991	28.5	-	-	-	-	-	0.3
	L. Hippolyte Lafontaine	1.400	1987-1991	40.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Francia	Croix Rousse	1.800	1985-1991	29.4	6	2.0	0	0.0	6	1.8
	Fourviere	1.800	1985-1991	34.9	7	1.8	1	1.9	8	1.8
	Vieux Port	600	1989-1994	23.9	6	2.0	0	0.0	6	1.8





**“Sapienza”  
Università di Roma**



Germania	Elbe	3.30	1990-1991	37.0	13	6.3	9	24.6	22	9.0
Olanda	Benelux	1.300	1986-1988	25.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Coen	1.200	1986-1988	30.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Norvegia	Oslo	1.800	1990-1993	18.3	-	-	-	-	-	2.0
Svezia	Fredhall	200	1987-1991	36.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Soder	1.100	1987-1991	25.6	-	-	-	-	-	0.7
	Klara	500	1987-1991	9.6	-	-	-	-	-	15.5
	Karlberg	500	1987-1991	9.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Gran Bretagna	Tyne	1.700	1987-1992	9.7	-	-	-	-	-	25.0



**“Sapienza”  
Università di Roma**



USA	Brooklyn Battery	3.200	1989-1991	21.0	-	-	-	-	-	23.0
			1989-1991							
	Queens Midtown	2.800	1987-1997	26.4	-	-	-	-	-	14.0
	Lincoln	2.500		38.3	-	-	-	-	-	15.0

Direzione Traffico	PAESE	GALLERIA	LUNG (m)	ANNI DI INDAGINE	VOLUME DI TRAFFICO ANNUALE (10 <sup>6</sup> veic/anno)	EVENTI DI INCENDIO									
						Automobili		Mezzi pesanti		Tutti i veicoli					
						n°	Tasso (10 <sup>8</sup> veic/anno)	n°	Tasso (10 <sup>8</sup> veic/anno)	n°	Tasso (10 <sup>8</sup> veic/anno)				



**“Sapienza”  
Università di Roma**



Traffico	Francia	Dullin	1.500	1984-1991	7.3	1	1.6	0	0.0	1	1.3	
		Vuache	1.400	1990-1993	4.8	1	3.0	0	0.0	1	2.0	
		Chatillon	700	1990-1992	6.0	1	10.4	0	0.0	1	8.0	
		St.German de Joux	1.200	1990-1992	6.0	0	0.0	1	3.4	1	8.1	
	Portogallo	Aguas Santas	300	1991	7.6	0	0.0	0	0.0	0	10	
		Svezia	Karra	400	1987-1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
			Sorvik	200	1987-1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Askloster	300	1987-1991	4.0	-	-	-	-	-	19.0		
Traffico	Austria	Perjen	2.900	1987-1991	3.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Amberg	3.000	1987-1991	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Pfänder	6.720	1985-1988	3.6	-	-	-	-	-	0.7	



	Francia	L'Epine	3.100	1984-1991	5.8	1	0.6	1	40.0	2	1.1	
		Chamoise	3.300	1988-1992	8.5	1	1.5	5	22.6	6	6.8	
	Norvegia	Hvaler	3.800	1989-1990	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Flekkery	2.300	1989-1990	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Ellingsoy	3.500	1989-1990	1.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Valderoy	4.500	1989-1990	0.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	Svezia	Windo	500	1987-1990	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	Galleria di montagna con Traffico	Austria	Arlberg	14.00	1987-1991	1.7	-	-	-	-	-	2.5
			Katschberg	0	1987-1991	3.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0
			Tauern	5.400	1987-1991	4.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
			6.400									



Francia / Italia	Frejus	12.90 0	1980-1991	1.0	3	3.5	6	12.7	9	8.6
	Mont Blanc	11.60 0	1985-1992	1.9	4	1.5	17	12.9	21	5.4
Giappone	Kan-etsu	11.00 0	1985-1992	7.3	13	1.5	-	-	-	-
Svizzera	Gaothard	16.90 0	1981-1987	3.7	-	-	-	-	-	3.0
	Seelisberg	9.300	1981-1987	4.2	-	-	-	-	-	2.0
	San Bernardino	6.600	1968-1987	1.7	-	-	-	-	-	5.0
			1978-1986	11.0	-	-	-	-	-	1.0
	Belchen	3.200								

**Tabella 4.** Eventi di incendio in gallerie autostradali in differenti paesi

L'esame delle tabelle sopra riportate evidenzia come:

- la frequenza di accadimento media di un evento di incendio nelle gallerie stradali non supera in alcun caso 25 incendi per  $10^8$  veicoli per chilometro;
- le gallerie urbane sono caratterizzate da una frequenza di accadimento maggiore delle altre tipologie di galleria;
- il 40% delle gallerie rilevate non è mai stato interessato da evento incendio;
- la frequenza di accadimento di eventi di incendio causati da veicoli pesanti, in numerose gallerie (Chamais, Elba, Frejus, Monte Bianco), risulta essere notevolmente maggiore rispetto alla frequenza di accadimento di eventi di incendio causati da autovetture;
- una frequenza di accadimento compresa fra un incendio al mese e un incendio all'anno per galleria, si riscontra solamente per gallerie molto lunghe e per gallerie caratterizzate da un elevato volume di traffico;
- il rischio che un veicolo sia interessato da un evento di incendio, tende ad aumentare in caso di surriscaldamento del motore (gallerie con carreggiata in salita ripida o precedute da lunghi percorsi in pendio ascendente) o per riscaldamento dei freni (lunghe discese);
- considerato il numero totale di guasti ed eventi incidentali in galleria, in accordo alle statistiche disponibili, gli eventi di incendio sono eventi rari:
  - o 1 evento di incendio per 100 ÷ 500 guasti;
  - o 1 evento di incendio per 10 ÷ 20 eventi incidentali.

Gli eventi di incendio gravi, con rilevanti conseguenze per le persone, per i veicoli e per le strutture delle gallerie, sono eventi rari, ma ad elevate conseguenze.

La successiva tabella sintetizza per un lasso temporale esteso (dal 1949 al 2001) gli eventi di incendio caratterizzati da elevate conseguenze verificatisi in diverse gallerie stradali nel mondo:

ANNO	GALLERIA	PAESE	VEICOLI ORIGINE INCENDIO	PROBABILE CAUSA	DURATA INCENDIO	CONSEGUENZE SU
------	----------	-------	--------------------------------	--------------------	--------------------	----------------

1949	Holland L=2.550 m	New York USA	1 lorry loaded with 11 t. of carbon bisulfur	Load falling of lorry	4 h	66 intossicati	10 lorries 13 cars	Danno grave per 200 m
1968	Moorfleet L= 243 m	Amburgo Germania	1 lorry trailer (14 t. of polyethene bags)	Brakes jamming	1 h 30 min	Nessuna	1 trailer	Danno grave per 34 m
1975	Guadarrama L=3.330 m	Guadarrama Spagna	1 lorry loaded with tanks of pine resin	Sconosciuta	2 h 45 min	Nessuna	1 lorry	Danno grave per 210 m
1976	B6 L= 430 m	Parigi Francia	1 lorry loaded with 16 t. of polyester in bundles	Sconosciuta	1 h	12 intossicati	1 lorry	Danno grave per 150 m
1978	Velsen L= 770 m	Velsen Olanda	2 lorries + 4 cars	Front-back collision	1 h 20 min	5 morti 5 feriti	2 lorries 4 cars	Danno grave per 30 m
1979	Nihonzaka L=2.045	Shizuoka Giappone	4 lorries + 2 cars	Front-back collision	4 giorni	7 morti 2 feriti	127 lorries 46 cars	Danno grave per 1.100 m
1980	Kajiwara L= 740 m	Giappone	1 truck (4 t.) with 3.600 paint in 200 cans + 1 truck (10 t.)	Collision with side wall and overturning		1 morti	1 truck (4 t) 1 truck (10 t)	Danno grave per 280 m

1982	Caldecott L=1.028 m	Oakland USA	1 lorry + 1 coach + 1 car 33.000 l. of petrol	Front-back collision	2 h 40 min	7 morti 2 feriti	3 lorries + 4 cars + 1 coach	Danno grave per 580 m
1983	Fréjus L=12.868 m	Modane Francia- Italia	1 lorry loaded with plastic materials	Gear box breaking	1 h 50 min	Nessuna	1 lorry	Danno grave per 200 m
1984	Felbertau ern L=5.130 m	Austria	1 bus	Blocking brakes	1 h 30 min	Nessuna	1 bus	damage to ceiling and equipment for 100 m
1984	Gotthard L=16.321 m	Goeschen en Svizzera	1 lorry loaded with rolls of plastic	Fire engine in	24 min	Nessuna	1 lorry	Danno grave per 30 m
1987	Gumfens L=340 m	Berna Svizzera	1 lorry	Mass collision on slippery road	2 h	2 morti	2 lorries 1 van	slight damage
1993	Serra Ripoli L= 442 m	Bologna Italia	1 car + 1 lorry loaded with rolls of paper	Vehicles out of control and collision	2 h 30 min	4 morti / 4 feriti	4 lorries 11 cars	serious damege to lining
1994	Gotthard L=16.321 m	Goeschen en Svizzera	1 lorry + trailer loaded with bikes wrapped in carton and plastic	Friction wheel/load ing bridge	2 h	Nessuna	1 lorry + trailer	serious damage to ceiling, pavement and equipment, tunnel closed for 2.5 days
1995	Pfänder L=6.719 m	Austria	1 lorry + 1 van + 1 car	Collision	1 h	3 morti	1 lorry 1 van 1 car	serious damage to ceiling and equipment, tunnel closed for 2.5 days



1996	Isola delle Femmine L= 150 m	Italia (Sicilia)	1 tanker with liquid gas + 1 little bus	Wet road collision of a bus with a tanker (stopped because of a previous collision), explosion	Unknown	5 morti 20 feriti	1 tanker 1 bus 18 cars	Damages to the tunnel lining and lighting equipment
1999	Tunnel Monte Bianco	Italia - Francia	1 HGV with frozen vegetable fats	Sconosciuta	72 h	39 morti	8 HGV 11 cars	Damages to the tunnel lining and lighting equipment
1999	Tauern Tunnel	Austria (Flachau)	1 HGV with paints	Front-back collision	Unknown	12 morti	1 HGV	Damages to the tunnel lining and lighting equipment
2000	Gothard Tunnel	Svizzera	1 HGV with tyres	Frontal collision	36 h	11 morti	2 HGV	Damages to the tunnel lining and lighting equipment

**Tabella 5.** Eventi di incendio caratterizzati da elevate conseguenze nelle gallerie stradali

L'esame degli effetti sulle persone e dei danni alle strutture riportati in tabella consentono una stima delle conseguenze in termini di danno derivante da un evento di incendio in galleria:

- rischio grave per le persone (utenti e soccorritori) dovuto a intossicazioni, soffocamento, ustioni;
- distruzione degli impianti della galleria;
- danni alla struttura (sfogliatura e distacco del calcestruzzo, surriscaldamento delle armature metalliche, crollo dei controsoffitti);
- distruzione o danni gravi ai veicoli coinvolti ed ai beni trasportati;
- chiusura delle gallerie per tempi anche molto lunghi in relazione ai danni riportati, con conseguente aumento della circolazione sulla viabilità adiacente ed alternativa, ed incremento dei rischi di incidente.

#### **4. *Requisiti minimi***

Il seguente capitolo sintetizza i contenuti della Direttiva 2004/54/CE e del D. Lgs. 05/10/2006 funzionali all'applicazione della metodologia dell'analisi di rischio nella progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali.

La Direttiva 2004/54/CE, ha lo scopo di “garantire un livello minimo di sicurezza agli utenti della strada nelle gallerie della rete stradale transeuropea mediante la prevenzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria nonché mediante la protezione in caso di incidente”.

La Direttiva, per espresso rimando, deve essere applicata “a tutte le gallerie della rete stradale transeuropea di lunghezza superiore a 500 m, siano esse già in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progetto”, provvedendo affinché “le gallerie (...) soddisfino i requisiti minimi di sicurezza di cui all'allegato I”.

Qualora determinati requisiti strutturali di cui all'allegato I possano essere soddisfatti unicamente tramite soluzioni tecniche che non sono realizzabili o che lo sono soltanto a un costo sproporzionato si può “accettare la realizzazione di misure di riduzione dei rischi come soluzione alternativa a tali requisiti, purché le misure alternative si traducano in una protezione equivalente o accresciuta”. L'efficacia di tali misure deve essere dimostrata mediante un'analisi dei rischi effettuata in conformità delle disposizioni dell'articolo 13 della Direttiva stessa. Si possono prescrivere “requisiti più severi sempre che questi non siano in contrasto con quelli prescritti dalla presente direttiva”.

##### **4.1 *Le misure di sicurezza indicate dalla Direttiva 2004 / 54 / CE e dal D. Lgs. 05/10/2006***

Gli elementi fondamentali nella progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali, come indicati dalla direttiva e dal decreto di recepimento, inseriti nell'ambito di un approccio sistemico-funzionale del progetto sono:

Parametri di Sicurezza (Lunghezza, Volume e Composizione del Traffico, Caratteristiche Geometriche della galleria)

Requisiti Minimi Obbligatorii.

I parametri di sicurezza sono finalizzati alla definizione delle misure di sicurezza da realizzare nel sistema galleria costituito dall'infrastruttura, dall'esercizio, dagli utenti e dai veicoli.

I requisiti minimi sono finalizzati a garantire che le misure di sicurezza adottate assicurino un “*livello minimo di sicurezza*” per le gallerie. Il discostamento dai prescritti requisiti minimi è consentito, seppure in misura limitata a condizione che le misure alternative di riduzione del rischio previste garantiscano un livello di sicurezza almeno equivalente al livello di sicurezza determinato dal soddisfacimento dei requisiti minimi, fermo restando che non è consentito discostarsi dai requisiti per quanto concerne la progettazione delle seguenti infrastrutture di sicurezza:

Stazioni di emergenza.

Segnaletica

Piazzole di sosta.

Uscite di emergenza

Comunicazioni radio.

Il volume di traffico, definito come media annua del traffico giornaliero per corsia in una galleria, è un parametro globale utilizzato per caratterizzare il flusso del pericolo potenziale in galleria.

La determinazione del volume di traffico deve essere effettuata considerando le maggiorazioni connesse alla percentuale dei veicoli pesanti previsti secondo le seguenti raccomandazioni:

ogni veicolo a motore conta per una unità,

qualora il numero di veicoli pesanti con stazza maggiore di 3,5 t superi il 15 % della media annua del traffico giornaliero ovvero il traffico giornaliero stagionale superi significativamente la media annua del traffico è necessario valutare i rischi supplementari attraverso la stima di un opportuno volume di traffico equivalente.

#### *4.2 Sintesi delle misure di sicurezza indicate dalla Direttiva 2004/54/CE e dal D. Lgs. 05/10/2006*

Le misure di sicurezza individuate dalla Direttiva e classificabili, in prima approssimazione come *misure di sicurezza strutturali* e *misure di sicurezza infrastrutturali*, sono:

## **MISURE STRUTTURALI**

Lunghezza della galleria.	(S)
Numero di fornici.	(S)
Numero di corsie.	(S)
Geometria della sezione trasversale.	(S)
Allineamento verticale e orizzontale.	(S)
Tipo di costruzione.	(S)
Traffico unidirezionale o bidirezionale.	(S)
Volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo).	(T,M)
Rischio di congestione (giornaliero o stagionale).	(T,M)
Tempo di intervento dei servizi di pronto intervento.	(C,M)
Presenza e percentuale di veicoli pesanti.	(T,C,M)
Presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose.	(T,C,M)
Caratteristiche delle strade di accesso.	(S)
Larghezza delle corsie.	(S)
Considerazioni relative alla velocità.	(T,C,M)
Condizioni geografiche e meteorologiche.	(S,C,M)

## **MISURE INFRASTRUTTURALI:**

Volume di traffico.	(T,C,M)
Geometria della galleria.	(S)
Vie di fuga e uscite di emergenza.	(S)
Accesso per i servizi di pronto intervento.	(S)

Piazzole di sosta.	(S)
Drenaggio.	(S)
Caratteristiche ignifughe delle strutture.	(S)
Illuminazione.	(I <sub>1</sub> )
Ventilazione.	(I <sub>2</sub> )
Stazioni di emergenza.	(S)
Erogazione idrica.	(I <sub>3</sub> )
Segnaletica stradale.	(S,C,M)
Centro di controllo.	(C,M)
Impianti di sorveglianza.	(C,M)
Impianto per chiudere la galleria.	(C,M)
Sistemi di comunicazione.	(C,M)
Alimentazione elettrica e circuiti elettrici.	(I <sub>4</sub> )
Caratteristiche ignifughe degli impianti.	(S)

I simboli riportati accanto alle singole misure individuano il contesto, ovvero i contesti di afferenza ricondotti a classi omogenee e definiti come:

(S) = Strutturale.

(T) = Traffico.

(M) = Monitoraggio.

(C) = Comunicazione.

(I<sub>i</sub>) = Impianti essenziali di valenza primaria.

Il significato attribuito alla classificazione delle misure introdotta risulta essere:

**Misure strutturali (S):** misure che determinano le condizioni al contorno del modello di simulazione dello/gli scenario/i di evoluzione del flusso del pericolo a partire dall'Evento Iniziatore EI.

**Misure di traffico (T):** misure che individuano il flusso del pericolo potenziale istantaneo suscettibile di monitoraggio, ovvero il flusso del pericolo potenziale medio assunto come parametro progettuale nella formulazione del modello del processo di esodo essendo fissati gli scenari incidentali.

**Misure di monitoraggio (M):** definite come l'insieme di impianti deputati al controllo delle condizioni istantanee all'interno della struttura.

**Misure di comunicazione (C):** definite come l'insieme di impianti deputati alla trasmissione dei dati inerenti le condizioni ambientali, l'Early Warning in caso di evento/funzionamento anomalo, il trasferimento di "informazioni" tra l'esterno e interno della galleria.

Ulteriori sottosistemi di sicurezza sono:

- **Impianto di Alimentazione Elettrica (I<sub>4</sub>)** definito come l'impianto destinato a fornire la potenza elettrica effettivamente necessaria e richiesta sia in condizioni di esercizio che in condizioni di emergenza all'alimentazione degli impianti infrastrutturali

- **Impianto di Erogazione Idrica (I<sub>3</sub>)** definito come l'impianto destinato a fornire la disponibilità di approvvigionamento idrico necessaria alla richiesta degli impianti di spegnimento e mitigazione.

Le classi omogenee di misure di sicurezza di cui si deve tenere conto nella procedura di analisi di rischio sono:

(M) = Monitoraggio.

(C) = Comunicazione.

(I<sub>1</sub>) = Impianto di Illuminazione.

(I<sub>2</sub>) = Impianto di Ventilazione.

## 5. *Analisi di rischio*

### 5.1 *Introduzione*

La metodologia dell'analisi di rischio costituisce un corpus ordinato di principi e leggi funzionale alla determinazione del livello di rischio di un dato sistema in funzione delle caratteristiche strutturali ed impiantistiche ad esso proprie e della destinazione d'uso.

La determinazione del livello di rischio è ottenuta attraverso la definizione di idonei indicatori quantitativi, rappresentativi dei danni conseguenti all'evoluzione di eventi critici iniziatori fino agli scenari di fine emergenza e delle probabilità con le quali gli scenari si possono verificare, comparati con prefissati criteri di accettabilità del rischio.

La valutazione dei danni è ottenuta attraverso la modellazione del flusso del pericolo all'interno del sistema condotta per scenari incidentali incompatibili che, a partire dall'evento iniziatore ricostruiscono il Gruppo Completo di Eventi Conseguenza, determinati dal malfunzionamento/inefficacia dei sottosistemi di sicurezza previsti e dalle mutue interazioni fra i sottosistemi di sicurezza stessi.

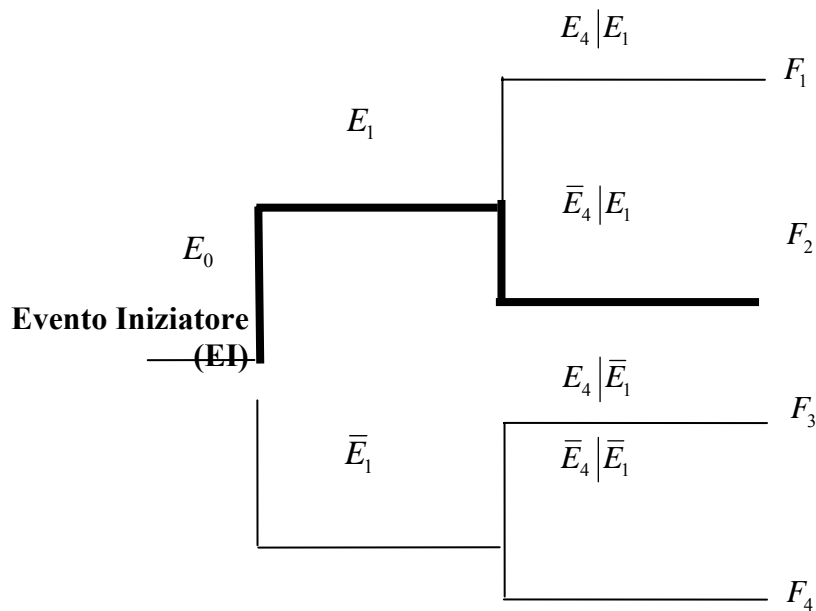
La determinazione del livello di rischio consente la formulazione di un giudizio a priori sull'efficienza del sistema utilizzando il concetto di beneficio netto definito come differenza fra beneficio e detrimento ottenuto dall'adozione di un insieme di misure di sicurezza fissate in accordo alla buona pratica corrente, ovvero, dall'introduzione di misure di sicurezza alternative.

Le probabilità di accadimento ed i danni (numero di vittime, danni economici) degli scenari incidentali incompatibili sono determinate attraverso l'Analisi di Scenario e combinate in un indice di rischio (curva F/N, numero atteso di vittime).

Supposti noti i costi delle misure idonee a ridurre la probabilità di accadimento oppure i danni di un evento incidentale, una procedura di ottimizzazione (implicita o esplicita) può portare ad una decisione sul livello di protezione e sul livello di rischio accettato per un generico sistema.

L'Analisi di Scenario è mirata all'analisi dei processi che si verificano durante uno scenario incidentale responsabili del flusso del pericolo all'interno del sistema considerato.

La differenza qualitativa tra l'analisi di rischio e l'analisi di scenario, è esemplificata in figura:



Albero degli Eventi - Analisi di Rischio Quantitativa Probabilizzata (—) / Analisi di Scenario (—)

Ogni ramo dell'albero degli eventi rappresenta uno scenario incidentale.

La linea spessa individua uno scenario incidentale di evoluzione del flusso del pericolo, mitigato eventualmente dalla presenza dei sottosistemi di sicurezza, oggetto di studio dell'analisi di scenario.

L'adozione di una procedura di analisi di scenario, come strumento decisionale sui livelli di sicurezza desiderati per un sistema, richiede l'identificazione dello scenario di rischio rappresentativo.

L'Analisi degli Scenari rappresentativi può fornire risultati diversi (ottimistici/pessimistici) al management preposto all'assunzione delle decisioni condizionando la scelta delle misure di sicurezza (ridotte/estreme).

La Società, nella fase di utilizzo della galleria, può percepire in modo diverso il risultato delle scelte operate sulla base delle determinazioni ottenute dall'analisi dello scenario incidentale rappresentativo:

- le misure di sicurezza adottate sono percepite come insufficienti;
- le misure di sicurezza adottate sono percepite come estreme e costose.



L'ottimizzazione finale del sistema è raggiunta attraverso una procedura basata su tentativi ed errori e le scelte sono modificate sulla base delle determinazioni risultanti da scenari incidentali non inclusi nella fase di progetto.

L'Analisi di Rischio, considerando tutti gli scenari incidentali possibili, può determinare scelte bilanciate per le misure di sicurezza.

La riduzione delle probabilità dell'evento iniziatore determinata da misure preventive, può essere confrontata con la riduzione delle conseguenze risultanti dalle misure di mitigazione.

Il problema fondamentale intrinseco alla procedura di analisi del rischio è la determinazione dei livelli di rischio accettabili per un sistema.

L'Analisi di Scenario, d'altra parte, costituisce uno strumento di indagine supplementare per l'analisi dettagliata di aspetti particolari connessi alla sicurezza operativa di un sistema.

## Analisi di Rischio

L'Analisi di Rischio si articola nelle seguenti fasi:

<p><b>Analisi Tacnico-progettuale</b></p> <p><b>Albero degli Eventi</b></p>	<p>Definizione del sistema</p> <p>Identificazione e descrizione dei pericoli</p> <p>Identificazione e definizione delle condizioni e modalità di Malfunzionamento dei diversi elementi del sistema mediante analisi di affidabilità</p> <p>Identificazione e descrizione degli scenari incidentali e valutazione delle conseguenze derivanti dal verificarsi di ciascuno di essi</p> <p>Determinazione delle probabilità di accadimento degli eventi iniziatori</p> <p>Quantificazione del rischio in un indice di rischio in funzione delle probabilità di accadimento degli eventi e delle conseguenze ad essi associate</p>
<p><b>Valutazione del Rischio</b></p>	<p>introduzione di limiti e prescrizioni sull'accettabilità del rischio</p>
<p><b>Riduzione/e Controllo del Rischio</b></p>	<p>Identificazione delle misure di riduzione e di controllo del rischio</p>

Gli indicatori quantitativi possono essere classificati in funzione delle conseguenze.

<p>Numero di vittime</p>	<p>Rischio Individuale</p> <p>Rischio Sociale</p>
<p>Danni economici</p>	<p>Da valutare attraverso i relativi sistemi territoriali di uso dei suoli e di attività economiche dirette e di indotto, connesse all'infrastruttura</p>

### **5.1.1 Tollerabilità del rischio**

Gli elementi teorici della Tollerabilità del Rischio, come formulata dalla UK-Health and Safety Executive (HSE) ed applicata all'analisi degli incidenti rilevanti in diverse tipologie di impianti, possono essere così sintetizzati:

- identificazione di un livello minimo di rischio, ossia, identificazione di un livello di rischio largamente accettato e così basso da non richiedere ulteriori riduzioni attraverso l'introduzione di misure specifiche;
- identificazione di un livello massimo di rischio, ossia, identificazione di un livello di rischio così alto da non essere perseguibile in condizioni di esercizio della struttura e da non poter essere concesso dagli enti di controllo;
- esistenza di una regione intermedia tra i livelli di rischio, minimo e massimo, entro la quale il livello di rischio deve essere ridotto, tendendo al conseguimento del livello di rischio minimo, attraverso l'adozione di idonee misure compatibili con i costi addizionali connessi alla riduzione del rischio residuo.

### **5.1.2 Misure del Rischio**

Le misure del rischio comunemente adottate nell'ingegneria dei trasporti sono:

il Rischio Individuale per chilometro;

il Rischio Annuo per Gruppi di Riferimento (addetti / utenti);

il Rischio per Passaggio

La prima misura può risultare funzionale in quanto favorisce il confronto e l'equiparazione del rischio tra tracciato stradale in superficie e tracciato stradale in sotterraneo, veicolando il messaggio di assenza di Rischio Addizionale per la vita nell'utilizzo di un tracciato stradale in sotterraneo, sebbene le tipologie di pericolo proprie ai due tracciati siano sostanzialmente diverse.

Paradigmatici in tal senso risultano essere i criteri di accettabilità del rischio formulati per il "Channel Tunnel".

Numero di Vittime	Frequenza per Anno	Frequenza per Anno/Km
10	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
100	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$

### 5.1.3 Criteri di Rischio Individuale

Il rischio individuale può essere calcolato stimando il numero di vittime atteso associato allo scenario incidentale considerato.

I criteri di rischio individuale assicurano tanto la tollerabilità dei livelli medi di rischio, quanto la ragionevolezza della redistribuzione del rischio tra diversi gruppi.

I criteri di rischio individuale per una galleria stradale, non dovrebbero essere formulati riferendosi alla lunghezza della struttura per non trascurare l'effetto delle diverse tipologie di pericolo associate ad un tracciato in sotterraneo, rispetto alle tipologie di pericolo proprie di un tracciato in superficie.

I criteri di rischio individuale per una galleria stradale, potrebbero essere formulati su base annua in accordo al criterio suggerito dall'HSE per diverse tipologie di impianti.

L'HSE definisce:

livello di rischio massimo tollerabile per la morte di un addetto all'impianto con livello di rischio pari a  $10^{-3}$  per anno;

livello di rischio massimo tollerabile per la morte di un non addetto un livello di rischio pari a  $10^{-4}$  per anno;

I livelli di rischio effettivi devono essere controllati ben al di sotto dei livelli massimi tollerabili introdotti, attraverso l'applicazione del principio "ALARP".

Il livello di rischio minimo per un singolo individuo durante un singolo evento incidentale su larga scala è un livello di rischio inferiore a  $10^{-6}$  per anno.

Un livello di rischio individuale considerato trascurabile, è un livello di rischio pari a  $10^{-7}$  per anno.

Gli standard presenti in letteratura per le misure di rischio individuale possono esse ricondotti ad una singola espressione:

$$RI \leq \beta \cdot 10^{-4} \quad [\text{anni}^{-1}]$$

dove  $\beta$  è un coefficiente attraverso il quale si connota la categoria di rischio pertinente al soggetto.

Valori tipici per il coefficiente  $\beta$  sono:

$\beta = 0,1$  per gli utenti

$\beta = 0,01$  per i residenti nella zona di influenza del sistema.

#### **5.1.4 Criteri di Rischio Sociale**

Le misure di rischio sociale proposte in letteratura sono suscettibili di essere rappresentate in forma grafica ovvero formulate in termini analitici.

Il rischio sociale può essere calcolato stimando la probabilità dell'evento per anno "f" ed il numero di vittime associato "N" per ciascun evento identificato e la sua possibile conseguenza.

Ciascuna coppia "f-N" può essere rappresentata con un punto su di un grafico, generando degli istogrammi noti come "distribuzioni f - N".

Le curve F-N rappresentano, su scala logaritmica, la funzione:

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^{\infty} f_N(x) dx$$

dove  $F_N(x)$  è la funzione di distribuzione di probabilità del numero di vittime per anno,  $f_N(x)$  è la funzione densità di probabilità del numero di vittime per anno.

Una misura del rischio sociale, generalizzazione della definizione di rischio percepito e basata sul concetto di (dis) – utilità attesa per un sistema, proprio della teoria dei giochi, assumendo l'accadimento degli eventi incidentali descritto da un processo di Poisson, può essere definita attraverso la relazione:

$$U = \int_0^{\infty} x^{\alpha} C(x) f_N(x) dx$$

nella quale il valore atteso del numero di vittime pesato da un fattore di avversione è applicato ad una funzione di avversione del rischio dipendente dal numero di vittime.

La definizione introdotta, ricorrente nella teoria delle decisioni intraprese in presenza di incertezza (teoria dei giochi), è stata suggerita dal PIARC nell'ambito di studi mirati alla quantificazione della sicurezza nelle gallerie stradali.

Le *funzioni probit* sono relazioni analitiche attraverso le quali una combinazione delle grandezze concentrazione di sostanze tossiche e tempo di esposizione è convertita in percentuale di feriti ovvero in percentuale di vittime ad una determinata distanza dalla sorgente di incendio ovvero dalla sorgente di rilascio di sostanze tossiche e nocive.

La struttura generale delle funzioni probit risulta essere:

$$P_i = A_i \ln(C_i^a t^b) - B_i$$

dove  $C_i$  è la concentrazione della  $i$ -esima sostanza [ppm],  $t$  è il tempo di esposizione [min],  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $a$ ,  $b$  sono coefficienti empirici.

La successiva tabella sintetizza i livelli di sicurezza adottati per le gallerie stradali negli studi condotti dagli enti di controllo in Olanda:

		HSL	Western Scheldt	Betuwe
Rischio Individuale	Utenti	$1,5 \cdot 10^{-10}$ / Km /anno		$1,0 \cdot 10^{-10}$ / Km /anno
	Addetti	$5,0 \cdot 10^{-5}$ / Km /anno		$5,0 \cdot 10^{-5}$ / Km /anno
Rischio Sociale	$F_N$	$4,0 \cdot 10^{-2}$ /Km / $N^2$ /anno/Km	$1,0 \cdot 10^{-2}$ / $N^2$ /anno/Km	$1,0 \cdot 10^{-2}$ /Km / $N^2$ /anno/Km

Il criterio per il Rischio Sociale connesso ad una galleria stradale, sulla base dell'analisi delle statistiche incidentali reperite nella letteratura libera e precedentemente discusse, può essere così formulato:

il rischio di un evento incidentale, per il quale si verifichi la morte di un numero di individui maggiore - uguale a 50 in un singolo evento, deve essere considerato non tollerabile se la frequenza è stimata essere superiore ad 1/5000 per anno ( $F = 2 \cdot 10^{-4}$  per anno;  $N = 50$ ).

La retta passante per il punto di coordinate F-N indicate, con una pendenza pari a “-1”, definisce il livello di Rischio Massimo Tollerabile.

La retta ottenuta traslando in modo rigido 3 decenni al di sotto la retta rappresentativa del livello di Rischio Massimo Tollerabile, definisce il Livello di Rischio Trascurabile.

La retta così ottenuta, corrisponde ad “1 fatalità” (N=1) in 1/100000 per anno ( $F = 10^{-5}$  per anno); analogamente, “100 fatalità” (N=100) corrispondono ad 1/1000000000 per anno ( $F = 10^{-7}$  per anno).

Il livello di rischio largamente accettato è definito da una retta tracciata traslando in modo rigido 2 decenni al di sotto la retta rappresentativa del livello di rischio massimo tollerabile.

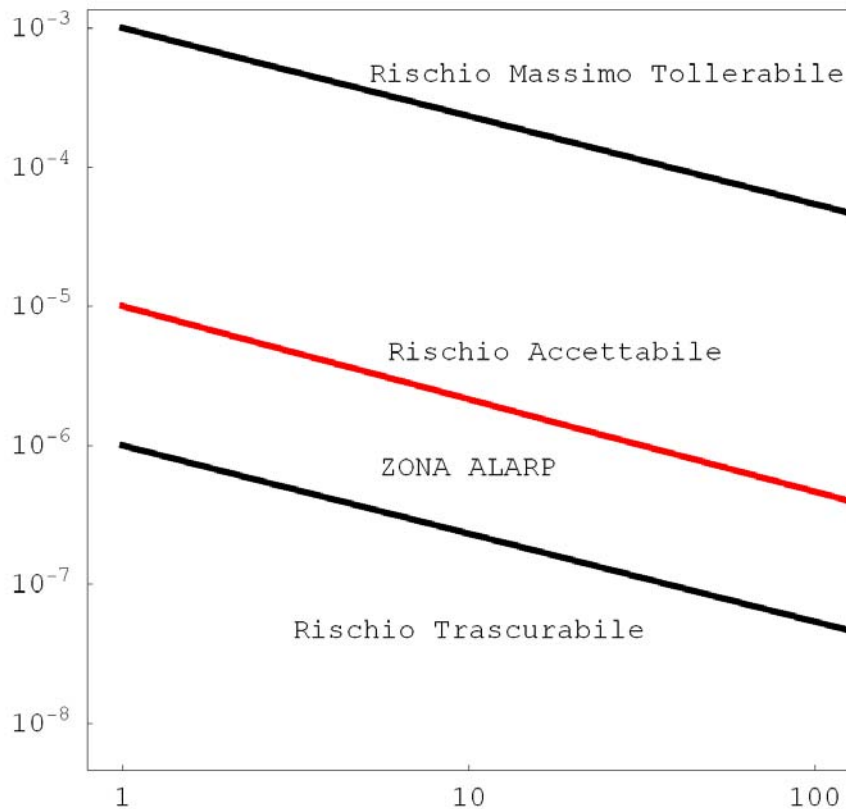
La retta così ottenuta è definita come N=1,  $F=10^{-4}$  per anno; N = 100,  $F=10^{-6}$  per anno.

Nella figura successiva si riportano le rette che identificano rispettivamente la soglia di Rischio Massimo Tollerabile e quella di Rischio Trascurabile, tracciate secondo il criterio definito; la retta che identifica le condizioni di Rischio Accettabile è puramente indicativa, essendo dipendente dalla scelta della galleria di riferimento e dunque dalle sue caratteristiche geometrico-strutturali nonché dal volume di traffico. Pur nell’ambito della suddetta variabilità relativa al posizionamento della retta del Rischio Accettabile si ritiene la mutua distanza tra tale retta e i limiti di Rischio Massimo Tollerabile e Rischio Trascurabile coerente con le condizioni imposte dai requisiti minimi.

La zona di applicazione del principio “**ALARP**” (As Low As Reasonably Practicable) è la zona compresa tra la curva relativa al Rischio Massimo Tollerabile e la curva del Rischio Accettabile.

Il *dominio delle misure compensative* è il dominio di applicazione del *principio ALARP* in accordo alla metodologia dell’analisi di rischio.

Il principio ALARP è utilizzato per la scelta giustificata delle misure compensative necessarie quando il sistema galleria analizzato non soddisfa i requisiti minimi di sicurezza.



## 5.2 Procedura di Analisi di Rischio

L'Analisi di Rischio Quantitativa probabilizzata è lo strumento di validazione di scelte progettuali sulla base di opportuni indicatori quantitativi del livello di sicurezza.

A partire dal Gruppo Completo di Eventi Iniziatori Incompatibili si descrive l'evoluzione del flusso del pericolo che investe il sistema “galleria / sistemi e misure di sicurezza / traffico”, fino ad individuare il Gruppo Completo di Eventi Conseguenza Incompatibili (scenari di fine emergenza), tenendo conto delle interazioni tra i diversi sottosistemi che lo compongono. La caratterizzazione degli scenari di fine emergenza avviene attraverso la quantificazione della probabilità di accadimento correlata e dell'entità del danno associato alle conseguenze di ogni evento di fine emergenza. A partire da tali dati si determina il valore dell'indicatore di rischio (atteso o cumulato/sociale) che è confrontato con la soglia prestabilita compatibile con il valore dell'indicatore associato ai requisiti minimi.

Le analisi che intervengono nell'Analisi di Rischio sono: l'Analisi delle Decisioni (DA), l'Analisi ad Albero degli Eventi (Event Tree Analysis - ETA) e l'Analisi ad Albero delle Cause (Fault Tree Analysis – FTA)/Analisi di affidabilità.



In particolare, l'analisi delle decisioni permette di valutare, per mezzo degli indicatori di rischio e rispetto ad un criterio limite prestabilito, l'accettabilità della singola scelta progettuale; l'analisi ad albero degli eventi definisce, in funzione della scelta progettuale adottata, le conseguenze di date condizioni critiche iniziali, identificando sequenze di sottoeventi mutuamente concatenati e riferiti ciascuno alla efficacia/efficienza/malfunzionamento di ciascun sottosistema presente nella galleria; l'analisi ad albero delle cause stima la probabilità di accadimento del singolo sottoevento, ovvero di malfunzionamento del singolo sottosistema, a partire dalla definizione di criteri di affidabilità elementari.

In particolare, l'Analisi di Rischio per gallerie autostradali si intende definita da un'analisi ad albero degli eventi, riferita all'evento critico iniziatore (ad esempio "incendio in galleria") e ad una successione di sottoeventi che caratterizzano il comportamento dei seguenti sottosistemi:

- **Rilevazione**

Videosorveglianza,

Controllo automatico del traffico agli ingressi

Controllo automatico del traffico all'interno

Controllo automatico di incidente – SOS,

Rilevazione incendio,

Rilevatori di qualità ambientale;

- **Comunicazione**

Sistema di tele-gestione e controllo,

Impianti radio e telefonia mobile;

- **Ventilazione**

Impianto longitudinale / trasversale (puro o parziale) / semitrasversale (puro o reversibile);

- **Illuminazione**

Illuminazione ordinaria,

Illuminazione di emergenza,

Illuminazione di sicurezza,

Semafori e sistemi di disponibilità/canalizzazione corsie,

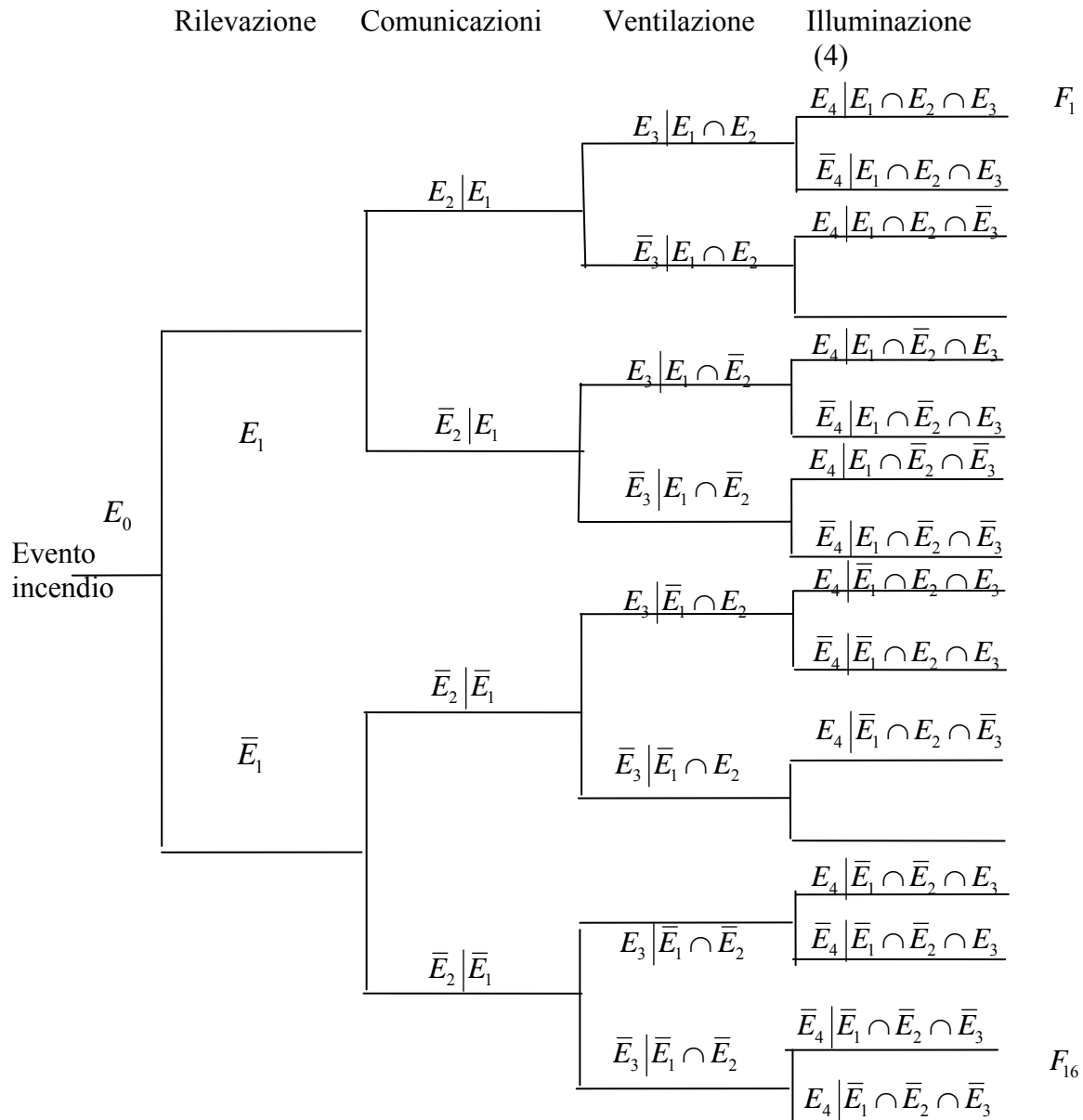
Segnalazione luminosa Illuminazione di evacuazione,

Pannelli a messaggi variabile PMV.

Il sistema di potenza o energia è alla base del funzionamento di ciascuno dei sottosistemi individuati; l'eventuale perdita di potenza è causa del non funzionamento dei sottosistemi di sicurezza. L'analisi di rischio assume l'efficienza standard per il sistema di fornitura di potenza.

La successiva figura mostra lo schema ad albero completo necessario all'applicazione dell'analisi di rischio ad una galleria stradale ipotizzando l'evento critico iniziatore costituito da un evento di incendio.

Lo schema ad albero identifica la successione dei sottoeventi critici, esemplifica la mutua interazione tra i diversi sottosistemi di sicurezza, quantifica il contributo di ogni sottoevento critico associato ad un determinato sottosistema di sicurezza sulle probabilità di accadimento del corrispondente evento di fine emergenza.



I percorsi, che possono nascere dall'evento incidentale iniziatore (evento incendio) fino agli esiti finali  $F_i$  ( $i=1,\dots,16$ ), si ottengono come intersezione dei sottoeventi associati ai diversi sottosistemi secondo una logica on – off. Ciascuno dei sottoeventi rappresentato come  $A|B$ , indica l'evento A "condizionato" dal verificarsi dell'evento B, qualunque siano gli eventi A e B; ad esempio il sottoevento  $E_3|E_1 \cap E_2$ , indica che il sottosistema ventilazione ( $E_3$ ) funziona correttamente, posto che i due sottosistemi rilevazione ( $E_1$ ) e comunicazione ( $E_2$ ) funzionino anch'essi correttamente. L'evento indicato con  $\bar{E}_i$ , indica condizioni di malfunzionamento dell'i-esimo sottosistema. Si può verificare che l'intersezione di sottoeventi corrispondenti a rami di un

dato percorso, dia luogo ad un evento impossibile e quindi a probabilità nulla: in tali casi il ramo viene “potato” (eliminato dall’albero).

Compito dell’analisi ad albero delle cause è determinare le probabilità di accadimento dei singoli sottoeventi, tenendo conto delle specificità tecnico-impianistiche del sottosistema a cui si riferiscono; compito dell’analisi ad albero degli eventi è valutare le probabilità di accadimento degli scenari di fine emergenza, come prodotto delle probabilità di accadimento dei singoli sottoeventi presenti sul ramo considerato.

L’indicatore di rischio atteso,  $R$ , è definito come somma dei prodotti tra le probabilità di accadimento dei singoli eventi di fine emergenza  $F_i$  ed i corrispondenti valori dell’indicatore di danno  $D_i$  che caratterizza l’entità delle conseguenze associate all’evento di fine emergenza considerato:

$$R = \sum_{i=1}^{N_c} P(F_i \cap E_0) D_i = P(E_0) \sum_{i=1}^{N_c} P(F_i | E_0) D_i,$$

essendo  $N_c$  il numero di eventi di fine emergenza. Le probabilità degli eventi di fine emergenza si ottengono dal prodotto delle probabilità di funzionamento/malfunzionamento dei sottosistemi corrispondenti ai rami del generico percorso che descrive l’evento aleatorio rappresentativo di un determinato scenario.

L’indicatore di rischio atteso consente la determinazione del rischio individuale per gli utenti della struttura.

L’indicatore di rischio cumulato o sociale  $RC$  è definito come la probabilità di avere un livello di danno superiore ad una data soglia  $D_\alpha$ , comunque assegnata. L’indicatore di rischio cumulato, pertanto, è determinato dalla funzione di probabilità cumulata opposta associata alla distribuzione del danno attribuito agli eventi di fine emergenza:

$$RC = P(D \geq D_\alpha) = \sum_{i=\alpha}^{N_c} P(F_i \cap E_0) = P(E_0) \sum_{i=\alpha}^{N_c} P(F_i | E_0), \quad \alpha \leq N_c.$$

Il parametro di danno dal punto di vista quantitativo può essere riferito convenzionalmente al numero di persone coinvolte nello scenario considerato e che entro un fissato tempo limite non sono in grado di portarsi ad una distanza di sicurezza dal focolaio.

La distanza di sicurezza è determinata dal flusso del pericolo nella struttura (moto dei fumi) caratterizzato dal campo di temperatura e dal campo di concentrazione dei prodotti della combustione (densità ottica e deficit di ossigeno). Essa dipende da una parte dall’efficacia e

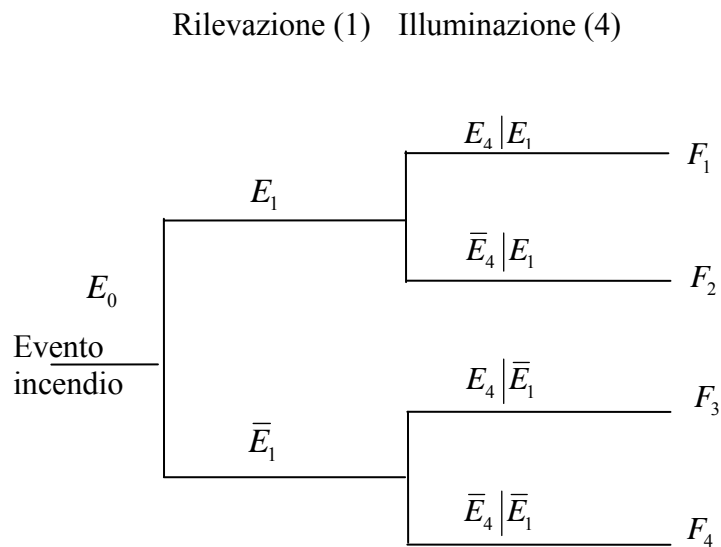
dall'efficienza dei sottosistemi di mitigazione, protezione, autosoccorso / soccorso e dall'altra dalla tipologia di focolaio, caratterizzato in termini di potenza termica sviluppata e di tasso di generazione dei prodotti della combustione.

Il valore del rischio atteso  $R$  e l'andamento del rischio cumulato  $RC$ , permettono la determinazione del livello di sicurezza di una generica galleria.

L'accettabilità della soluzione progettuale (anche in termini di adeguamento), è misurata confrontando l'indicatore di rischio atteso con il valore limite di riferimento e l'andamento del rischio cumulato con le curve F-N precedentemente definite.

L'applicazione dei requisiti minimi obbligatori, richiesti dalla direttiva e dal decreto di recepimento, che limitano la dotazione impiantistica al sottosistema di rilevazione ed al sottosistema di illuminazione, determinata la semplificazione dell'albero degli eventi.

L'albero degli eventi si semplifica in modo significativo riferendosi ad una galleria di lunghezza  $L = 1000$  m con un volume di traffico pari a 2000 veicoli al giorno. Lo schema semplificato necessario alla determinazione del livello di rischio della struttura considerata è mostrato nella figura seguente.



Grafo n°2: schema ad albero semplificato (500 - 1000 m)

### 5.3 *Malfunzionamenti e concatenazione dei sottosistemi di sicurezza*

Lo scenario analizzato considera l'evoluzione del sistema galleria per un evento iniziatore identificato con un evento incendio rispetto all'efficace/efficiente funzionamento dei sottosistemi di sicurezza ovvero all'inefficacia/inefficienza degli stessi.

L'evoluzione del sistema è descritta in modo qualitativo esemplificando le mutue interazioni tra i diversi sottosistemi di sicurezza ed evidenziando le conseguenze possibili in termini del numero di persone salvate.

Lo schema ad albero degli eventi precedentemente costruito consente l'esemplificazione della concatenazione tra sottosistemi di sicurezza e la determinazione dei danni possibili:

ipotizzato un malfunzionamento del sistema di rilevazione, ovvero l'impossibilità di rilevazione di eventuali incidenti all'interno della galleria, con conseguente sviluppo di incendio, il sistema di comunicazione non può essere attivato, a meno di segnalazioni dall'interno o dall'esterno della galleria verso centri di gestione dell'emergenza; con riferimento ai requisiti minimi prescritti per il sottosistema comunicazione un malfunzionamento del sottosistema di rilevazione comporta un ritardo nella comunicazione; il ritardo nella comunicazione determina un ritardo nell'attivazione di tutti i sottosistemi ad esso connessi in modo automatico; in particolare, l'attivazione in ritardo del sottosistema ventilazione può indurre un'accelerazione nello sviluppo dell'incendio; gli eventi  $E_2 | \bar{E}_1, E_3 | \bar{E}_1 \cap E_2$  si verificano solo per sottoeventi critici di malfunzionamento dei sottosistemi rilevazione e comunicazione.

I sottosistemi comunicazione e ventilazione sono dipendenti dal sottosistema rilevazione.

Ipotizzato un malfunzionamento del sottosistema di comunicazione, in particolare del sistema di controllo e gestione, il sottosistema ventilazione potrebbe non essere attivato ovvero funzionare in modo improprio alimentando il focolaio oppure non consentendo la corretta gestione dei fumi ai fini dell'auto-salvamento; tale concatenazione di sottoeventi critici può essere attribuita ad errore umano, nel caso di gestione semi-automatica dell'impianto, ovvero all'impossibilità di disattivazione del sistema di ventilazione in esercizio; gli eventi  $E_3 | E_1 \cap \bar{E}_2$  e  $E_3 | \bar{E}_1 \cap \bar{E}_2$  sono pertanto in via di principio peggiori dei corrispondenti complementari: una comunicazione non funzionante ovvero non efficace può determinare condizioni di malfunzionamento del sistema di ventilazione rispetto alle condizioni di funzionamento corretto.

Il funzionamento del sottosistema ventilazione è condizionato dal funzionamento del sottosistema comunicazione.

Ipotizzato un malfunzionamento dei sottosistemi rilevazione e comunicazione si determina un malfunzionamento del sottosistema illuminazione, stante la tipologia degli impianti ovvero dei componenti (attivi o attivabili, automatici o semiautomatici), in particolare per quanto riguarda l'attivazione dell'illuminazione di emergenza.

Il sottosistema illuminazione è indipendente dal sottosistema ventilazione.

Le mutue interazioni e le concatenazioni dei malfunzionamenti dei sottosistemi di sicurezza determinano il campo termo-fluido-dinamico all'interno della struttura e condizionano il flusso degli utenti in fase di esodo. L'interazione fra micro-clima all'interno della struttura e il flusso degli utenti in fase di esodo, ricordando la definizione adottata per l'indicatore di rischio sociale (o cumulato), determina il livello di danno conseguente al verificarsi di una data successione di sottoeventi critici misurato in termini di numero di vittime atteso.

I parametri che caratterizzano l'interazione tra campo fluido-dinamico e il flusso degli utenti in esodo nella galleria sono: la potenza termica e la portata di fumi rilasciate dal focolaio, il flusso dei prodotti della combustione, la legge costitutiva che caratterizza il comportamento dell'utente, espressa in termini di velocità di esodo, in risposta ad un assegnato microclima in galleria definito dai livelli medi di temperatura, di visibilità, di livelli di concentrazione di specie tossiche e nocive in diverse sezioni rispetto al focolaio.

Alcuni dei suddetti parametri possono essere considerati grandezze deterministiche, altre grandezze aleatorie: si ritiene di considerare deterministica la caratterizzazione energetica dei focolai e la legge costitutiva attraverso la quale si determina la velocità di esodo degli utenti; si ritiene di considerare grandezze aleatorie le condizioni al contorno del problema fluido-dinamico ed il comportamento degli utenti in condizioni di pericolo.

#### **5.4 *Analisi di scenario***

Nel seguito viene descritta e commentata l'evoluzione di scenari incidentali possibili a partire da uno stato iniziale determinato da un evento critico iniziatore identificato con un incendio fino agli stati di fine emergenza possibili determinati dalla concatenazione di sottoeventi critici determinata dall'efficace/efficiente funzionamento dei sottosistemi di sicurezza della galleria.

Il corretto funzionamento od il malfunzionamento dei sottosistemi rilevazione, comunicazione, ventilazione e illuminazione è di seguito indicato con i simboli  $R^+$ ,  $R^-$ ,  $C^+$ ,  $C^-$ ,  $V^+$ ,  $V^-$ ,  $I^+$ ,  $I^-$ .

### **Evoluzione con fine emergenza $F_1$**

Lo stato di fine emergenza  $F_1$  è descritto da  $E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza e efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

efficienza e efficacia del sistema di comunicazione  $C^+$

efficienza e efficacia del sistema di ventilazione  $V^+$

efficienza e efficacia del sistema di illuminazione  $I^+$

Ogni sottosistema di sicurezza installato nella galleria è in grado di offrire la prestazione assegnata ottima. Il livello di gravità delle conseguenze derivanti dal verificarsi di un incendio in galleria è determinato dalle condizioni di progetto inerenti il corretto funzionamento degli impianti installati e la tipologia di scenario rispetto al quale i diversi impianti sono stati scelti e dimensionati.

Il verificarsi di tale scenario di fine emergenza ovvero la sua probabilità di accadimento è subordinato al fatto che l'evento critico iniziatore sia effettivamente compatibile con le condizioni di funzionamento definite in fase di progetto dei diversi sottosistemi di sicurezza. Data una galleria, dotata di sottosistemi di sicurezza, sulla quale si intende sviluppare una procedura di analisi di rischio rispetto ad un evento critico iniziatore identificato con un evento di incendio, essendo fissate le caratteristiche e la posizione del focolaio e le condizioni di ventilazione, la probabilità che il sistema evolva verso l'evento di fine emergenza  $F_1$  è determinata dalla probabilità che tutti i sottosistemi di sicurezza funzionino in modo corretto e siano stati dimensionati in modo adeguato rispetto alle caratteristiche dell'evento critico iniziatore.

Il processo di esodo degli utenti ed il danno espresso in termini di numero di vittime atteso sono determinati dalle condizioni di progetto.

### **Evoluzione con fine emergenza $F_2$**

Lo stato di fine emergenza  $F_2$  è descritto con  $E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap \bar{E}_4$  ed è caratterizzato da:



efficienza e efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

efficienza e efficacia del sistema di comunicazione  $C^+$

efficienza e efficacia del sistema di ventilazione  $V^+$

inefficienza o inefficacia del sistema di illuminazione  $I^-$

I sottosistemi rilevazione, comunicazione e ventilazione, sono in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; il sottosistema illuminazione, viceversa, non è in grado di fornire per malfunzionamento la prestazione assegnata ottima.

Lo scenario delineato si differenzia dal precedente per quanto attiene alla realizzazione del processo di esodo degli utenti. Un non corretto/inefficace funzionamento del sistema di illuminazione si traduce in una riduzione della visibilità all'interno della galleria progressivamente invasa dai fumi che determina il rallentamento degli utenti in fase di esodo.

### **Evoluzione con fine emergenza F3**

Lo stato di fine emergenza  $F_3$  è descritto con  $E_1 \cap E_2 \cap \bar{E}_3 \cap E_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza e efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

efficienza e efficacia del sistema di comunicazione  $C^+$

inefficienza o inefficacia del sistema di ventilazione  $V^-$

efficienza e efficacia del sistema di illuminazione  $I^+$

I sottosistemi rilevazione, comunicazione ed illuminazione, sono in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; il sottosistema ventilazione, viceversa, non è in grado di fornire per malfunzionamento od inefficacia di funzionamento la prestazione assegnata ottima.

Il termine malfunzionamento od inefficacia di funzionamento del sistema di ventilazione individua una classe ampia di condizioni critiche possibili: (i) l'assenza di ventilazione a seguito di guasto all'impianto, (ii) inefficacia dell'impianto a seguito di variazione delle condizioni climatiche agli imbocchi, (iii) inefficacia nella gestione dell'impianto (scelta dei tempi di attivazione, modalità di gestione della ventilazione in termini di indirizzamento dei fumi ovvero di diluizione ovvero di

confinamento e di estrazione). Al variare del tipo di sottosistema ventilazione adottato, della tipologia di galleria (bidirezionale o unidirezionale) e del volume di traffico, l'inefficacia dell'impianto si traduce nell'impossibilità di determinare la stratificazione ovvero l'estrazione dei fumi nel caso di galleria bidirezionale o unidirezionale con traffico bloccato, ovvero nell'incapacità di indirizzare il moto dei fumi nel senso di marcia dei veicoli nel caso di galleria unidirezionale con traffico non congestionato.

La probabilità che l'evento di fine emergenza  $F_3$  si verifichi, posto il corretto funzionamento dei restanti sottosistemi di sicurezza, è determinata da una parte dalle condizioni di ventilazione naturale e dall'altra dall'insieme di casi critici che il sistema di ventilazione adottato è in grado di controllare e di gestire. La possibilità di controllo e gestione dei casi critici è condizionata dalla resistenza al fuoco dei materiali che costituiscono l'impianto e dai criteri di dimensionamento adottati.

#### **Evoluzione con fine emergenza F4**

Lo stato di fine emergenza  $F_4$  è descritto con  $E_1 \cap E_2 \cap \bar{E}_3 \cap \bar{E}_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza/efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

efficienza/efficacia del sistema di comunicazione  $C^+$

inefficienza/inefficacia del sistema di ventilazione  $V^-$

inefficienza/inefficacia del sistema di illuminazione  $I^-$

I sottosistemi rilevazione e comunicazione sono in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; i sottosistemi ventilazione ed illuminazione, viceversa, non sono in grado di fornire per malfunzionamento od inefficacia di funzionamento la prestazione assegnata ottima.

In questo caso, per il malfunzionamento ed inefficacia di funzionamento del sottosistema ventilazione valgono le considerazioni svolte nell'analisi dello scenario precedente  $F_3$  con l'aggravante costituita dal malfunzionamento del sistema di illuminazione. Tale circostanza, indipendente dal verificarsi di condizioni di guasto per gli altri sottosistemi, determina la riduzione della visibilità in galleria alla quale corrisponde una riduzione della velocità di esodo degli utenti.

### **Evoluzione con fine emergenza F5**

Lo stato di fine emergenza  $F_5$  è descritto con  $E_1 \cap \bar{E}_2 \cap E_3 \cap E_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza/efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

inefficienza/inefficacia del sistema di comunicazione  $C^-$

efficienza/efficacia del sistema di ventilazione  $V^+$

efficienza/efficacia del sistema di illuminazione  $I^+$

I sottosistemi rilevazione, ventilazione ed illuminazione, sono in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; il sottosistema comunicazione, viceversa, non è in grado di fornire per malfunzionamento la prestazione assegnata ottima.

Nel caso in cui si abbia un sistema di gestione semi-automatico l'errore umano è da ritenersi parte integrante delle condizioni di malfunzionamento del sistema di comunicazione.

Lo scenario considerato appare particolarmente gravoso in quanto, essendo il sottosistema comunicazione preposto tanto all'informazione degli utenti sullo scenario incidentale quanto alla gestione del funzionamento in emergenza del sottosistema ventilazione, può determinare l'aggravamento del flusso del pericolo rispetto al flusso del pericolo potenzialmente indotto dalla non attivazione del sottosistema ventilazione.

Una non corretta gestione del sistema di ventilazione può determinare un incremento anomalo della velocità di combustione con conseguente innalzamento dei livelli termici e del tasso di generazione dei fumi dal focolaio, distruggere la stratificazione del flusso favorendo il processo di rimescolamento dei fumi con l'aria ambiente e riducendo la capacità di estrazione del sistema, orientare in modo erroneo il moto dei fumi.

### **Evoluzione con fine emergenza F6**

Lo stato di fine emergenza  $F_6$  è descritto con  $E_1 \cap \bar{E}_2 \cap E_3 \cap \bar{E}_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza/efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

inefficienza/inefficacia del sistema di comunicazione  $C^-$

efficienza/efficacia del sistema di ventilazione  $V^+$

inefficienza/inefficacia del sistema di illuminazione  $I^-$

I sottosistemi rilevazione e ventilazione sono in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; i sottosistemi comunicazione ed illuminazione, viceversa, non sono in grado di fornire per malfunzionamento la prestazione assegnata ottima.

In questo caso, per il malfunzionamento del sottosistema comunicazione valgono le considerazioni svolte nell'analisi dello scenario precedente  $F_5$  con l'aggravante costituita dal malfunzionamento del sistema di illuminazione. Tale circostanza, indipendente dal verificarsi di condizioni di guasto per gli altri sottosistemi, determina la riduzione della visibilità in galleria alla quale corrisponde una riduzione della velocità di esodo degli utenti.

### **Evoluzione con fine emergenza $F_7$**

Lo stato di fine emergenza  $F_7$  è descritto con  $E_1 \cap \bar{E}_2 \cap \bar{E}_3 \cap E_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza/efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

inefficienza/inefficacia del sistema di comunicazione  $C^-$

inefficienza/inefficacia del sistema di ventilazione  $V^-$

efficienza/efficacia del sistema di illuminazione  $I^+$

I sottosistemi rilevazione ed illuminazione sono in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; i sottosistemi comunicazione e ventilazione, viceversa, non sono in grado di fornire per malfunzionamento od inefficacia di funzionamento la prestazione assegnata ottima.

L'azione concomitante degli effetti negativi connessi all'inefficienza/inefficacia dei sottosistemi comunicazione e ventilazione può determinare un incremento del flusso del pericolo con conseguente aumento del danno in termini di rallentamento del processo di esodo da parte degli utenti e di danneggiamento della struttura.

## **Evoluzione con fine emergenza F8**

Lo stato di fine emergenza  $F_8$  è descritto con  $E_1 \cap \bar{E}_2 \cap \bar{E}_3 \cap \bar{E}_4$  ed è caratterizzato da:

efficienza / efficacia del sistema di rilevazione  $R^+$

inefficienza/inefficacia del sistema di comunicazione  $C^-$

inefficienza/efficacia del sistema di ventilazione  $V^-$

inefficienza / inefficacia del sistema di illuminazione  $I^-$

Il sottosistema rilevazione è in grado di fornire la prestazione assegnata ottima; i sottosistemi comunicazione, ventilazione ed illuminazione, viceversa, non sono in grado di fornire per malfunzionamento o inefficacia di funzionamento la prestazione assegnata ottima.

Lo scenario di fine emergenza  $F_8$  è concettualmente analogo al precedente con l'aggravante dovuta al malfunzionamento del sottosistema illuminazione con conseguente riduzione della velocità di esodo degli utenti.

## **Evoluzione con fine emergenza F9 – F16**

Gli scenari di fine emergenza da  $F_9$  a  $F_{16}$  ricalcano gli otto precedentemente descritti con la variante connessa al malfunzionamento o a condizioni di inefficacia del funzionamento del sottosistema rilevazione. Si considera tuttavia che esista una modalità di attivazione manuale dei restanti sottosistemi di emergenza che determina un ritardo nell'espletamento delle relative funzioni.. In queste condizioni, il funzionamento con prestazione assegnata del sottosistema comunicazione è in grado di attivare sia il sottosistema ventilazione sia il sottosistema illuminazione. Le caratteristiche di questa classe di possibili scenari di fine emergenza, dal punto di vista prestazionale, sono pertanto del tutto simili a quelle degli scenari precedentemente identificati; il ritardo di attivazione dei sottosistemi ventilazione ed illuminazione determina un incremento del flusso del pericolo rispetto ai casi precedentemente analizzati.

## **6. *Indicazioni per la progettazione degli impianti di sicurezza nelle gallerie stradali***

Si individuano le misure di sicurezza da adottare sugli impianti installati nelle gallerie stradali, al fine di garantire, confortati nella scelta dai risultati derivanti dall'applicazione della metodologia dell'analisi di rischio, i seguenti obiettivi, qualora si verificano incidenti all'interno di una galleria:

- incolumità degli utenti;
- esodo in sicurezza degli utenti dalla struttura,
- intervento dei servizi di soccorso e spegnimento,
- contenimento dei danni

Il termine "incidente" individua un evento aleatorio come, ad esempio: il malfunzionamento dei dispositivi e degli impianti installati, un incidente stradale, uno sversamento di sostanze infiammabili, un incendio, un rilascio ambientale di sostanze pericolose rispetto ai quali gli utenti risultano coinvolti in uno scenario di pericolo in galleria.

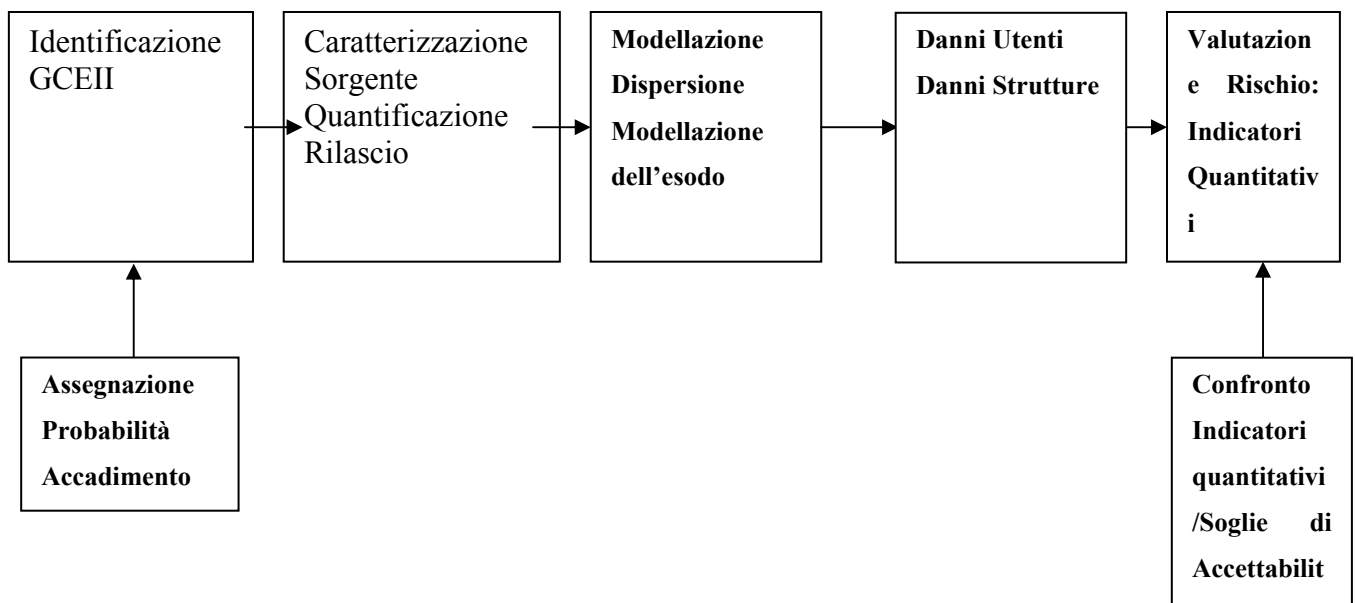
Le indicazioni proposte non coinvolgono le misure di sicurezza preventive da adottarsi per limitare il numero degli eventi incidentali e le conseguenze di questi, nella consapevolezza delle specificità caratterizzanti il singolo ambiente galleria.

Gli obiettivi perseguiti nella formulazione delle indicazioni contenute nel documento sono:

- il rilievo di condizioni anomale all'interno della struttura e le comunicazioni con gli utenti (sorveglianza e rivelazione, segnalazioni di emergenza);
- la protezione e l'esodo degli utenti e l'accesso dei soccorsi (vie di fuga, illuminazione di emergenza, ventilazione);
- la prevenzione in tema di antincendio (reazione e resistenza al fuoco dei materiali e degli impianti, mitigazione e spegnimento, comunicazioni in emergenza, controllo ed evacuazione dei fumi).

### 6.1 Analisi di rischio e progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali

Il capitolo concerne la definizione dei principi della *metodologia di analisi di rischio* integrati in un *approccio prestazionale* alla *progettazione della sicurezza* nelle gallerie stradali. La procedura di progettazione prestazionale della sicurezza per una galleria stradale è esemplificata in figura.



Il primo passo prevede l'identificazione delle modalità attraverso le quali l'energia potenziale è trasferita all'ambiente.

L'evoluzione del flusso del pericolo a partire dal GCEII (Gruppo Completo di Eventi Iniziatori Incompatibili) è definita mediante l'*albero degli eventi*. Gli alberi degli eventi definiscono i possibili percorsi del flusso del pericolo descritti attraverso le relative interferenze dell'insieme di dispositivi e/o impianti con specifiche caratteristiche funzionali, presenti in galleria, il mal funzionamento dei quali, in certe combinazioni, influisce sulla distribuzione del rilascio di energia.

La caratterizzazione completa dell'albero degli eventi richiede, altresì, la stima della *probabilità di accadimento* dei malfunzionamenti possibili in ciascuna delle sequenze incidentali mediante analisi di affidabilità.

La combinazione appropriata dei *tassi di malfunzionamento* determinati su base storico-statistica per i singoli dispositivi ed impianti, errore umano, contributi da prove e manutenzione, è realizzata

seguendo la metodologia di costruzione degli *alberi delle cause* con lo scopo di determinare la probabilità di malfunzionamento dei sistemi installati.

I risultati ottenuti quantificano un insieme di sequenze incidentali attraverso le probabilità di accadimento ad esse proprie e l'intensità del rilascio per ciascuna sequenza incidentale, e quindi, conducono alla quantificazione degli scenari incidentali di fine emergenza caratterizzati dalla *modellazione del processo di dispersione* del rilascio di massa ed energia in ambiente confinato in funzione del tempo e della distanza dalla sorgente. Sono introdotte, nella modellazione del processo di dispersione del rilascio, in funzione della tipologia della struttura e delle caratteristiche del traffico, distribuzioni di probabilità delle condizioni ambientali all'interno della galleria regime di ventilazione, densità di utenti coinvolti.

Il modello di dispersione consente la determinazione delle distribuzioni di probabilità per le *condizioni di sopravvivenza* degli utenti e la determinazione delle *condizioni di esodo* dalla struttura.

Il *rischio sociale* connesso ad eventi incidentali caratterizzati da basse probabilità di accadimento e potenzialmente elevate conseguenze è quantificato attraverso idonei *indicatori di rischio*, successivamente utilizzati per la formulazione di una verifica quantitativa dell'efficienza del sistema galleria attraverso il concetto di *beneficio netto* definito come differenza tra beneficio e detrimento ottenuto dall'adozione di un insieme di misure di sicurezza minime fissate in accordo alla *buona pratica corrente* ovvero dall'introduzione di misure di sicurezza alternative.

Parametri che intervengono nella procedura di Analisi di Rischio:

### **Caratteristiche geometrico – strutturali della galleria**

Lunghezza

Sezione

Pendenza

Tracciato

### **Caratterizzazione del Traffico**

TGM

Composizione (% Veicoli Pesanti)

### **Sistemi di sicurezza**



Alimentazione elettrica

Ventilazione

Illuminazione

Impianto idrico antincendio

Rilevazione incendio

Comunicazioni

### **Comportamento al fuoco dei materiali e degli impianti**

Reazione al fuoco

Resistenza al fuoco

Manutenzione

Prove a fuoco per il collaudo dei sistemi di sicurezza

### **Procedure di gestione**

Esercitazioni

Trasporto di sostanze pericolose

#### *6.1.1 Progetto della sicurezza nelle gallerie stradali*

La metodologia di analisi di rischio quantitativa probabilizzata sostanzia e determina l'approccio adottato per rispondere agli obblighi e alle indicazioni fornite dal decreto.

L'analisi di rischio è lo strumento di indagine quantitativo utilizzato per la progettazione e l'adeguamento della sicurezza nelle gallerie dislocate lungo la rete stradale nazionale.

La scelta metodologica compiuta è suffragata dai risultati dell'analisi dei dati disponibili sugli eventi incidentali ad alta pericolosità nelle gallerie stradali assimilabili ad eventi caratterizzati da bassa probabilità di accadimento ed elevate conseguenze.

L'adozione della metodologia di analisi del rischio consente:

- la determinazione e la verifica del livello di sicurezza, ovvero l'accettabilità del rischio per un sistema galleria, ottenuta per confronto con requisiti minimi soddisfatti, quando i valori assunti dai

parametri rappresentativi delle caratteristiche strutturali, impiantistiche e di traffico, siano tali da potere indurre un flusso del pericolo significativo nel sistema galleria;

- la scelta delle misure strutturali ed impiantistiche, ovvero il progetto dei sottosistemi di sicurezza preposti alla realizzazione delle misure impiantistiche, mirate ad assicurare l'accettabilità del rischio richiesta per il sistema galleria considerato;

- l'analisi dei sottosistemi di sicurezza richiesti per la realizzazione di misure impiantistiche equivalenti in caso di non compatibilità tecnico-economica dei requisiti minimi di sicurezza;

- l'analisi di soluzioni tecnologiche di nuova concezione allo scopo di dotare il sistema galleria di sottosistemi di sicurezza, alternativi e/o integrativi a quelli minimi obbligatori, che garantiscano un livello di sicurezza equivalente o accresciuto ed ottenere la deroga alla realizzazione dei requisiti minimi.

Il "sistema galleria" individua il complesso funzionale costituito dai seguenti elementi:

infrastruttura,

misure e sottosistemi di sicurezza,

veicoli-utenti.

L'interazione del sistema galleria con l'ambiente circostante richiede che tutte le specificità del contesto locale entro il quale il complesso funzionale galleria è inserito siano tenute in considerazione tanto nell'identificazione dei pericoli e nella scelta degli scenari incidentali pertinenti quanto nella formulazione di piani di emergenza ben coordinati con i soggetti istituzionali coinvolti.

Misure strutturali e misure impiantistiche.

Le misure strutturali ed impiantistiche determinando la risposta del sistema galleria alle sollecitazioni indotte dagli eventi anomali e dagli eventi incidentali possibili, devono essere scelte e realizzate in modo da costituire sistemi di difesa multipli e sinergici nelle funzioni, tanto in condizioni di esercizio quanto in condizioni di emergenza.

Le misure strutturali ed impiantistiche attuate determinano l'accettabilità e le prestazioni di ogni singolo complesso funzionale galleria.

Le misure strutturali ed impiantistiche devono risultare:

congruenti con la buona pratica progettuale attuale,

idonee a garantire i livelli di sicurezza richiesti per la struttura e la salute pubblica (utenti, addetti al soccorso, popolazione residente nella zona circostante la struttura),

compatibili con un'analisi costi-sicurezza.

Albero degli eventi ed analisi di scenario

L'albero degli eventi è lo strumento scelto per la quantificazione del rischio nel sistema galleria.

L'analisi di scenario è lo strumento di analisi quantitativa adottato per caratterizzare ogni ramo dell'albero degli eventi.

L'albero degli eventi, tracciato per gli eventi incidentali possibili identificati come rilevanti dal punto di vista della sicurezza in galleria, deve essere caratterizzato in termini di probabilità di malfunzionamento dei sottosistemi di sicurezza installati e delle conseguenze probabili essendosi verificato l'evento.

Gli eventi incidentali ad alta pericolosità per la sicurezza nelle gallerie stradali, identificati attraverso l'applicazione delle metodiche di valutazione del rischio, sono:

gli eventi di sversamento di sostanze infiammabili:

gli eventi di incendio;

gli eventi di rilascio di sostanze tossiche.

I termini sottosistemi di sicurezza e conseguenze sono utilizzati per indicare, rispettivamente, i dispositivi e gli impianti che consentono la realizzazione delle misure impiantistiche di sicurezza, il numero delle vittime ed i danni economici conseguenti all'accadimento dell'evento.

L'albero degli eventi deve essere utilizzato per:

- determinare le concatenazioni probabili dei processi che si instaurano nel sistema galleria al variare dell'evento iniziatore in funzione dei sottosistemi di sicurezza previsti e delle misure strutturali proprie del complesso galleria;

- verificare la non esistenza di un modo comune di malfunzionamento dei sottosistemi di sicurezza;

- determinare i tempi ottimali di intervento dei sottosistemi di sicurezza;
- definire le strategie di controllo e gestione degli eventi incidentali.

Un ramo dell'albero degli eventi rappresenta uno scenario incidentale. Ogni scenario incidentale è un evento suscettibile di essere analizzato formulando e risolvendo idonei modelli di rappresentazione deterministica del flusso del pericolo.

L'analisi di scenario è focalizzata sulla modellazione dei fenomeni fisico-chimici e le determinazioni dei parametri caratteristici dei processi associati ad un predeterminato scenario incidentale.

Un'analisi di scenario dettagliata risulta utile per:

- quantificare il flusso del pericolo nel sistema galleria;
- determinare le possibilità degli utenti di realizzare l'autosalvamento;
- prevedere il contributo alla sicurezza degli utenti da parte dei servizi di soccorso.

La determinazione delle possibilità di autosilvamento degli utenti presuppone siano fissati idonei criteri di sopravvivenza e caratterizzato il processo di esodo.

L'analisi di scenario richiede sia effettuata una caratterizzazione completa a priori dello scenario incidentale così che e le stime ottenute sul flusso del pericolo, sulla salvabilità degli utenti, sui danni alla struttura galleria, devono essere considerate valide esclusivamente per lo scenario incidentale prescelto.

L'analisi di scenario non deve essere condotta su un evento limite scelto per prassi prescindendo completamente dalla dinamica ad esso propria e dalle alterazioni che i sottosistemi di sicurezza inducono sull'evoluzione dell'evento.

L'analisi di scenario deve essere condotta su diversi scenari incidentali, intrinsecamente esclusivi seppure ridotti in numero, individuati come rilevanti per la determinazione dell'accettabilità del rischio nel sistema galleria considerato.

L'analisi di scenario è focalizzata sulla modellazione dei fenomeni chimico-fisici e comportamentali e sulle determinazioni dei parametri caratteristici dei processi all'interno del sistema galleria durante uno scenario incidentale.

I risultati dell'analisi di scenario forniscono i dati iniziali per assumere decisioni e per compiere scelte progettuali.

L'albero dei guasti deve essere utilizzato per:

- quantificare le probabilità di malfunzionamento dei dispositivi e degli impianti costituenti i sottosistemi di sicurezza;
- definire le strategie di manutenzione dei dispositivi e degli impianti.

Indici di rischio

Le misure di rischio possono essere classificate in funzione delle conseguenze:

<b><i>fatalità</i></b>	misure di rischio individuale
	misure di rischio sociale
<b><i>danni economici</i></b>	misure di rischio economico

Le probabilità e le conseguenze degli scenari incidentali rilevanti devono essere stimate e combinate in idonei *indicatori quantitativi di rischio*.

Il rischio individuale può essere calcolato stimando il numero di vittime associato all'evento incidentale considerato.

I criteri di rischio individuale per una galleria stradale, non devono essere formulati per unità di lunghezza della galleria per non trascurare l'effetto delle diverse tipologie di pericolo associate ad un tracciato in sotterraneo, rispetto alle tipologie di pericolo proprie di un tracciato in superficie.

Il rischio sociale associato ad un dato evento incidentale ad alta pericolosità può essere calcolato stimando la probabilità di accadimento per anno "f" ed il relativo numero di vittime "N".

Ciascuna coppia "f-N" può essere rappresentata con un punto su di un grafico, generando degli istogrammi noti come "distribuzioni f/N".

Come grandezza di riferimento si utilizza la probabilità retrocumulata "F" delle conseguenze dell'evento che determinano un numero di vittime maggiore - uguale ad "N".

I diagrammi che pongono in relazione la probabilità retrocumulata "F" con il numero di vittime "N" sono detti distribuzioni "F-N".

La zona delle misure compensative è la zona di applicazione del principio di ottimizzazione "ALARP" (As Low As Reasonably Practicable): ed indicata come zona ALARP.

Il principio ALARP richiede che si determini tra le possibili combinazioni di misure di sicurezza, la soluzione che consente la maggiore riduzione del livello di rischio connesso alla struttura in esame compatibilmente con i vincoli tecnico-economici propri del progetto.

Essa corrisponde sul diagramma F-N, alla zona compresa tra la retta che identifica il rischio massimo tollerabile per il sistema galleria e la retta che identifica il rischio accettabile risultante dalle determinazioni dei requisiti minimi.

### **6.1.2 Stesura del progetto di sicurezza**

Il grado di dettaglio richiesto al progetto della sicurezza è determinato dalla fase considerata:

fase I Studio di Fattibilità,

fase II Progetto Preliminare,

fase III Progetto Definitivo,

fase IV Progetto Esecutivo.

Il progetto della sicurezza in una galleria stradale deve essere sintetizzato in un elaborato contenente:

#### Sintesi dei risultati forniti dall'analisi di rischio:

- albero degli eventi per il sistema galleria considerato;
- definizione ed analisi degli scenari di fine emergenza ipotizzati comprensivi delle simulazioni termofluidodinamiche e di esodo per stimare il numero di utenti salvati, in funzione delle misure di sicurezza adottate, da associare alla probabilità dello scenario considerato;
- sintesi dell'analisi di scenario condotta;

### Riepilogo delle misure di sicurezza adottate:

- adeguatezza delle soluzioni tecnico-progettuali alternative e/o integrative destinate a ridurre la probabilità di accadimento degli eventi incidentali rispetto ai requisiti minimi di sicurezza;
- coerenza funzionale e gestionale delle misure di sicurezza destinate a ridurre la probabilità di accadimento e le conseguenze del GCEII;
- adeguatezza delle disposizioni destinate a limitare le conseguenze dei malfunzionamento dei singoli dispositivi e dei sottosistemi di sicurezza;
- definizione delle condizioni limite di esercizio per il sistema galleria;
- formulazione delle procedure di controllo e gestione dei sottosistemi di sicurezza in condizioni incidentali.

L'elaborato concernente l'adeguamento della sicurezza di una galleria in esercizio dovrebbe contenere, in modo esplicito, la stima del livello di sicurezza allo stato attuale del sistema galleria rispetto al livello di sicurezza proprio allo stato di accettabilità.

L'adeguamento della sicurezza richiede:

- la determinazione dello *stato attuale* del sistema galleria;
- la determinazione del grado di aderenza dello stato attuale allo *stato di accettabilità* definito dai requisiti minimi di sicurezza;
- l'analisi e la scelta di *misure compensative* condotte adottando la metodologia dell'analisi di rischio.

#### **6.1.3 Parametri di sicurezza**

I parametri di sicurezza per il sistema galleria sono identificati attraverso l'analisi delle caratteristiche successivamente indicate.

Caratteristiche strutturali della galleria:

lunghezza della galleria,

numero di canne,

numero di corsie,

larghezza delle corsie/carreggiata,

geometria della sezione trasversale,

caratteristiche piano-altimetriche del tracciato,

tipologia di costruzione,

caratteristiche delle strade di accesso.

Caratteristiche dell'ambiente esterno alla struttura

caratteristiche geografiche del sito di localizzazione della struttura,

condizioni meteorologiche sul sito,

condizioni di urbanizzazione e di traffico nell'intorno della struttura.

Caratteristiche medie di esercizio stradale:

traffico unidirezionale o bidirezionale,

composizione del traffico,

velocità di progetto,

volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo),

traffico congestionato (giornaliero o stagionale),

trasporto di merci pericolose.

Caratterizzazione strutturale della galleria e dell'ambiente circostante

La caratterizzazione del sistema galleria rispetto alle componenti struttura ed all'ambiente esterno può essere ottenuta utilizzando le schede di censimento delle gallerie riportate nell'allegato I.

Caratterizzazione del traffico

I parametri assunti come fondamentali nella caratterizzazione del traffico in un galleria stradale sono:



la tipologia del traffico (uni-direzionale , bi-direzionale),  
il Traffico Giornaliero Medio (media annuale, massimo mensile),  
il Traffico Massimo Orario,  
la frequenza di congestione (media annuale, massimo mensile),  
la percentuale di veicoli pesanti,  
la tipologia dei veicoli ammessi al transito.

Si definisce regime di traffico congestionato un flusso di traffico caratterizzato da una velocità media inferiore a 10 km/h per 15 min.

Si definisce veicolo pesante un veicolo con stazza maggiore di 3,5 t.

Qualora il numero di veicoli pesanti superi il 15 % della media annua del traffico giornaliero o qualora il traffico giornaliero stagionale superi significativamente la media annua del traffico giornaliero, devono essere valutati i rischi supplementari connessi alla composizione effettiva del traffico.

I rischi supplementari sono tenuti in conto considerando un volume di traffico equivalente determinato istituendo una corrispondenza 1:4 tra veicoli leggeri e veicoli pesanti.

La caratterizzazione del traffico può essere ottenuta utilizzando la scheda riportata nell'allegato I.

#### **6.1.4 Requisiti minimi di sicurezza**

I successivi paragrafi contengono le raccomandazioni di buona pratica progettuale per le determinazioni dei requisiti minimi di sicurezza. Le raccomandazioni derivanti dalla buona pratica progettuale sono presentate nella successione indicata nella Direttiva Europea 2004/54/CE.

Misure strutturali

Numero di canne e di corsie

La realizzazione di una galleria a canna singola o doppia è condizionata dal punto di vista della sicurezza dai valori assunti dai seguenti parametri:

volume di traffico previsto,

percentuale di veicoli pesanti,

profilo altimetrico o pendenza longitudinale,

lunghezza.

La realizzazione di una galleria a doppio fornice è obbligatoria qualora le previsioni su 15 anni indichino un volume di traffico superiore a 10000 veicoli/giorno corsia.

Caratteristiche geometriche della struttura galleria

La sezione trasversale, le caratteristiche piano-altimetriche del tracciato di una galleria e delle strade di accesso influenzano in modo determinante la sicurezza del sistema gallerie in quanto tali parametri influiscono significativamente sulla probabilità che si verifichino incidenti e sull'entità dei danni da essi indotti.

Nelle gallerie nuove non sono consentite pendenze longitudinali superiori al 5 %, a meno che non sia geograficamente possibile attuare nessuna soluzione alternativa.

Nelle gallerie con pendenze longitudinali superiori al 3% devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzate per aumentare la sicurezza sulla base dell'analisi di rischio.

Se la larghezza della corsia per veicoli lenti è inferiore a 3,5 m ed è consentito il transito di veicoli pesanti, devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzate per aumentare la sicurezza sulla base dell'analisi di rischio.

Il valore limite di pendenza per il quale non è necessaria l'analisi di rischio è fissato pari al 3%.

Il valore limite di larghezza delle corsie per il quale non si deve effettuare l'analisi di rischio è fissato pari a 3,5 m.

Il valore limite della sezione trasversale al di sotto del quale deve essere effettuata l'analisi di rischio è fissato in 45 m<sup>2</sup> per le gallerie a due corsie e in 65 m<sup>2</sup> per le gallerie a tre corsie.

Banchine

Nelle gallerie nuove sprovviste di corsia di emergenza, devono essere previste banchine pedonabili di emergenza, sopraelevate o meno, che gli utenti utilizzano in caso di guasto o incidente.

## Uscite di emergenza

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

Esempi di uscite di emergenza sono:

uscite dirette verso l'esterno della galleria,

uscite verso collegamenti pedonali tra le canne della galleria,

uscite verso una galleria o un cunicolo di emergenza,

accesso a rifugi con vie di fuga separate dalla galleria.

I portali della galleria sono per definizione uscite di emergenza.

Le gallerie di nuova costruzione devono essere dotate di uscite di emergenza se il volume di traffico giornaliero supera i 2000 veicoli per corsia.

La necessità di realizzare nuove uscite di emergenza per gallerie esistenti di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico giornaliero superiore a 2000 veicoli per corsia deve essere comprovata mediante analisi di rischio.

L'interdistanza tra le uscite di emergenza non deve superare i 300 m.

Le uscite di emergenza devono essere corredata da idonei dispositivi di sicurezza atti ad impedire la propagazione dei fumi e dell'energia termica all'interno delle vie di fuga, consentendo agli utenti di raggiungere i luoghi sicuri in condizioni di sicurezza ed agli addetti ai servizi di pronto intervento di accedere alla galleria.

La realizzazione di uscite di emergenza deve essere prevista qualora l'analisi di rischio, dimostri che la ventilazione e le altre misure di sicurezza sono insufficienti a garantire l'esodo in sicurezza degli utenti.

Le uscite di emergenza devono consentire agli utenti della galleria di abbandonare la struttura a piedi ovvero di raggiungere un luogo sicuro.

Le uscite di emergenza devono costituire altresì una via di accesso pedonale alla galleria, per gli addetti ai servizi di pronto intervento.

## Porte delle uscite di emergenza

Le porte delle uscite di emergenza devono poter essere aperte nella direzione di esodo.

Le porte delle uscite di emergenza devono avere un grado di protezione al fuoco pari a REI 120.

Le porte dovranno essere normalmente chiuse, dotate di dispositivo di autochiusura, certificate conformi alle normative vigenti.

La larghezza complessiva delle uscite di emergenza deve risultare non inferiore al valore determinato dalla seguente relazione:

$$L = A/50 \times 0,6$$

dove A rappresenta il numero delle persone presenti (*affollamento*); il valore 0,6 costituisce la larghezza in metri sufficiente al transito di una persona (*modulo unitario di passaggio*); 50 indica il numero di persone che possono defluire attraverso un modulo unitario di passaggio essendo fissato il tempo medio di evacuazione.

La larghezza complessiva delle uscite di emergenza deve essere multipla di 0,6 m, con tolleranza del 5%.

La larghezza minima di una uscita non può essere inferiore a 0,80 m (con tolleranza del 2%) e deve essere conteggiata pari ad un modulo unitario di passaggio e pertanto sufficiente all'esodo di 50 persone.

Non devono essere realizzate aperture di larghezza superiore a 1,8 m.

Le dimensioni consigliate sono:

1 modulo da 90 cm per gallerie a 1-2 corsie e volume di traffico inferiore a 2000 v/gcorsia,

1 modulo da 120 cm per gallerie a 2 corsie e volume di traffico compreso tra 2000 e 12000 v/g corsia,

2 moduli da 90 cm o 1 modulo da 140 cm per gallerie a 2 corsie e traffico superiore a 12000 v/corsia ovvero gallerie a 3 corsie e traffico superiore a 10000 v/corsia.

Zona filtro a prova di fumo

Si definisce zona filtro a prova di fumo un vano delimitato da strutture con resistenza REI predeterminata e comunque non inferiore a 60 minuti, dotato di due o più porte munite di congegno di autochiusura con resistenza al fuoco REI predeterminata e comunque non inferiore a 60 minuti con camino di ventilazione di sezione adeguata e comunque non inferiore a  $0,1 \text{ m}^2$  sfociante al di sopra della copertura dell'edificio, oppure vano con le stesse caratteristiche di resistenza al fuoco e mantenuto in sovrappressione ad almeno 30 Pa, anche in condizioni di emergenza, oppure areato direttamente verso l'esterno con aperture libere di superficie non inferiore a  $1 \text{ m}^2$  con esclusione dei condotti.

Uscite dirette verso l'esterno

Si intende per uscita diretta verso l'esterno un collegamento ad uno spazio a cielo aperto.

Le porte di accesso all'esterno devono essere ben visibili dall'interno della galleria, opportunamente illuminate e segnalate.

Collegamenti pedonali

Si intende per collegamento pedonale una struttura che connette le due canne di una galleria.

L'accesso ai collegamenti pedonali deve essere ben visibile dalla galleria, opportunamente segnalato ed illuminato.

Se le condizioni locali di tipo strutturale, geomeccanico lo consentono, le dimensioni interne del collegamento devono essere tali da contenere un parallelepipedo della misura minima di  $240 \times 230 \times 1000 \text{ cm}$  (base x altezza x lunghezza).

Le dimensioni del collegamento devono tenere conto dell'ingombro degli eventuali impianti installati.

All'interno dei collegamenti pedonali non devono essere allocati quadri elettrici a vista; quando presenti dovranno essere opportunamente separati dal percorso di esodo con elementi caratterizzati da un grado di protezione REI 120.

Cunicoli di sicurezza

Si intende per cunicolo di sicurezza una struttura pedonale ricavata all'interno della sezione di scavo della galleria e da essa separata con strutture caratterizzate da un grado di protezione REI 120.

Le dimensioni nette della sezione trasversale del cunicolo devono essere pari a 240 x 230 cm (larghezza x altezza).

L'accesso ai cunicoli deve essere realizzato creando una zona filtro con protezione non inferiore a REI 120.

L'accesso al cunicolo deve essere ben visibile dalla galleria, opportunamente segnalato ed illuminato.

All'interno del cunicolo di sicurezza, in corrispondenza di ciascun accesso e con passo non superiore a 50 m, devono essere collocati i segnali indicanti la direzione e la relativa distanza delle uscite verso luoghi sicuri.

All'interno del cunicolo non devono essere allocati quadri elettrici a vista; quando presenti dovranno essere opportunamente separati dal percorso di esodo con elementi caratterizzati da un grado di protezione REI 120.

#### Gallerie di emergenza

Si intende per galleria di emergenza una struttura pedonale e eventualmente carrabile separata dalla galleria di esercizio che può svilupparsi parallelamente alla galleria ovvero innestarsi nella galleria configurandosi come una discenderia.

L'accesso alla galleria di emergenza deve essere ben visibile dalla galleria, opportunamente segnalato ed illuminato.

L'accesso pedonale alle gallerie di emergenza deve essere realizzato creando una zona filtro con protezione non inferiore a REI 120.

All'interno delle gallerie di emergenza, lungo il percorso d'esodo, in corrispondenza di ciascun accesso e con passo non superiore a 50 m, devono essere collocati i segnali indicanti la direzione e la relativa distanza delle uscite verso luoghi sicuri.

All'interno delle gallerie di emergenza non devono essere allocati quadri elettrici a vista; quando presenti dovranno essere opportunamente separati dal percorso di esodo con elementi caratterizzati da un grado di protezione REI 120.

#### Rifugi

Si intende per rifugio un locale separato dagli altri ambienti con strutture caratterizzate da un grado di protezione REI 120 destinato ad accogliere in sicurezza gli utenti in fuga dalla canna incidentata.

L'accesso ai rifugi deve essere ben visibile dalla galleria, opportunamente segnalato ed illuminato.

L'accesso ai rifugi deve essere realizzato creando una zona filtro con grado di protezione non inferiore a REI 120.

È vietato costruire rifugi privi di uscita collegata a vie di fuga verso l'esterno.

L'uscita dai rifugi verso l'esterno deve essere opportunamente segnalata ed illuminata.

All'interno dei rifugi devono essere previsti:

segnaletica con istruzioni di comportamento,

impianto di comunicazione audio-video bidirezionale con il centro di controllo,

cassetta di primo soccorso,

coperte ignifughe.

I collegamenti pedonali, le gallerie di emergenza, i cunicoli di sicurezza, i rifugi possono essere adibiti a:

via di fuga,

via di fuga protetta,

luogo sicuro temporaneo.

Una *via di fuga* è una zona destinata all'esodo delle persone sufficientemente illuminata separata dalla galleria mediante strutture e porte caratterizzate da un grado di protezione REI 120.

Una *via di fuga protetta* è una zona destinata all'esodo delle persone sufficientemente illuminata mantenuta libera dai fumi ed in sovrappressione rispetto alla galleria mediante ventilazione naturale o forzata e separata dalla galleria mediante strutture e porte caratterizzate da un grado di protezione REI 120.

Un *luogo sicuro temporaneo* è un luogo di stazionamento costituito da una zona separata fisicamente mediante una zona filtro a prova di fumo rispetto alla canna incidentata, in grado di

ospitare in condizioni di sicurezza un numero di persone fissato per un intervallo di tempo limitato e comunque non inferiore a 30 minuti, collegato ad una via di fuga verso l'esterno.

Le condizioni di sicurezza degli utenti che in esso stazionano devono essere assicurate da un impianto di ventilazione dedicato che immetta aria direttamente dall'esterno della galleria.

I rifugi sono da intendersi come dei luoghi sicuri temporanei caratterizzati da un tempo di permanenza superiore a 30 minuti e dotati di un equipaggiamento di sicurezza potenziato.

La necessità di realizzare rifugi o luoghi sicuri temporanei deve essere giustificata da idonea analisi di rischio.

Successivamente sono riportate le linee guida da adottare per la realizzazione di vie di fuga, vie di fuga protette, luoghi sicuri temporanei in funzione della lunghezza e della direzione del traffico della struttura.

#### Gallerie a doppia canna e traffico unidirezionale

Il percorso di esodo è costituito in sequenza dalla canna interessata dall'evento incidentale, dai collegamenti pedonali, dalla canna non interessata dall'evento incidentale.

Nelle gallerie a doppia canna a traffico monodirezionale devono essere realizzati collegamenti pedonali ogni 300 m.

I collegamenti pedonali devono essere separati dalla canna incidentata mediante idonee strutture caratterizzate da grado di protezione REI 120.

All'uscita – ingresso del collegamento pedonale si deve prevedere un'area di protezione rispetto al flusso veicolare avente lunghezza non inferiore a 2 m.

Un armadietto di emergenza deve essere posto all'interno del collegamento pedonale.

#### Gallerie di lunghezza compresa tra 500 e 1000 m

##### Collegamenti pedonali

I collegamenti pedonali devono essere adibiti a via di fuga.

L'illuminazione dei collegamenti sarà alimentata da alimentazione di sicurezza.



Le porte dovranno essere dotate di sensori e all'apertura dovrà attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato.

Gallerie di lunghezza superiore a 1000 m

Collegamenti pedonali

I collegamenti pedonali possono essere adibiti a via di fuga protetta o a luogo sicuro temporaneo e la canna non interessata dall'incendio è considerata luogo sicuro dinamico.

Le porte di accesso devono essere dotate di sensori e all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato ed un allarme nel centro di controllo ove previsto.

L'impianto di ventilazione dei collegamenti pedonali deve assicurare le seguenti modalità:

*funzionamento in esercizio:* mantenere la sovrappressione e nel contempo mantenere condizioni termoigrometriche che non consentano la formazione di muffe;

*funzionamento in emergenza per gli utenti:* garantire la sovrappressione del locale, prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte;

*funzionamento in emergenza per gli addetti al soccorso ed allo spegnimento:* garantire una velocità media del flusso sufficiente a consentire l'accesso alla canna incidentata.

L'impianto ventilazione del collegamento pedonale deve essere collegato alla alimentazione elettrica di emergenza.

Il sistema di comando e controllo dell'impianto di ventilazione deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

L'impianto illuminazione del collegamento pedonale deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

Cunicoli di sicurezza

I cunicoli di sicurezza possono essere adibiti a via di fuga protetta ovvero a luogo sicuro temporaneo. Essi possono essere realizzati per galleria a traffico monodirezionale qualora l'analisi di rischio ne evidenzia la necessità.

I cunicoli di sicurezza devono essere accessibili attraverso i collegamenti pedonali.

Le porte di accesso devono essere dotate di sensori di prossimità ed all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato e deve essere inviato un segnale di allarme al centro di controllo ove previsto.

Nel caso in cui il cunicolo di sicurezza sia adiacente ad un canale di ventilazione adibito all'estrazione dei fumi dovrà essere garantito il benessere termoigrometrico degli utenti in fuga ed in ogni caso il cunicolo non potrà essere adibito a luogo sicuro temporaneo.

L'impianto di ventilazione del cunicolo di sicurezza dovrebbe assicurare le seguenti modalità:

*funzionamento in esercizio:* mantenere condizioni termoigrometriche che non consentano la formazione di muffe,

*funzionamento in emergenza per gli utenti:* garantire la sovrappressione del locale, prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte, garantire la qualità dell'aria (luogo sicuro temporaneo),

*funzionamento in emergenza per gli addetti al soccorso ed allo spegnimento (opzionale):* garantire una velocità media del flusso sufficiente a consentire l'accesso alla canna incidentata.

L'impianto di ventilazione deve essere collegato all'alimentazione elettrica di emergenza.

Il sistema di comando e controllo del sistema di ventilazione del cunicolo di emergenza deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

L'impianto di ventilazione del cunicolo di sicurezza deve garantire condizioni di vivibilità all'interno del cunicolo in caso di malfunzionamento.

L'illuminazione del cunicolo di sicurezza deve essere garantita dall'impianto di alimentazione elettrica di sicurezza.

#### Gallerie a canna singola e traffico bidirezionale

Il percorso di esodo è costituito in sequenza dalla canna incidentata, dalle uscite di emergenza dirette verso l'esterno ovvero da un cunicolo di sicurezza ovvero da una o più gallerie di emergenza.

Nelle gallerie a canna singola e traffico bidirezionale devono essere realizzate delle uscite dirette verso l'esterno, ovvero accessi pedonali verso un cunicolo di sicurezza, ovvero accessi pedonali verso gallerie di emergenza, ogni 300 m.

Dove non risultasse possibile la realizzazione delle uscite pedonali all'interdistanza indicata è necessario giustificare l'assenza di tale misura di sicurezza mediante analisi di rischio.

#### Gallerie di lunghezza compresa tra 500 e 1000 m

##### Uscite dirette verso l'esterno

Le porte di accesso devono essere dotate di sensori ed all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato.

L'impianto di illuminazione delle uscite verso l'esterno dovrà essere collegato ad alimentazione elettrica di sicurezza.

##### Cunicoli di sicurezza

I cunicoli di sicurezza sono adibiti a via di fuga protetta e devono condurre direttamente all'esterno.

Il cunicolo di sicurezza deve essere realizzato ed attrezzato in modo tale da consentire agli utenti in fuga di raggiungere l'esterno in completa autonomia.

L'impianto di ventilazione deve contemplare una unica modalità di funzionamento in grado di garantire la qualità dell'aria all'interno del cunicolo di sicurezza.

L'impianto ventilazione del cunicolo di sicurezza deve essere collegato all'alimentazione elettrica di emergenza.

L'illuminazione del cunicolo di sicurezza deve essere garantita dall'impianto di alimentazione elettrica di sicurezza.

##### Gallerie di emergenza

Le gallerie di emergenza devono essere adibite a via di fuga pedonali.

La gallerie di emergenza deve essere realizzata ed attrezzata in modo tale da consentire agli utenti in fuga di raggiungere l'esterno in completa autonomia.

L'impianto di ventilazione deve contemplare una unica modalità di funzionamento in grado di garantire la qualità dell'aria all'interno della galleria di emergenza.

L'impianto ventilazione del cunicolo di sicurezza deve essere collegato all'alimentazione elettrica di emergenza.

L'illuminazione del cunicolo di sicurezza deve essere garantita dall'impianto di alimentazione elettrica di sicurezza.

Gallerie di lunghezza superiore a 1000 m

Uscite dirette verso l'esterno

L'accesso all'esterno deve essere realizzato creando, quando necessario, una zona filtro con protezione non inferiore a REI 120.

Le porte di accesso devono essere dotate di sensori ed all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato e deve essere inviato un segnale di allarme al centro di controllo ove previsto.

Cunicoli di sicurezza

I cunicoli di sicurezza possono essere adibiti a via di fuga protetta ovvero a luogo sicuro temporaneo.

Le porte di accesso devono essere dotate di sensori ed all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato e deve essere inviato un segnale di allarme al centro di controllo ove previsto.

Nel caso in cui il cunicolo di sicurezza sia adiacente ad un canale di ventilazione adibito all'estrazione dei fumi dovrà essere garantito il benessere termoigrometrico degli utenti in fuga ed in ogni caso il cunicolo non potrà essere adibito a luogo sicuro temporaneo e dovrà essere dotato di zone filtro.

L'impianto di ventilazione del cunicolo di sicurezza deve assicurare le seguenti modalità:

*funzionamento in esercizio:* mantenere condizioni termoigrometriche che non consentano la formazione di muffe;

*funzionamento in emergenza per gli utenti:* garantire la sovrappressione del locale, prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte, garantire la qualità dell'aria qualora la galleria di emergenza sia adibita a luogo sicuro temporaneo;

*funzionamento in emergenza per gli addetti al soccorso ed allo spegnimento:* garantire una velocità media del flusso sufficiente a consentire l'accesso alla canna incidentata.

L'impianto di ventilazione deve essere collegato all'alimentazione elettrica di emergenza.

Il sistema di comando e controllo del sistema di ventilazione del cunicolo di emergenza deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

L'illuminazione del cunicolo di sicurezza deve essere garantita dall'impianto di alimentazione elettrica di sicurezza.

#### Gallerie di emergenza

Le gallerie di emergenza possono essere adibite a via di fuga protetta o luogo sicuro temporaneo.

Le porte di accesso devono essere dotate di sensori ed all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato e deve essere inviato un segnale di allarme al centro di controllo ove previsto.

L'impianto di ventilazione delle gallerie di emergenza deve assicurare le seguenti modalità:

*funzionamento in esercizio:* mantenere condizioni termoigrometriche che non consentano la formazione di muffe;

*funzionamento in emergenza per gli utenti:* garantire la sovrappressione del locale, prevenire l'ingresso dei fumi a porte aperte, garantire la qualità dell'aria qualora la galleria di emergenza sia adibita a luogo sicuro temporaneo;

L'impianto di ventilazione deve essere collegato all'alimentazione elettrica di emergenza.

Il sistema di comando e controllo del sistema di ventilazione del cunicolo di emergenza deve essere collegato alla alimentazione elettrica di sicurezza.

L'illuminazione delle gallerie di emergenza deve essere garantita dall'impianto di alimentazione elettrica di emergenza.

L'illuminazione delle vie di fuga e dei luoghi sicuri ricavati all'interno delle gallerie di emergenza deve essere garantita dall'impianto di alimentazione elettrica di sicurezza.

Accesso per i servizi di pronto intervento

Collegamenti carrabili

Nelle gallerie a canna doppia devono essere previsti collegamenti per il passaggio di veicoli di soccorso o di servizio ogni 900 m circa.

I collegamenti carrabili devono essere realizzati con grado di protezione REI 120 ed essere accessibili dalle canne tramite portoni caratterizzati da una sezione di passaggio netta pari a 350 x 400 cm (larghezza x altezza).

Le dimensioni dei collegamenti carrabili, se le condizioni locali di tipo strutturale, geomeccanico lo consentono, devono essere tali da contenere un parallelepipedo di dimensioni minime pari a 500 x 500 x 1000 cm (base x altezza x lunghezza).

La pendenza dei collegamenti carrabili non deve essere superiore al 10 % e la resistenza al carico deve essere tale da consentire il transito di automezzi di peso complessivo fino a 20 t.

Il raggio di volta per l'accesso dei mezzi di soccorso non dovrà essere inferiore a 13 m.

I portoni di accesso devono rimanere normalmente chiusi e poter essere aperti esclusivamente da personale autorizzato.

I portoni di accesso ai collegamenti carrabili devono essere dotati di sensori di prossimità ed all'apertura deve attivarsi un allarme ottico acustico locale temporizzato e deve essere inviato un segnale di allarme al centro di controllo ove previsto.

L'apertura dei portoni di accesso ai collegamenti carrabili, in condizioni incidentali, influenza la ripartizione del flusso d'aria in galleria condizionando in modo determinante il processo di dispersione dei fumi.

Piazzole di sosta

Nelle gallerie di lunghezza superiore a 1000 m devono essere previste piazzole di sosta aventi dimensioni minime pari a 40 m x 3 m realizzate ad un'interdistanza pari a 600 m per ogni senso di marcia.

Nel caso di gallerie bidirezionali le piazzole di sosta devono essere disposte a quinconce sui due lati della carreggiata.

### Drenaggio

Il sistema di drenaggio ricopre un ruolo di impianto di sicurezza in caso di sversamenti accidentali di olii e liquidi infiammabili permettendone un rapido smaltimento e riducendo la possibilità di incendio e intossicazione.

Se il trasporto di merci pericolose è autorizzato, il drenaggio di liquidi infiammabili e tossici è effettuato tramite canali di scolo appositamente progettati o altri dispositivi realizzati all'interno delle sezioni trasversali delle gallerie.

Particolare attenzione deve essere posta nella filtrazione e nello stoccaggio di queste particolari acque reflue, spesso contaminate da prodotti chimici ritardanti o diluenti.

Il 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 una canna e tra le canne.

E' necessario valutare la necessità di installare bocche di captazione non propaganti la fiamma e sistemi di monitoraggio e controllo del livello nelle vasche di accumulo.

Il dimensionamento del sistema di drenaggio dei liquidi infiammabili deve essere conseguente ad idonea analisi di scenario condotta su un numero ridotto di eventi di sversamento possibili.

Il sistema di raccolta e trattamento degli scarichi di piattaforma in galleria deve essere dimensionato in modo da smaltire anche le portate massime previste derivanti dall'uso dei sistemi antincendio.

Qualora sia impossibile realizzare nelle gallerie esistenti sistemi di drenaggio, ovvero la realizzazione di tali sistemi sia possibile solo ad un costo sproporzionato, il transito di veicoli adibiti al trasporto di merci pericolose è regolato in base ai risultati dell'analisi di rischio.

### Caratteristiche ignifughe degli elementi strutturali

Gli elementi strutturali delle gallerie devono assicurare un livello sufficiente di resistenza e reazione al fuoco.

#### Reazione al fuoco

Le vernici o i pannelli di rivestimento delle pareti devono essere realizzate con materiali caratterizzati da una reazione al fuoco di classe 0 ed atossici.

#### Resistenza al fuoco

Gli elementi strutturali funzionali ai sistemi di sicurezza devono garantire una resistenza al fuoco per 120 min essendo soggetti ad un evento di incendio caratterizzato da un'ideale curva temperatura-tempo, in alternativa, la resistenza al fuoco degli elementi strutturali è determinata mediante analisi di rischio.

La scelta delle curve temperatura-tempo per la verifica della resistenza al fuoco dei materiali nell'ambito delle raccomandazioni contenute nelle normative vigenti ovvero utilizzate negli Eurocodici è delegata al progettista e deve essere giustificata in termini di analisi di scenario o di analisi di rischio.

Le metodologie di valutazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali devono essere conformi alla norma UNI-VVF 9502.

Gli elementi strutturali di nuova concezione da mettere in opera devono essere preventivamente sottoposti a procedura di certificazione mediante prove in laboratorio secondo metodologie universalmente accettate.

Gli elementi strutturali per i quali è necessario determinare la resistenza al fuoco sono: canali di ventilazione, supporti dei dispositivi di sicurezza (passerelle cavi, ventilatori, portali segnaletici, corpi illuminanti), porte, vie di fuga, locali tecnici, ecc.

L'analisi può essere estesa agli effetti dello spalling del calcestruzzo sull'integrità della struttura ed alla resistenza al fuoco delle pareti della galleria.

#### Colore delle pareti della galleria

La colorazione delle pareti deve seguire lo schema riportato in figura 1 dell'allegato III al presente documento utilizzando vernici o pannelli di rivestimento.



Le pareti laterali delle piazzole di sosta devono essere rese di colore arancio.

Per le colorazioni si devono adottare i seguenti R.A.L. tenendo conto dell'impiego di lampade al sodio ad alta pressione:

colore bianco n. 9010,

colore arancio n. 2002.

In caso di impiego di altri tipi di lampade le colorazioni devono essere opportunamente verificate ed adeguate per ottenere le stesse rese cromatiche di cui sopra.

La veste così ottenuta deve essere preservata nel tempo predisponendo un opportuno piano di manutenzione e pulizia.

Misure impiantistiche

Illuminazione

Le gallerie e i sottopassi devono essere provvisti di illuminazione diurna e notturna progettate secondo la norma UNI 11095.

Si distinguono le seguenti tipologie di illuminazione:

*l'illuminazione ordinaria* costituita dall'illuminazione permanente e dall'illuminazione di rinforzo,

*l'illuminazione di emergenza* costituita dall'illuminazione della galleria in condizioni di interruzione di erogazione dell'energia elettrica (*illuminazione di riserva*) e dall'illuminazione delle vie di fuga (*illuminazione di sicurezza*).

L'illuminazione di emergenza deve essere prevista nelle gallerie di lunghezza superiore a 500 metri.

Un corretto svolgimento dell'analisi di rischio deve rendere disponibili le probabilità di malfunzionamento dei componenti e del sistema di illuminazione nel suo complesso in condizioni di emergenza.

Gli impianti di illuminazione devono essere progettati per il caso specifico di ogni singola galleria, tenendo strettamente in conto i criteri generali di seguito esposti.

Nei tratti di imbocco delle gallerie devono essere previste delle zone di rinforzo (zone di soglia e di transizione) così da garantire l'adattamento visivo degli utenti dalle condizioni di luminanza esterne a quelle interne in funzione della velocità di percorrenza media prevista.

L'impianto di regolazione del sistema di illuminazione deve essere in grado di adattare la luminanza all'interno della galleria alle condizioni variabili della luce all'esterno durante le ore del giorno. L'adattamento deve realizzarsi senza indurre variazioni inattese nel confort visivo dell'utente. I tratti di rinforzo devono consentire almeno tre livelli di luminanza commutati da un sistema di gestione automatico comandato da luminanzometri.

I regolatori di flusso luminoso potranno essere sia di tipo "continuo" sia di tipo "a gradino" privilegiando, quando possibile, l'impiego di regolatori di flusso di tipo "continuo" e dotati di idonei stabilizzatori di tensione.

Nelle gallerie a traffico bidirezionale le indicazioni sulle zone di rinforzo devono essere estese ai due imbocchi.

I cavi di alimentazione dell'impianto di illuminazione devono essere collocati per quanto possibile in sede protetta. Nelle gallerie ove non sia possibile il posizionamento sotto il marciapiede, dietro il profilo redirettivo od all'interno del rivestimento, i cavi devono essere alloggiati in apposite canaline realizzate in acciaio inox di caratteristica AISI almeno 304L.

I cavi devono essere conformi alle norme CEI non propaganti l'incendio, a bassissima emissione di gas tossici nocivi e corrosivi.

Tutti i corpi illuminanti dovranno essere derivati dall'alimentazione elettrica tramite una presa a spina IP65. Il circuito di derivazione che alimenta il corpo illuminante dovrà essere protetto mediante fusibile in modo tale che un eventuale guasto sulla derivazione non si ripercuota sulla dorsale elettrica.

Ulteriormente, i circuiti di alimentazione elettrica dell'impianto di illuminazione di emergenza, se non collocati in sede protetta dagli effetti dell'incendio, dovranno essere del tipo resistente al fuoco fino al corpo illuminante, secondo le norme CEI.

Inoltre nei circuiti di emergenza l'elemento di derivazione dovrà avere caratteristiche di resistenza al fuoco non inferiori al cavo di della dorsale di alimentazione elettrica,

Le lampade dell'impianto di illuminazione devono essere preferibilmente al sodio alta pressione.

I corpi illuminanti devono essere di norma posizionati:

per le gallerie a volta, a traffico bidirezionale, sono preferibili impianti con due file di armature, ciascuna sopra una corsia di marcia; per le gallerie a soffittatura piana o con sezione rettangolare bidirezionali le due file devono essere posizionate sui due lati della galleria stessa;

per le gallerie unidirezionali è preferibile l'impianto su file continue sulle corsie di marcia.

Le piazzole di sosta, gli innesti od altri punti critici come nicchie, collegamenti o rifugi devono essere illuminati in modo idoneo.

I corpi illuminanti devono avere un indice di protezione IP 65.

Tutti gli accessori metallici, le armature, i proiettori dei corpi illuminanti, gli ancoraggi al rivestimento devono garantire la massima resistenza alla corrosione.

I corpi illuminanti devono essere facilmente sostituibili ovvero dotati di dispositivi che consentano lo sgancio e l'aggancio rapido.

**Illuminazione di riserva**

L'illuminazione di riserva deve consentire un regolare deflusso dei veicoli presenti all'interno della galleria in caso di fuori servizio dell'alimentazione elettrica ordinaria.

L'illuminazione di riserva deve garantire nelle zone interne una luminanza non inferiore a quella dell'eventuale tratta di strada illuminata esterna alla galleria e comunque la luminanza dovrà non essere inferiore ad 1 cd/mq. Tali parametri possono essere garantiti anche tramite parti di impianto che costituiscono l'illuminazione ordinaria. Nelle gallerie di lunghezza superiore a 500 metri dovrà essere previsto una alimentazione elettrica in continuità assoluta che sostenga per almeno 30 minuti l'impianto di illuminazione di riserva; per le stesse gallerie dovrà essere inoltre previsto un sistema elettrico di riserva che possa alimentare per almeno 24 ore l'impianto di illuminazione di riserva.

Il pannello a messaggio variabile prima dell'ingresso della galleria deve indicare agli utenti lo stato di malfunzionamento dell'impianto di illuminazione interno alla galleria ed eventuali provvedimenti temporanei di esercizio degradato.

**Illuminazione di sicurezza**

L'illuminazione di sicurezza deve consentire un regolare deflusso dei pedoni presenti all'interno della galleria.

L'illuminazione di sicurezza presente nelle vie di fuga deve essere in grado di assicurare:

l'indicazione chiara e non ambigua delle vie di fuga,

l'illuminazione degli ostacoli lungo il percorso d'esodo e l'agevolazione del movimento degli utenti verso le uscite di sicurezza,

l'individuazione da parte degli utenti e degli addetti al soccorso delle dotazioni per la sicurezza antincendio ed i punti di attivazione dell'allarme antincendio.

Le vie di fuga nella galleria devono essere illuminate con un livello di illuminamento medio pari a 10 lux con valori puntuali minimi non inferiori a 2 lux attraverso corpi illuminanti posti a 1,5 metri dal piano di camminamento.

Al fine di agevolare ulteriormente l'evacuazione della struttura, è possibile integrare l'impianto di illuminazione di emergenza con il cosiddetto "Filo di Arianna", costituito da una sequenza opportunamente fitta di sorgenti luminose monocromatiche, che ha lo scopo di guidare gli utenti verso luoghi sicuri.

L'illuminazione di emergenza deve essere suddivisa in tronchi di lunghezza opportuna e/o prevedere l'alimentazione separata sui due lati della galleria.

## Ventilazione

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

lunghezza di ogni singola canna della galleria,

area della sezione trasversale,

andamento altimetrico della galleria,

volume di traffico equivalente,

frequenza di regime di traffico congestionato,

condizioni meteo-climatiche prevalenti sul sito.

La scelta ed il dimensionamento del sottosistema ventilazione deve prendere in considerazione le statistiche degli eventi incidentali possibili causa di eventi di incendio e di sversamento di sostanze tossiche, nocive ed infiammabili.

Il sottosistema ventilazione deve essere realizzato secondo le regole di buona pratica attuali e deve concorrere, per la quota parte di sua competenza, a garantire il livello di sicurezza fissato dall'analisi di rischio, quando prevista, per il sistema galleria.

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

la diluizione delle emissioni dei veicoli all'interno della galleria,

la compatibilità ambientale della struttura,

la gestione e il controllo degli eventi incidentali possibili individuati come rilevanti.

Ventilazione sanitaria

Il sottosistema ventilazione è preposto a:

la diluizione degli inquinanti emessi dagli autoveicoli in ogni regime di traffico,

la diluizione degli inquinanti emessi dagli autoveicoli in caso di arresto del traffico conseguente all'accadimento di un incidente non rilevante,

al fine di mantenere la concentrazione degli inquinanti all'interno della struttura a livelli tali da non compromettere la *visibilità* e da contenere la dose di inquinanti assunta dagli utenti.

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

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

La determinazione delle condizioni meteo-climatiche ai portali per le quali attuare la chiusura al traffico della galleria devono essere determinate mediante l'analisi di rischio.

Opportuni provvedimenti devono essere adottati affinché nelle gallerie a doppio fornice in non si abbiano fenomeni di ricircolo degli inquinanti tra le due canne.

## Ventilazione di emergenza

Il sottosistema ventilazione è preposto a:

la dispersione dell'energia termica generata dal focolaio di incendio,

la gestione ed il controllo dei fumi,

la diluizione delle sostanze tossiche ed infiammabili,

al fine di garantire l'esodo in sicurezza degli utenti e facilitare le operazioni di soccorso e di spegnimento nonché prevenire la formazione di miscele esplosive nel corso di un evento di sversamento.

Il sottosistema ventilazione influenza altresì la dinamica del focolaio e condiziona il processo di esodo degli utenti.

Il dimensionamento dell'impianto di ventilazione per condizioni di emergenza deve essere effettuato preliminarmente almeno in conformità ai dettami dell'analisi di scenario, quando prevista.

Il progettista deve analizzare un numero ridotto di scenari incidentali possibili per i quali stimare il numero di utenti salvabili.

Opportuni provvedimenti devono essere adottati affinché nelle gallerie a doppio fornice in caso di incendio non si abbiano fenomeni di ricircolo dei fumi dalla canna incidentata alla canna integra.

## Scelta del sistema di ventilazione

In tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia deve essere installato un impianto di ventilazione meccanica.

La verifica della necessità di installazione di un impianto di ventilazione meccanica deve essere estesa a gallerie di lunghezza inferiore ai 1000 m quando i parametri strutturali e di traffico che influenzano la sicurezza del sistema galleria risultino anomali.

Esempi di anomalia nei valori sono: la sezione trasversale è inferiore a 45 m<sup>2</sup> per gallerie a 2 corsie ed a 65 m<sup>2</sup> per gallerie a 3 corsie, la pendenza supera il 3%, il volume di traffico previsto è superiore a 10000 v/giorno, regimi di traffico congestionato si verificano per almeno 5 giorni in una settimana per un tempo pari ad almeno 30 minuti consecutivi.

La successiva tabella fornisce un'indicazione confortata dalla buona pratica progettuale attuale alla scelta dei sistemi di ventilazione da installare in una galleria.

Sistemi di ventilazione raccomandati per le gallerie stradali		
Aree di applicazione dei sistemi di ventilazione		
	Lunghezza della galleria [km]	
	Gallerie a doppio senso di marcia (una canna)	Gallerie a senso unico di marcia (due canne)
Ventilazione naturale (con sistemi di allarme per la concentrazione di CO)	$\leq 0.5$	$\leq 1.0$
Ventilazione longitudinale con jet-fans	$\leq 2.0$	$\leq 4.0$
Ventilazione longitudinale con jet-fans ed estrazione dei fumi	$\leq 4.0$	$\leq 6.0$
Ventilazione semi-trasversale reversibile	$\geq 1.0$ km	$\geq 2.0$
Ventilazione mista semi-trasversale e trasversale	$\geq 1.0$	
Ventilazione trasversale	$\geq 2.0$	$\geq 6.0$

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

Nelle gallerie con traffico bidirezionale e/o unidirezionale congestionato, la ventilazione longitudinale è consentita solo se l'analisi del rischio indica che essa è accettabile e/o sono adottate misure compensative specifiche, quali un'adeguata gestione del traffico, idonee distanze tra le uscite di emergenza, postazioni intermedie di estrazione dei fumi, sistemi di mitigazione.

Le condizioni di traffico congestionato per le quali l'adozione di un sistema di ventilazione di tipo longitudinale è condizionata ai risultati dell'analisi di rischio sono definite dall'insorgenza di regimi

di traffico congestionato per 2 giorni alla settimana per un tempo pari ad almeno 30 minuti consecutivi su base annuale e stagionale.

#### Gallerie monodirezionali

Per gallerie a doppia canna e traffico monodirezionale, può essere utilizzato un sistema di ventilazione longitudinale fino a lunghezze pari a 4000 m.

La lunghezza indicata può essere aumentata fino a 6000 m quando il progetto preveda l'adozione di opportune misure compensative suffragate da un'adeguata analisi di scenario.

Per gallerie di lunghezza superiore a 6000 m deve essere valutata, applicando in ogni caso la metodologia dell'analisi di rischio, l'adozione di un sistema di tipo longitudinale integrato da idonee misure compensative in luogo della realizzazione di un sistema di ventilazione semitrasversale, trasversale, ibrido.

#### Gallerie bidirezionali

Per gallerie a canna singola e traffico bidirezionale può essere utilizzato un sistema di ventilazione longitudinale fino a lunghezze pari a 1500 m allorché l'analisi di scenario fornisca risultati compatibili con i vincoli ambientali ed i vincoli di sicurezza.

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

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

installazione di dispositivi di estrazione dell'aria e dei fumi azionabili separatamente o a gruppi;

controllo costante della velocità longitudinale dell'aria e conseguente regolazione del processo di controllo dell'impianto di ventilazione (estrattori, ventilatori, ecc.).

La velocità longitudinale può considerarsi controllata quando essa oscilla tra -1 m/s e 1 m/s in una zona di lunghezza fissata situata a cavallo del focolaio.



Il sottosistema di ventilazione deve essere in grado di invertire il verso del flusso d'aria in ogni posizione della galleria in un tempo compatibile con la dinamica dell'evento di incendio identificato in 2 min.

Ventilazione delle vie di fuga e dei luoghi sicuri

Le specifiche per il dimensionamento dell'impianto di ventilazione delle vie di fuga e dei luoghi sicuri sono presentate nei successivi paragrafi.

Pressurizzazione

La sovrappressione necessaria alla pressurizzazione dei locali non deve essere inferiore a 30 Pa e non superare 80 Pa.

La pressurizzazione si può realizzare mediante:

immissione di aria esterna attuata da un impianto dedicato,

immissione di aria esterna realizzata dall'impianto di ventilazione della galleria,

prelievo di aria dalla canna non incidentata.

Qualora gli impianti prevedano l'adozione di serrande di taratura esse devono essere dotate di dispositivi tagliafuoco per impedire l'afflusso dei fumi dalla canna incidentata.

Ventilazione a porte aperte

Durante la fase di evacuazione al fine di non consentire l'ingresso di fumi generati da un evento di incendio all'interno di un vano o locale messo in comunicazione con una zona invasa dai fumi attraverso una porta aperta risulta necessario garantire una velocità del flusso d'aria in uscita dall'ambiente da proteggere pari a 0,75 m/s.

Durante la fase di spegnimento, al fine di consentire l'accesso dei Vigili del Fuoco all'interno della canna incidentata, si deve sovradimensionare l'impianto di ventilazione in modo da realizzare l'effetto bolla. L'impianto di ventilazione deve garantire una velocità minima del flusso d'aria nella direzione della canna incidentata pari a 2 m/s. La realizzazione di detta modalità di intervento richiede l'installazione di una pulsantiera che consenta alle sole squadre di soccorso di modificare il regime di funzionamento dei ventilatori in modo che essi garantiscano la velocità di progetto.

Ventilazione delle vie di fuga protette

L'impianto di ventilazione deve mantenere la via di fuga libera dai fumi ed in sovrappressione rispetto alla galleria.

In caso di incendio, il sistema di ventilazione deve consentire:

a porte chiuse, di immettere aria pura nell'ambiente filtro e mantenerlo in sovrappressione rispetto alla galleria stradale;

a porte aperte di limitare l'afflusso dei fumi all'interno della zona filtro.

L'impianto di ventilazione deve garantire a porte chiuse una sovrappressione non inferiore a 30 Pa e non superiore a 80 Pa.

La forza applicata per l'apertura della porta non deve superare 220 N.

Nel caso di collegamenti pedonali l'impianto di ventilazione può prelevare l'aria dalla canna non incidentata ovvero da un condotto di ventilazione dedicato.

Ventilazione dei luoghi sicuri temporanei

L'impianto di ventilazione deve essere del tipo ad aria esterna ovvero dotato di impianto di filtrazione solo quando il luogo sicuro temporaneo sia realizzato all'interno dei collegamenti pedonali e l'aria sia prelevata dalla canna non interessata dall'evento incidentale.

L'impianto di ventilazione deve mantenere la via di fuga libera dai fumi, in sovrappressione rispetto alla galleria e garantire un livello accettabile di qualità dell'aria agli utenti.

In caso di incendio, il sistema di ventilazione dovrà consentire:

a porte chiuse, di immettere aria pura nell'ambiente filtro e mantenerlo in sovrappressione rispetto alla galleria stradale e garantire un livello accettabile di qualità dell'aria all'interno del luogo sicuro;

a porte aperte di limitare l'afflusso dei fumi all'interno della zona filtro.

L'impianto di ventilazione deve garantire a porte chiuse una sovrappressione non inferiore a 30 Pa e non superiore a 80 Pa.

La forza applicata per l'apertura della porta non deve superare 220 N.

L'impianto di ventilazione deve garantire una portata d'aria non inferiore a 20 m<sup>3</sup>/h per persona.

Un valore ottimale della portata d'aria risulta essere pari a 50 m<sup>3</sup>/h per persona.

Alimentazione del sottosistema ventilazione della galleria

I ventilatori devono essere collegati ad alimentazione elettrica di emergenza.

Il sistema di comando e controllo del sottosistema ventilazione deve essere collegato all'alimentazione elettrica di sicurezza.

Qualora il progetto preveda l'alimentazione parziale del sistema di ventilazione attraverso l'impianto elettrico di emergenza si deve subordinare l'accettazione della soluzione ad idonea analisi di rischio.

Stazioni di emergenza

Le stazioni di emergenza sono progettate per mettere a disposizione diversi strumenti di sicurezza, in particolare telefoni di emergenza ed estintori, ma non per proteggere gli utenti dagli effetti di un evento di incendio.

Le stazioni di emergenza possono essere costituite da un armadio ovvero, preferibilmente, da una nicchia realizzata nel piedritto.

Nelle gallerie a traffico monodirezionale gli armadietti di emergenza devono essere posizionati sul lato destro della carreggiata.

Nelle gallerie a traffico bidirezionale gli armadietti di emergenza devono essere posizionati su entrambi i lati della carreggiata secondo una distribuzione del tipo a quinconce mantenendo la stessa interdistanza per lato.

La rottura di un vetro, l'apertura di uno sportello per il prelievo degli estintori deve attivare un allarme locale ottico ed acustico temporizzato.

Il segnale di apertura deve essere inviato al centro di controllo quando previsto.

Un armadietto di emergenza andrà posto all'interno di tutte le zone filtro per l'accesso alle vie di fuga protette ed all'interno dei luoghi sicuri temporanei.

Il sistema di allarme in dotazione agli armadietti di emergenza deve essere collegato ad alimentazione elettrica di sicurezza.

Per gallerie di lunghezza superiore a 500 metri devono essere previsti ai portali e ad interdistanza di 150 m, armadietti di emergenza, opportunamente segnalati con segnale luminoso mostrato in figura II 178 Art.125 e figura II 305 Art. 135 del D.P.R. 495/92 e segnale di postazione idrante come da fig. UNI 7546/8 (riferimento figura 6 dell'Allegato III al presente documento).

Gli armadietti, posti preferibilmente in nicchia, devono contenere:

pulsante di allarme;

una postazione idrante;

due estintori a polvere ed a schiumogeno;

un telefono S.O.S.

Il segnale di apertura dell'armadietto deve essere inviato al centro remoto. Quando viene azionato il pulsante di allarme, viene comunicata all'operatore del centro remoto una situazione di emergenza. L'operatore, oltre a dialogare con l'utente, potrà seguire delle procedure di emergenza e attivare i relativi sistemi presenti in galleria (PMV, TVCC, Ventilazione, segnaletica, messaggistica, ecc.)

Le iscrizioni esplicative accanto ai suddetti pulsanti dovranno essere scritte in quattro lingue: italiano, inglese, francese e tedesco.

Gli armadietti di sicurezza sono posizionati come mostrato nelle figure 2 e 3 riportate nell'allegato III:

all'interno delle piazzole di sosta,

in corrispondenza dei collegamenti pedonali,

in corrispondenza degli accessi diretti verso l'esterno, accessi a cunicoli di sicurezza, accessi a gallerie di emergenza per gallerie di lunghezza superiore a 1000 m.

Erogazione idrica

L'erogazione idrica in galleria deve provvedere all'alimentazione dell'impianto idrico antincendio.

Il sistema di alimentazione idrica deve essere in grado di garantire la continuità di erogazione idrica per almeno due ore.

Impianto idrico antincendio

Le gallerie di lunghezza superiore a 500 m devono essere dotate di un impianto idrico antincendio costituito da una condotta fissa di adduzione dell'acqua per tutta la lunghezza della galleria in grado di garantire una portata minima di 1200 litri/min. ed una pressione minima pari a 0,5 MPa con idranti posti a interdistanza pari a 150 m.

L'impianto idrico antincendio deve essere in grado di garantire valori di portata uniformi tra i differenti idranti e comunque non inferiori a 300 l/min con pressione di rete pari a 0,5 Mpa.

L'impianto idrico antincendio installato deve essere dotato di:

idranti con attacco UNI-70 con relativo corredo di lancia e manichetta all'esterno delle gallerie,

idranti con attacco UNI-45 collocati in idonee cassette con relativo corredo di lancia e manichetta all'interno delle gallerie di esercizio;

attacchi di mandata per motopompa UNI 70 agli imbocchi delle gallerie di esercizio (UNI 9490).

Nelle gallerie a traffico monodirezionale gli idranti devono essere posizionati negli appositi armadietti di emergenza sul lato destro della carreggiata.

Nelle gallerie a traffico bidirezionale gli idranti devono essere posizionati su entrambi i lati a quinconce mantenendo la stessa interdistanza per lato.

#### Rete idrica

La rete idrica di distribuzione dell'acqua antincendio deve essere ad anello ed è alimentata da una o più stazioni di pompaggio dotate di:

gruppo di pompaggio UNI9490

serbatoio di riserva .

I collettori dell'acqua antincendio non devono essere esposti direttamente al fuoco dovendo garantire il servizio per un tempo non inferiore alle due ore nel corso delle operazioni di spegnimento.

I collettori dell'acqua antincendio devono essere protetti dal gelo, da possibili urti meccanici, dalla corrosione e consentire le dilatazioni termiche.

Ogni pompa antincendio dovrà essere alimentata con propria linea esclusiva, derivata a monte dell'interruttore generale BT dell'impianto elettrico, in modo che l'energia elettrica sia disponibile anche in caso di condizione di aperto di tutti gli interruttori dell'impianto.

Le linee di alimentazione devono essere protette contro i cortocircuiti ed i contatti indiretti, ma non contro il sovraccarico, a favore della continuità e sicurezza di esercizio.

L'impianto deve essere alimentato dalla normale rete di distribuzione di energia elettrica e da una fonte di energia elettrica di emergenza.

### Sistemi di mitigazione

Le seguenti note sui sistemi di mitigazione sono introdotte in quanto in accordo alla Direttiva Europea il livello di sicurezza del sistema galleria può essere modificato introducendo sottosistemi di sicurezza innovativi compatibili con l'evoluzione della buona pratica.

I sistemi attualmente utilizzabili in galleria sono del tipo a diluvio e possono essere classificati in:

sistemi ad acqua frazionata,

sistemi ad acqua nebulizzata,

sistemi a schiuma.

L'adozione di sistemi di mitigazione come misura compensativa od integrativa deve essere giustificata attraverso l'analisi di rischio e compatibile con l'analisi costi-sicurezza.

Le prestazioni del sistema di mitigazione devono essere determinate e risultare compatibili con i risultati dell'analisi di scenario.

### Centro di controllo e sistema di gestione

#### Centro di controllo

Un centro di controllo deve essere realizzato per tutte le gallerie di lunghezza superiore a 3000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia.

La sorveglianza di diverse gallerie può essere accentrata in un unico centro di controllo.

All'esterno di ogni galleria deve essere realizzata una postazione di comando e controllo locale normalmente non presidiata.

Il centro di controllo deve essere realizzato secondo principi ergonomici per l'interfaccia uomo macchina ed essere dotato di una rete informatica che fa capo ad una sala di elaborazione dati preposta al controllo e alla gestione automatica delle procedure in situazioni di esercizio ed in situazioni di emergenza.

Il centro controllo è delegato, in condizioni di esercizio, a seguire il controllo di routine sull'operatività normale delle gallerie e dei sottosistemi connessi.

Gli operatori del centro di controllo devono essere addestrati tramite corsi di simulazione interattiva e mantenuti in addestramento esecutivo tramite esercitazioni di emergenza che coinvolgano più amministrazioni pubbliche per ottimizzare il coordinamento e le procedure d'intervento.

Le emergenze sono classificate in funzione della loro gravità ed opportuni manuali d'intervento operativo riportanti le procedure da attuare sono in dotazione della sala e dei suoi operatori.

Le simulazioni interattive sono utilizzate per l'addestramento continuo degli operatori ad emergenze non previste nei manuali operativi, al fine di conservare la necessaria flessibilità d'intervento agli operatori del centro di controllo.

#### Sistema di gestione e controllo

Il sistema di gestione e controllo deve prevedere un centro di comando e controllo di competenza compartimentale normalmente presidiato.

Il sistema di gestione e controllo deve essere realizzato in modo da garantire una futura supervisione centralizzata nazionale.

Il sistema di gestione della galleria deve permettere, localmente e in remoto, il comando e controllo degli impianti della galleria e l'autodiagnosi degli stessi.

Il sistema di controllo deve essere strutturato in modo da mantenere le funzioni vitali delle unità elementari degli impianti cosicché un'interruzione del sistema stesso non pregiudichi in alcun modo l'intervento di base dei sottosistemi di sicurezza.

La funzionalità del sistema di gestione e controllo da installare deve essere soggetta ad analisi di rischio.

Le informazioni raccolte dai sensori, vengono processate da sistemi che in accordo ad algoritmi, allertano il personale di controllo e dispone una procedura di reazione alla variazione delle condizioni di esercizio; sia per le condizioni di normale esercizio, sia in caso di eventi incidentali.

Il sistema di controllo e gestione di una galleria deve:

attuare procedure di risparmio energetico in condizioni di esercizio;

monitorare i flussi di traffico;

mantenere la struttura in efficienza al fine di gestire al meglio l'esercizio;

comunicare segnalazioni agli utenti;

mobilitare le unità di emergenza per risolvere gli eventi incidentali all'interno della galleria;

dare inizio alle operazioni appropriate di emergenza quando necessario;

monitorare di continuo l'equipaggiamento di sicurezza della struttura in modo da conservarlo sempre operativo;

gestire la manutenzione degli impianti di sicurezza,

indicare con precisione e tempestività la zona dell' incidente e del potenziale conseguente incendio;

indicare con precisione e tempestività le concentrazioni di gas nocivi;

indicare con precisione e tempestività le condizioni di visibilità all'interno del tunnel;

attivare quando necessario il piano di soccorso e/o d'evacuazione,

archiviare all'interno di una base dati i valori misurati dai sensori, gli allarmi avvenuti, le azioni intraprese.

Il sistema di controllo e gestione della galleria deve essere in grado inoltre di:

gestire il funzionamento del sistema di ventilazione in condizioni di esercizio al fine di garantire la qualità dell'aria all'interno della galleria;

gestire il funzionamento del sistema di ventilazione in condizioni di emergenza al fine di garantire l'autosalvamento degli utenti;



gestire il funzionamento del sistema di ventilazione delle vie dei fuga e dei luoghi sicuri in condizioni di esercizio ed in condizioni di emergenza;

gestire gli allarmi provenienti dal sistema di rilevamento incidenti e/o incendi;

gestire il funzionamento dell'impianto idrico antincendio ed eventuali altri sistemi,

gestire le variazioni di esercizio e le segnalazioni a messaggio variabile all'interno ed all'esterno della galleria,

gestire l'impianto di comunicazione audio dotato anche di messaggi pre registrati,

gestire l'impianto di illuminazione in condizioni di esercizio e di emergenza,

gestire l'impianto di alimentazione elettrica in condizioni di esercizio ed in condizioni di emergenza,

gestire le procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria dei sottosistemi di sicurezza,

gestire gli allarmi derivanti da malfunzionamento dei vari sottosistemi,

fornire un interfaccia di comunicazione locale e remota con gli addetti alla sicurezza.

Il sistema di gestione della galleria deve prevedere la ridondanza dell'hardware di gestione di cui almeno una parte deve essere in grado di realizzare procedure minime di emergenza.

I requisiti minimi ai quali un programma di gestione della sicurezza in galleria deve soddisfare sono:

affidabilità in condizioni di esercizio,

affidabilità in condizioni di emergenza,

affidabilità in gestione remota,

sicurezza intrinseca,

gestione separata ed interoperabilità dei sottosistemi,

priorità all'utilizzatore,

ridondanza;

modularità;

funzionalità off-line;

compatibilità con le tecnologie di automazione ed informatiche maggiormente diffuse,

open-source per protocolli di comunicazione e le procedure base di sicurezza.

Il programma di gestione, in caso di rottura di un componente o di mancata attivazione di una procedura deve essere in grado di commutare ad una condizione nota di emergenza.

Il programma deve essere strutturato in modo tale da consentire la gestione del sistema galleria in sicurezza quando soggetto ad operazioni di aggiornamento e riconfigurazione.

Sottosistema di sorveglianza e rilevazione

L'installazione di un impianto di sorveglianza con telecamere per ogni senso di marcia deve essere valutata caso per caso.

Un impianto di sorveglianza deve essere previsto quando la lunghezza della galleria è maggiore di 3000 m ovvero per tutte le gallerie dotate di un centro di controllo presidiato.

L'impianto di sorveglianza deve essere connesso con una sala di controllo presidiata.

Le telecamere devono essere installate in modo da consentire:

il controllo della situazione del traffico all'interno della galleria,

il controllo delle piazzole di sosta/emergenza e degli armadietti SOS.

L'installazione di un impianto di rilevazione automatico degli incidenti stradali ovvero dell'instaurazione di condizioni di traffico anomale deve essere valutata caso per caso.

Un impianto di rilevazione automatico degli incidenti stradali deve essere previsto quando la lunghezza della galleria è maggiore di 3000 m ovvero per tutte le gallerie dotate di un centro di controllo.

Gli impianti del sottosistema di sorveglianza e rilevazione devono essere interfacciati tramite il sistema di controllo e gestione della galleria con gli altri sottosistemi di sicurezza in essa installati.

Gli impianti del sottosistema di sorveglianza e rilevazione devono essere collegati alla alimentazione elettrica di sicurezza.

#### Rilevazione incendio

L'installazione di un impianto di rilevazione automatica degli incendi deve essere valutata caso per caso e comunque prevista in presenza di un sistema di ventilazione meccanica.

Un impianto di rilevazione automatica degli incendi deve essere previsto quando la lunghezza della galleria è maggiore di 3000 m ovvero per tutte le gallerie dotate di un centro di controllo.

I dispositivi e gli impianti attualmente utilizzati per la rilevazione degli incendi in galleria sono :

opacimetri,

sensori di concentrazione di anidride carbonica e monossido di carbonio,

rilevatori lineari di temperatura,

sistemi di rilevazione fumi mediante digitalizzazione delle immagini.

Nelle gallerie dotate di impianto di ventilazione meccanica i dispositivi e gli impianti di rilevazione degli incendi devono consentire la localizzazione del focolaio.

La buona pratica corrente richiede siano assicurati tempi di rilevazione certa dell'evento di incendio non superiori a 3 minuti a partire dall'arresto del veicolo incidentato.

Qualora i sistemi di rilevazione incendio siano installati in strutture che consentono il transito di merci pericolose la determinazione delle prestazioni deve essere effettuata attraverso l'analisi di rischio.

#### Semafori, PMV, Segnaletica di emergenza

Agli imbocchi di tutte le gallerie di lunghezza superiore a 500 m, devono essere installati semafori che consentano la chiusura della galleria in situazioni di emergenza e , a distanza di 150 metri prima degli imbocchi, dovranno essere previsti pannelli a messaggio variabile costituiti da una indicazione alfanumerica e da un pittogramma di tipo full color.

Nelle gallerie di lunghezza superiore a 1000 metri i semafori e il sistema PMV andranno ripetuti ogni 300 metri all'interno della galleria; in questo caso si dovranno adottare le lanterne semaforiche a messaggio variabile (croce rossa, freccia verde) poste sopra le corsie di marcia come da fig. II 458 Art. 164 del D.P.R. 495/92.

Nell'allegato III figurano i segnali e i pannelli da usare nelle gallerie.

Le gallerie devono essere precedute, in corrispondenza dell'imbocco, dal segnale "galleria" di cui all'art. 135 ed alla figura II 316 del D.P.R. 495/92, con pannello integrativo indicante la denominazione e la lunghezza della galleria, secondo l'art. 83 Modello II 2 del suddetto D.P.R.

Nel pannello indicante la denominazione deve comparire il logo dell'ANAS come riportato in figura 4 dell'allegato III al presente documento.

Ogni galleria deve essere preceduta da un segnale di pericolo (Figura II 35 Art.103 del D.P.R. 495/92) posto 150 m prima dell'imbocco (e comunque ad una distanza dall'imbocco non inferiore alla distanza di arresto del veicolo), recante l'iscrizione "galleria" secondo il Modello II 6.

Le piazzole di sosta devono essere segnalate 250 m prima con il segnale luminoso mostrato in figura 5 dell'allegato III al presente documento. Il segnale suddetto deve essere ripetuto in corrispondenza della piazzola di sosta.

A 150 m dal portale di uscita deve essere posto, all'interno della galleria e qualora ritenuto necessario, il cartello in fig. II 22 Art. 93, con gli eventuali pannelli aggiuntivi secondo il Modello II 6/h Art.83 od il Modello II 6/i Art.83.

Per le gallerie stradali di lunghezza superiore a 2000 m deve essere imposta una distanza minima di sicurezza tra veicoli pari a 100 m durante la marcia con apposito segnale di cui all'art. 116 ed alla figura II 49 del D.P.R. 495/92, da ripetere opportunamente lungo la galleria.

Il semaforo all'imbocco della galleria deve essere preceduto dal cartello di preavviso semaforico come da Figura II 31/a Art. 99, abbinato al già citato segnale di pericolo generico – galleria (Figura II 35 Art.103 del D.P.R. 495/92).

Tutta la segnaletica luminosa presente in galleria deve essere alimentata dall'impianto elettrico di sicurezza.

Il progetto complessivo della segnaletica deve comunque considerare con attenzione le singole ubicazioni ed i raggruppamenti di segnali per evitare l'affollamento od il disordine della segnaletica stessa.

La segnaletica verticale di emergenza (piazzole, S.O.S., estintori, idranti, uscite di emergenza) deve essere di tipo luminoso; la rimanente segnaletica deve essere almeno ricoperta di pellicola ad alta rifrangenza.

Ogni 75 m, alternativamente sui due piedritti della galleria, deve essere posto il segnale luminoso di fig. 2 in modo da indicare le vie di fuga più vicine e la relativa distanza.

Le uscite di sicurezza devono essere indicate da un segnale certificato, facilmente visibile da tutte le direzioni di accesso all'uscita con la sola eccezione di una porta di accesso principale chiaramente identificabile come accesso ad un luogo sicuro.

In corrispondenza di ciascun accesso di via di fuga o luogo sicuro deve essere installato a bandiera il segnale luminoso mostrato in figura 7 dell'allegato III al presente documento .

In prossimità dei cartelli non devono esserci oggetti o rivestimenti di colori e forme contrastanti che potrebbero non consentire l'identificazione corretta della segnalazione.

I segnali devono recare caratteri di dimensioni e tipologia facilmente individuabili.

#### Sistemi di comunicazione

In tutte le gallerie di lunghezza superiore a 1000 m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia devono essere installati impianti per ritrasmissioni radio ad uso dei servizi di pronto intervento.

In particolare deve essere previsto un impianto radio che consenta le comunicazioni agli operatori ANAS, alle forze dell'ordine, ai Vigili del Fuoco e ad altri operatori di soccorso e di intervento, nonché la ripetizione di alcune frequenze radio FM per trasmettere eventuali informazioni agli utenti in galleria.

Deve, inoltre, essere valutata l'opportunità tecnico-economica e di sicurezza di prevedere l'installazione di un sistema unico radiante multi-operatore che permetta l'estensione della copertura dei sistemi di telefonia mobile in galleria.

I luoghi sicuri temporanei in cui gli utenti della galleria in fase di evacuazione sono tenuti a stazionare prima di poter raggiungere l'esterno devono essere dotati di altoparlanti per comunicare informazioni agli utenti stessi.

Il sistema di comunicazione deve consentire:

la comunicazione agli utenti istruzioni di comportamento attraverso messaggi pre-registrati,

la comunicazione agli utenti dalla sala di controllo o da una postazione remota di informazioni aggiuntive.

Qualora i tempi di attesa previsti siano superiori a 30 min è necessario valutare la necessità di installazione di un impianto bi-direzionale audio-video.

In caso di strutture esistenti aventi interdistanze elevate tra le vie di fuga deve essere valutata caso per caso la necessità di installare sistemi di guida sonora lungo la galleria al fine di agevolare il processo di esodo degli utenti.

Alimentazione elettrica e circuiti elettrici

Tutte le gallerie devono disporre di un'alimentazione elettrica di emergenza per assicurare il funzionamento dei sottosistemi di sicurezza sino alla totale evacuazione degli utenti dalla galleria.

Lo schema tipico dell'impianto di alimentazione elettrica da prevedere per le gallerie è mostrato in figura 8 dell'allegato III al presente documento.

Tutte le gallerie devono essere dotate di un sistema di alimentazione elettrica di sicurezza in grado di garantire la continuità del servizio per un intervallo di tempo fissato.

L'alimentazione elettrica di sicurezza (UPS), deve avere una autonomia non inferiore ad 1 h, quando non diversamente specificato per le singole parti di impianto che alimenta.

L'alimentazione di emergenza deve essere in grado di garantire il funzionamento dei seguenti impianti:

impianto di alimentazione di emergenza,

impianto di ventilazione della galleria per la gestione dei fumi generati da un evento di incendio,

impianto di ventilazione delle vie di fuga,

impianto idrico antincendio ,

impianto Illuminazione diurna e notturna della galleria.

Qualora il progetto preveda l'alimentazione parziale del sistema di ventilazione attraverso l'impianto elettrico di emergenza si deve subordinare l'accettazione della soluzione ad idonea analisi di rischio.

L'alimentazione di sicurezza deve essere in grado di garantire il funzionamento dei seguenti impianti:

impianto di illuminazione notturna e di sicurezza,

impianto di illuminazione delle vie di fuga,

impianto di illuminazione del centro di controllo e dei locali tecnici,

la segnaletica in galleria e nei tratti in prossimità degli imbocchi,

dispositivi di misura installati in galleria,

impianto di sorveglianza,

impianti di rilevazione incidenti ed incendio,

sistema di gestione della galleria,

impianti di comunicazione.

I cavi di alimentazione elettrica devono essere collocati per quanto possibile in sede protetta; ove non sia possibile il posizionamento sotto il marciapiedi, dietro il profilo redirettivo o all'interno del rivestimento, i cavi devono essere alloggiati in apposite canaline o passerelle di caratteristica AISI almeno 304L.

Tutti i cavi presenti in galleria, indipendentemente dalle condizioni di posa, dovranno essere del tipo non propagante l'incendio e senza alogeni "LSOH" (CEI 20-22, CEI 20-37, CEI 20-38) e con tensione nominale 0,6/1 kV.

I cavi che costituiscono i circuiti di emergenza, fino al dispositivo che alimentano, devono essere rispondenti alla norma CEI 20-45 ed. 2° del 2003, ovvero del tipo non propaganti l'incendio, senza

alogeni (LSOH), tensione nominale 0,6/1 kV e resistenti al fuoco secondo i metodi di prova stabiliti nelle norme CEI EN 50200 e CEI EN 50362.

L'architettura della distribuzione elettrica, compreso il numero delle cabine di trasformazione, deve essere progettata secondo criteri di natura tecnico-economica e buona pratica progettuale.

I circuiti elettrici di misura e di controllo devono essere progettati in modo che un guasto locale, dovuto ad esempio a un incendio, non coinvolga i circuiti non interessati.

L'affidabilità del sistema di alimentazione elettrica deve essere verificata mediante analisi di rischio, quando necessaria.

#### Caratteristiche ignifughe degli impianti

Il livello delle caratteristiche ignifughe di tutti gli impianti della galleria deve tenere conto delle possibilità tecnologiche e mirare al mantenimento delle necessarie funzioni di sicurezza in caso di incendio.

L'analisi di scenario deve essere utilizzata per valutare le temperature massime ed i tempi minimi di funzionamento ammissibili per le dotazioni impiantistiche.

La successiva tabella riporta i dispositivi che devono garantire una determinata resistenza al fuoco o alle alte temperature.

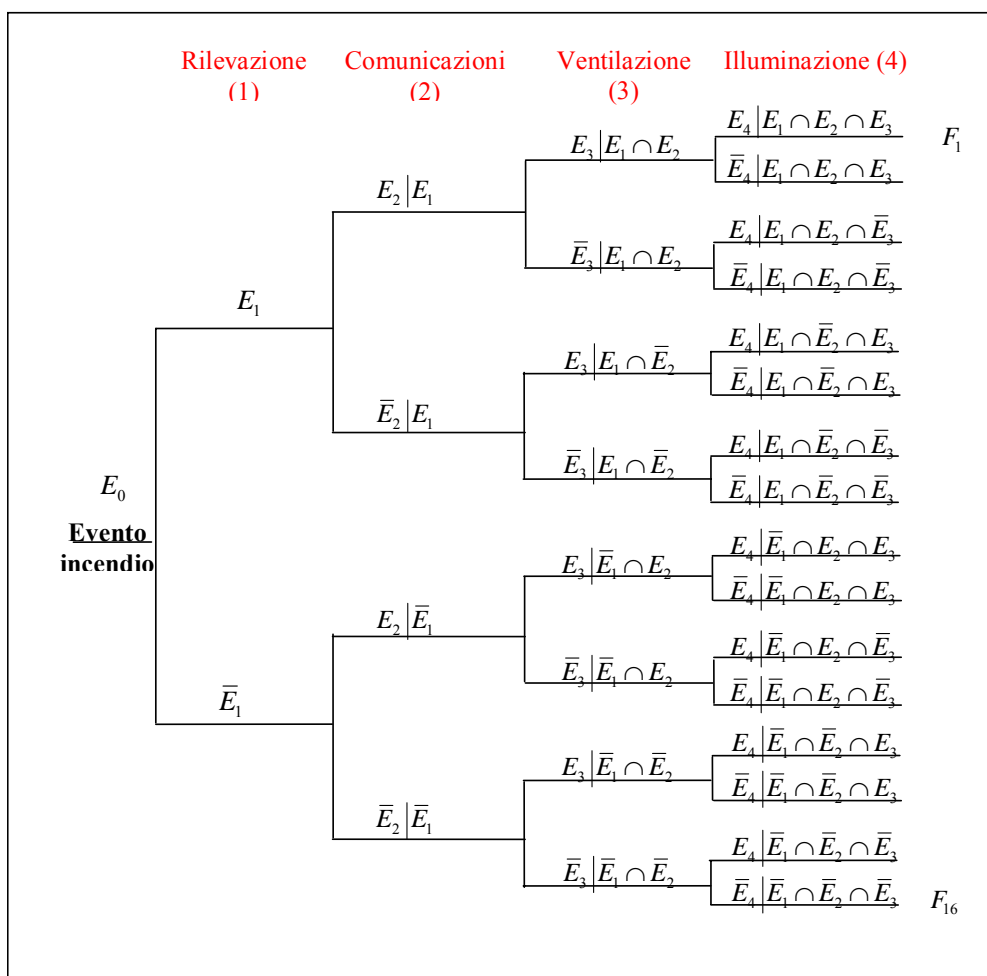
	Temperatura [°C]	Tempo [min]
Acceleratori in volta	400	90
Morsettiere e cassette derivazione ventilatori e luce emergenza	400	90
Ventilatori di estrazione	400	90
Serrande motorizzate di estrazione fumi	400	90
Supporti	400	90



Inoltre, i materiali di costruzione della segnaletica di emergenza, degli armadietti di emergenza, dei ventilatori installati in galleria, dei supporti, devono essere di acciaio inox con caratteristica non inferiore ad AISI 304L.

### Allegato-ETA Gallerie Stradali

Lo schema ad albero mostrato nella successiva figura esemplifica l'evoluzione del sistema galleria interessato da un evento di incendio mostrando la successione e la mutua interazione di sottoeventi critici corrispondenti a diversi sottosistemi di sicurezza che sono coinvolti nel verificarsi dell'evento.



Le traiettorie possibili per il sistema galleria, definite a partire dall'evento incidentale iniziatore (evento incendio) fino agli esiti finali  $F_i$  ( $i = 1, \dots, 16$ ), si ottengono come intersezione dei sottoeventi associati ai diversi sottosistemi secondo una logica on - off. Ciascuno dei sottoeventi rappresentato come  $A|B$ , indica l'evento  $A$  "condizionato" dal verificarsi dell'evento  $B$ , qualunque siano gli eventi  $A$  e  $B$ . Ad esempio il sottoevento  $E_3|E_1 \cap E_2$ , indica che il sottosistema ventilazione ( $E_3$ ) funziona correttamente, posto che i due sottosistemi rilevazione ( $E_1$ ) e comunicazione ( $E_2$ )

funzionino anch'essi correttamente. L'evento indicato con  $\bar{E}_i$ , indica condizioni di malfunzionamento dell'i-esimo sottosistema. Può accadere che l'intersezione di sottoeventi corrispondenti a rami di un dato percorso, dia luogo ad un evento caratterizzato da probabilità di accadimento nulla. In tali casi il ramo rappresentativo dell'evento impossibile è eliminato dall'albero (operazione di potatura).

L'analisi ad albero delle cause è mirata a determinare le probabilità di accadimento dei singoli sottoeventi, tenendo conto delle specifiche tecniche del sottosistema a cui si riferiscono; l'analisi ad albero degli eventi è invece mirata a valutare le probabilità di accadimento degli esiti di fine emergenza, come prodotto delle probabilità di accadimento dei singoli sottoeventi che insistono sul ramo considerato.

### **Analisi di scenario**

L'analisi di scenario si articola nelle seguenti fasi.

- scelta del Gruppo Completo di Eventi Iniziatori Incompatibili,
- caratterizzazione degli Eventi Iniziatori,
- scelta degli scenari,
- modellazione degli scenari.

### **Gruppo Completo di Eventi Iniziatori Incompatibili**

La caratterizzazione degli eventi incidentali può essere condotta assumendo come grandezze di riferimento le caratteristiche geometriche della galleria e le caratteristiche del traffico.

Specificità del sistema galleria quali condizioni meteo-climatiche ai portali anomale, pendenza elevata, tempi di intervento dei servizi di soccorso pubblici, ambiente circostante densamente popolato, condizioni prevalenti di traffico esterno congestionato, devono essere tenuti in conto nella scelta degli eventi incidentali rilevanti.

### **Caratterizzazione degli Eventi Incidentali**

Gli eventi incidentali devono essere:

scelti in modo rappresentativo a ricostruire il gruppo completo di eventi incompatibili, caratterizzati da una pericolosità intrinseca,

includenti le caratteristiche geometrico-architettoniche essenziali della struttura e le specificità derivanti dalla localizzazione nell'ambiente.

Le successive tabelle sintetizzano gli elementi essenziali nella caratterizzazione degli eventi incidentali rilevanti.

Categorie veicoli	Caratteristiche geometrico-architettoniche	Localizzazione ambientale della struttura
Autovettura	Larghezza	Pendenza
Furgone	Sezione	Condizioni meteorologiche ai portali
Autobus	Numero canne	Distanza centro di soccorso pubblico
Veicoli pesanti		

	Autovettura	Furgone	Autobus	Veicolo pesante <10 t	Veicolo pesante >10 t
Allestimenti	Incendio	Incendio	Incendio	Incendio	Incendio
Alimentazione dei veicoli	Incendio	Incendio	Incendio	Incendio	Incendio
Carico trasportato: combustibile di classe A		Incendio (modalità di stoccaggio)		Incendio (modalità di stoccaggio)	Incendio (modalità di stoccaggio)
Carico trasportato: combustibile di classe B				Sversamento Incendio	Sversamento Incendio
Effetto-domino (veicoli coinvolti)	4	3	2	2	2

### Caratterizzazione degli Scenari

La definizione del contesto può essere effettuata adottando i seguenti parametri guida:

i tempi di accadimento dell'evento nell'arco del giorno,

le condizioni meteo-climatiche ai portali,

le condizioni di traffico.

La scelta degli scenari deve essere operata con discernimento evitando di assumere in modo sistematico configurazioni limite che potrebbero mascherare l'interesse delle misure di sicurezza.

La scelta degli scenari non deve essere effettuata in termini esaustivi, ma esaltandone l'attitudine a far comprendere l'interazione fattiva tra i sottosistemi di sicurezza, le procedure di gestione dell'evento incidentale, le procedure di intervento, nel conseguimento delle caratteristiche di sicurezza della struttura analizzata.

La durata degli scenari incidentali può essere fissata in quindici-trenta minuti essendo detto intervallo temporale cruciale e dirimente nella determinazione del flusso del pericolo nella struttura che condiziona l'auto-salvataggio degli utenti.

### **Modellazione del flusso del pericolo**

L'evoluzione del flusso del pericolo in condizioni incidentali è determinato da:

- configurazione geometrica della struttura galleria,
- destinazione d'uso della struttura galleria,
- dinamica dell'evento incidentale e caratteristiche specifiche dei fenomeni e dei processi di trasporto delle grandezze massa, quantità di moto, energia.

La configurazione geometrica della struttura galleria determina l'atto di moto dei prodotti della combustione, i processi di scambio termico, il processo di dispersione delle sostanze tossiche.

La destinazione d'uso della struttura rende rilevante, ai fini della sicurezza, il comportamento degli utenti.

Il progetto e l'adeguamento della sicurezza nelle gallerie stradali richiedono la modellazione dei fenomeni e dei processi connessi alle specificità del sistema galleria:

- propagazione dei fumi,
- dispersione di nubi tossiche,
- comportamento degli utenti.

I modelli, in modo indipendente dal livello di complessità formale, sono affetti da limiti ed incertezze:

- limiti di rappresentazione dei fenomeni e dei processi;
- incertezze nelle condizioni iniziali ed al contorno;
- errori connessi al processo di discretizzazione ed ai metodi numerici di soluzione, quando non si utilizzino modelli semplificati suscettibili di soluzioni analitiche.

La propagazione dei fumi all'interno del sistema galleria e la conseguente dispersione di nubi tossiche, sono processi sensibili alle variazioni di numerosi parametri di natura diversa:

- parametri geometrici,
- parametri fluidodinamici,
- parametri di scambio termico,
- parametri caratterizzanti il trasporto di massa.

Il comportamento degli utenti si configura come la manifestazione di un processo complesso realizzato da aggregati di individui e caratterizzato da una evoluzione fortemente influenzata dalla fisiologia e dalla psicologia dei singoli.

La modellazione del flusso degli utenti in condizioni incidentali (processo di esodo), allo stato attuale della ricerca, è una modellazione di natura semi-empirica fortemente influenzata dai valori attribuiti ai parametri macroscopici di rappresentazione del flusso e si avvale di tecniche di simulazione che inglobano le caratteristiche aleatorie del processo determinate dal comportamento degli utenti.

La modellazione degli scenari è preposta a:

- mostrare in modo univoco il ruolo svolto da ciascuno dei sotto-sistemi di sicurezza e delle procedure di gestione nel limitare l'evoluzione dei processi e gli effetti nocivi sulla sicurezza degli utenti;
- evidenziare le mutue interazioni tra sotto-sistemi di sicurezza e procedure di gestione in condizioni di emergenza;

- identificare gli elementi di debolezza di ciascun sotto-sistema di sicurezza e gli effetti sulla risposta complessiva in termini di sicurezza globale della struttura;
- determinare l'esistenza e l'estensione di zone pericolose all'interno della struttura e nell'ambiente circostante;
- determinare i tempi di instaurazione e di permanenza delle condizioni critiche;
- valutare il numero dei veicoli e degli utenti presenti nella struttura ed esposti al flusso del pericolo, gli effetti dell'esposizione a campi anomali delle grandezze di definizione del micro-clima all'interno della struttura (concentrazione dei gas tossici, livelli di temperatura, flussi termici irraggiati, sovrappressioni);
- valutare i tempi di esodo degli utenti dalla struttura.

L'identificazione dello scenario di emergenza simulato, considerato come evento di riferimento, permette la validazione prestazionale dei sotto-sistemi e delle procedure di gestione dell'emergenza nonché del funzionamento del sistema galleria nel suo complesso, ovvero suggerire l'adeguamento della struttura.

I risultati delle simulazioni dovrebbero essere analizzati e temperati da:

la realizzabilità delle misure di sicurezza geometriche ed architettoniche,

la realizzabilità delle misure di sicurezza impiantistiche,

l'efficacia funzionale delle misure di sicurezza adottate.

### **Standardizzazione dei parametri necessari all'analisi di scenario**

La standardizzazione di alcuni elementi nell'analisi di scenario è consigliata dall'influenza determinante ad essi associata nella determinazione della sicurezza del sistema galleria.

Elementi suscettibili di standardizzazione possono essere:

- la sorgente (focolaio di incendio, sorgente di rilascio di sostanze tossiche, pozza di liquidi ovvero gas liquefatti conseguente ad eventi di sversamento),
- i criteri di sopravvivenza,

- il comportamento degli utenti e le modalità di esodo.

I valori standardizzati sono utilizzati nell'analisi di scenario. Deroghe sono possibili per una galleria quando sia dimostrata la non-idoneità di rappresentazione delle determinazioni degli elementi standardizzati nella valutazione del livello di sicurezza della struttura. L'adozione di determinazioni diverse degli elementi standardizzati implica la formulazione e la caratterizzazione univoca degli scenari complementari.

### **Standardizzazione della sorgente**

Il termine sorgente nella modellazione di un evento di incendio è quantificato utilizzando come grandezza caratteristica la *potenza termica generata* dai focolai potenziali identificati con i veicoli ammessi al transito.

La scelta della potenza termica generata dai focolai potenziali come grandezza caratteristica è giustificata dalle indicazioni derivanti dallo stato attuale delle conoscenze inerenti la dinamica degli eventi di incendio.

L'incendio di un veicolo si assume assimilabile ad un processo caratterizzato da una evoluzione rapida.

La maggiorazione introdotta sulla velocità di evoluzione dell'evento si giustifica nell'ottica dell'approccio prestazionale, proposto come funzionale alla verifica della resistenza al fuoco dei dispositivi costituenti i sottosistemi di sicurezza, delle procedure di gestione degli scenari incidentali, delle procedure di esodo degli utenti.

Lo sviluppo di un evento di incendio può essere modellato adottando funzioni diverse ed identificando intervalli temporali caratteristici dell'evoluzione dell'evento.

Funzioni analitiche idonee alla rappresentazione dello sviluppo di un evento di incendio possono essere tanto funzioni definite a tratti quanto funzioni continue.

La scelta è subordinata alla tipologia dell'evento da modellare.

Esempi paradigmatici di funzioni di rappresentazione sono:

funzioni triangolari,

funzioni trapezoidali,

funzioni esponenziali,

Le funzioni triangolari sono idonee alla caratterizzazione di eventi di incendio relativi a singoli veicoli assumendo che il processo di propagazione ai veicoli adiacenti (effetto domino) sia caratterizzato da una probabilità di accadimento trascurabile.

Le funzioni trapezoidali sono idonee alla caratterizzazione di eventi di incendio per i quali la probabilità di accadimento dell'effetto domino può essere considerata non trascurabile.

L'instaurazione dell'effetto domino è condizionata da:

distribuzione spaziale dei veicoli in prossimità del focolaio principale, determinata dalla dinamica dell'evento iniziatore;

caratteristiche fisico-chimiche e merceologiche e le modalità di stoccaggio del carico determinanti la cinetica di combustione e la potenza generata dal focolaio;

regimi di ventilazione caratterizzanti lo scenario che possono influenzare la stechiometria e la cinetica della combustione.

Le grandezze rilevanti nella caratterizzazione della sorgente possono essere identificate con:

il potere calorifico dei materiali combustibili,

la velocità di combustione,

la durata dell'evento.

La caratterizzazione del fenomeno della combustione di focolai costituiti da veicoli medio-piccoli è attualmente oggetto di ricerca presso diversi laboratori pubblici e privati.

La caratterizzazione del processo di combustione di focolai costituiti da veicoli pesanti è in fase embrionale di sviluppo dal punto di vista della ricerca teorica e sperimentale. I dati disponibili sono derivati da un numero ridotto di prove condotte su scala reale finalizzate ad obiettivi diversi dalla caratterizzazione del processo di combustione.

La caratterizzazione del termine di sorgente per un evento di incendio nel quale sia coinvolto un veicolo pesante non può essere condotta su base rigorosa a causa della mancanza di procedure assodate e sostanziate dal punto di vista scientifico.



L'attuale sviluppo della ricerca dovrebbe orientare ad una standardizzazione ad interim dei termini di sorgente avulsa dalla descrizione quantitativa del processo di combustione dei focolai costituiti da autoveicoli pesanti.

La standardizzazione ad interim potrebbe essere attuata introducendo il concetto di “focolaio equivalente” quantificato attraverso “modelli di sorgente equivalente” definiti per macro categorie di veicoli in funzione del carico prevalentemente trasportato ed esclusivamente mirati ad una caratterizzazione energetica delle diverse tipologie di focolai di incendio possibili in galleria.

La caratterizzazione del termine di sorgente dovrebbe includere la quantificazione, in termini di composizione e tasso di generazione, dei prodotti della combustione tenendo in debito conto le interazioni tra “il ciclo del combustibile” ed il “ciclo del comburente” in un ambiente confinato, responsabili dei pericoli potenziali ai quali possono essere soggetti gli utenti e le squadre di soccorso.

La caratterizzazione potrebbe essere effettuata assumendo come grandezze rappresentative:

- il deficit di ossigeno
- la produzione di monossido di carbonio
- la produzione di vapore acqueo
- la tossicità specifica del carico e dell'involucro.

Lo stato fisico dei fumi potrebbe essere caratterizzato assumendo come grandezze rappresentative:

- la temperatura media
- il coefficiente di assorbimento
- il coefficiente di diffrazione
- l'opacità.

### **Standardizzazione dei criteri di sopravvivenza**

Gli indicatori, definiti dosi frazionali inabilitanti (fractional effective dose) secondo la norma ISO 13571, Life threat of fires – Guidance on the estimation of time available for escape using fire data, sono classificati come indicatori di rischio chimico (concentrazioni di sostanze tossiche, irritanti, di

ossigeno, ai fini della valutazione della ipossia), indicatori di rischio termico (temperature dei gas e dell'aria, valori di irraggiamento termico ai quali gli utenti sono esposti in galleria).

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

Gli andamenti nel tempo dei valori dei parametri di rischio costituiscono la base dei dati utilizzata per l'applicazione dei modelli di esodo e sono determinati dall'analisi di scenario.

L'approccio utilizzato si basa sul calcolo del tempo disponibile per l'esodo dei passeggeri attraverso un percorso interessato dalla propagazione dei prodotti della combustione.

Gli effetti di cui le formule empiriche del modello proposto nel documento succitato tengono conto, sono computati in base ai valori assunti dai parametri di rischio lungo la galleria ed al tempo di esposizione delle persone a ciascun elemento di rischio. Gli effetti sono funzione del prodotto delle concentrazioni di ciascun parametro di rischio (CO, CO<sub>2</sub>, HCl, HCN, etc.) pesato con il tempo di esposizione e normalizzato rispetto ad un valore limite costituente il parametro di riferimento, FED *fractional effective dose*, per il calcolo del tempo disponibile per l'esodo.

Il calcolo delle dosi frazionarie è finalizzato a confrontare, per ogni parametro di rischio, il valore ottenuto, rappresentativo della dose frazionaria inabilitante complessivamente assunta dal generico utente durante l'esodo, con il valore di soglia.