

**Alma Mater Studiorum  
Università di Bologna**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**DISTART**

**Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle  
Acque, del Rilevamento, del Territorio**

*Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile - Indirizzo Strutture*

**TESI DI LAUREA IN  
COSTRUZIONI DI STRADE, FERROVIE ED AEROPORTI L-S**

**L'ANALISI DI RISCHIO NELLA  
PROGETTAZIONE DELLE GALLERIE  
STRADALI**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. **Giulio Dondi**

Laureando:

**Davide Panzavolta**

Correlatore:

Dott. Ing. **Valeria Vignali**

---

**Anno Accademico 2008 - 2009**

**Sessione II**

---



## **Parole chiave:**

Galleria stradale

Analisi di rischio

Alberi degli eventi

Sicurezza stradale

QRAM

---

# Indice

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

## **CAPITOLO 1**

### **SICUREZZA NELLE GALLERIE STRADALI**

<b>1.1 Introduzione.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Sistema dei trasporti in evoluzione.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Le gallerie presenti in Italia.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Caratteristiche delle gallerie Stradali.....</b>	<b>16</b>
1.4.1 Gallerie stradali a canna singola.....	17
1.4.2 Gallerie stradali a canna doppia.....	19
<b>1.5 Incidenti che si sono verificati in galleria.....</b>	<b>20</b>
1.5.1 Indagine realizzata sui dati storici.....	24
1.5.1.1 Classificazione su scala temporale.....	24
1.5.1.2 Classificazione su scala geografica.....	27
1.5.1.3 Classificazione in base alle cause che provocano gli incidenti in galleria.....	29
<b>1.6 Alcuni incidenti gravi avvenuti in galleria.....</b>	<b>34</b>
1.6.1 Incidente nella galleria del Monte Bianco.....	34
1.6.2 Incidente nel traforo del Tauerntunnel.....	36
1.6.3 Incidente nella galleria del San Gottardo.....	37

## **CAPITOLO 2**

### **ANALISI DI RISCHIO DI UNA GALLERIA STRADALE: LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

<b>2.1 Introduzione.....</b>	<b>39</b>
------------------------------	-----------

<b>2.2 Circolare Ministeriale n. 7938 del 06/12/1999</b> .....	39
<b>2.3 Decreto Ministeriale 05/06/2001</b> .....	42
<b>2.4 Decreto Ministeriale 05/11/2001</b> .....	43
<b>2.5 Norma UNI 11095 del 01/12/2003</b> .....	46
<b>2.6 Decreto Ministeriale n. 3476 del 14/09/2005</b> .....	46
<b>2.7 Circolare ANAS n. 33 del 2005</b> .....	48
<b>2.8 Direttiva 2004/54/CE</b> .....	49
2.8.1 Organizzazione della sicurezza.....	50
2.8.1.1 Autorità amministrative .....	50
2.8.1.2 Gestore della galleria .....	51
2.8.1.3 Responsabile della sicurezza .....	51
2.8.1.4 Ente per le ispezioni.....	52
2.8.2 Analisi del rischio .....	53
2.8.3 Requisiti tecnici .....	54
2.8.3.1 Infrastrutture .....	54
2.8.3.2 Regole da rispettare .....	59
2.8.3.3 Veicoli.....	59
2.8.3.4 Informazioni agli utenti della strada .....	60
<b>2.9 Decreto Legislativo n. 264 del 05/10/2006</b> .....	60
2.9.1 Obbiettivi di sicurezza e metodologia di analisi di rischio .....	61
2.9.1.1 Scopo dell'analisi.....	62
2.9.1.2 Metodologia di analisi .....	63
2.9.1.3 Obbiettivi di sicurezza e criteri di accettabilità .....	65
<b>2.10 Circolare ANAS n. 17 del 2006</b> .....	66
2.10.1 Procedura di progettazione della sicurezza per una galleria stradale .....	68
2.10.1.1 Schedatura del sistema galleria.....	70

2.10.1.2 Analisi di vulnerabilità.....	79
2.10.1.3 Analisi di rischio.....	84

## **CAPITOLO 3**

### **IL RISCHIO**

<b>3.1 Introduzione.....</b>	<b>89</b>
<b>3.2 Concetto di probabilità.....</b>	<b>92</b>
3.2.1 Concetti primitivi probabilistici.....	92
3.2.2 Definizione di probabilità.....	93
3.2.2.1 Definizione classica di probabilità.....	93
3.2.2.2 Definizione frequentistica di probabilità.....	93
3.2.2.3 Definizione soggettivistica di probabilità.....	94
3.2.2.4 Definizione assiomatica di probabilità.....	94
3.2.3 Definizione della variabile aleatoria.....	95
3.2.4 Funzioni di probabilità Gaussiane e Gaussiane- standardizzate.....	96
<b>3.3 Definizione quantitativa del rischio.....</b>	<b>98</b>
3.3.1 Espressione del rischio in termini di un “insieme di triple”.....	98
3.3.2 Curve di rischio.....	99
3.3.2.1 Danni multidimensionali.....	102
3.3.3 “Probabilità di frequenza”.....	103
3.3.4 Curve di rischio in formato di frequenza.....	104
3.3.5 Inserimento degli elementi di incertezza.....	106
3.3.6 Insieme di triple che comprende gli elementi di incertezza.....	107
3.3.7 Valutazione della frequenza degli scenari - Teorema di Bayes.....	108

<b>3.4 Tipi di rischio</b> .....	110
<b>3.5 La percezione pubblica del rischio</b> .....	113
<b>3.6 Rischio “accettabile”</b> .....	115
<b>3.7 Rischio in campo stradale</b> .....	119

## **CAPITOLO 4**

### **L'ANALISI DEL RISCHIO**

<b>4.1 Introduzione</b> .....	121
<b>4.2 Individuazione delle sorgenti di rischio</b> .....	123
4.2.1 Mappe di rischio .....	124
4.2.2 Curve di rischio sociale .....	127
4.2.3 Analisi di sensitività .....	128
<b>4.3 Definizione degli scenari</b> .....	129
<b>4.4 Metodologie e procedura di analisi</b> .....	133
4.4.1 Censimento delle sorgenti.....	134
4.4.2 Combinazione dell'analisi ad albero degli eventi con quella ad albero delle cause nella valutazione della frequenza di accadimento degli scenari.....	135
4.4.2.1 Struttura ad albero degli eventi.....	135
4.4.2.2 Struttura ad albero delle cause .....	137
4.4.2.3 Alberi degli eventi indipendenti .....	139
4.4.2.4 Dipendenze negli alberi degli eventi .....	140
4.4.2.5 FTA quantitativa .....	144
4.4.2.6 Quantificazione della frequenza dei risultati .....	146
<b>4.5 Strategia di analisi ad albero delle cause     attraverso l'utilizzo dei “Binary Decision     Diagrams”</b> .....	148

4.5.1 Semplificazione della struttura ad albero .....	148
4.5.1.1 Riduzione di Faunet .....	148
4.5.1.2 Modularizzazione.....	151
4.5.2 Binary Decision Diagram associato .....	154
4.5.3 Analisi quantitativa .....	156
4.5.3.1 “Indisponibilità” di sistema .....	157
4.5.3.2 Intensità di guasto incondizionato del sistema .....	158
4.5.4 Misure di “importanza” .....	160
4.5.4.1 Misura di importanza di Birnbaum.....	160
4.5.4.2 Misura di importanza di criticità.....	161
4.5.4.3 Misura di importanza di Fussel-Vesely .....	161

## **CAPITOLO 5**

### **METODI PER LA VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DEGLI SCENARI E MODELLI DI ESODO NELLA PROGETTAZIONE DELLE GALLERIE STRADALI**

<b>5.1 Introduzione</b> .....	163
<b>5.2 Principali scenari incidentali che possono avere luogo in una galleria stradale</b> .....	164
5.2.1 BLEVE.....	165
5.2.1.1 Modello degli effetti fisici .....	167
5.2.2 VCE: esplosione di una nube infiammabile miscelata con aria.....	168
5.2.2.1 Modello del “TNT equivalente” .....	168
5.2.2.2 Modello “Multy - Energy” .....	170
5.2.3 Torch fire.....	171
5.2.4 Pool fire .....	173
<b>5.3 Parametri da considerare per le gallerie</b> .....	175



<b>5.4 Valutazione delle conseguenze: risultati numerici</b> .....	177
5.4.1 Incendi che coinvolgono veicoli pesanti e fuoriuscita di benzina dal serbatoio .....	178
5.4.1.1 Dimensioni dell'incendio .....	178
5.4.1.2 Produzione di fumo .....	183
5.4.1.3 Movimento del fumo .....	184
5.4.1.4 Effetti tossici .....	188
5.4.1.5 Visibilità .....	189
5.4.1.6 Effetti dovuti alla radiazione termica .....	190
5.4.2 Nubi di vapore tossico generate da Cloro, Ammoniaca o Acroleina .....	191
5.4.2.1 Sorgenti del vapore .....	191
5.4.2.2 Effetti tossici .....	193
5.4.3 BLEVE che coinvolge GPL .....	193
5.4.3.1 Dimensioni della "fireball" .....	193
5.4.3.2 Effetti dati dalla radiazione termica .....	195
5.4.3.3 Effetti generati dalla pressione .....	195
5.4.4 Esplosione di una nube di vapore (VCE) generata da GPL e benzina .....	197
5.4.4.1 Sorgenti del vapore e sviluppo della nube .....	197
5.4.4.2 Sovrappressioni nella galleria .....	198
5.4.4.3 Effetti generati dall'esplosione .....	200
<b>5.5 Equazioni di probit per la valutazione delle vittime</b> .....	200
5.5.1 Rilasci tossici di Cloro .....	201
5.5.2 Rilasci tossici di Ammoniaca .....	201
5.5.3 Rilasci tossici di Acroleina .....	202
5.5.4 Esplosione di una nube di vapore: VCE .....	202
5.5.5 Pool fire .....	202

5.5.6 Torch fire e BLEVE .....	203
<b>5.6 Equazioni di probit per la valutazione dei feriti .....</b>	<b>204</b>
5.6.1 Incendi ed effetti termici .....	204
5.6.2 Incendi ed effetti dovuti al fumo .....	204
5.6.3 Esplosioni .....	205
5.6.4 Rilascio tossico di Cloro, Ammoniaca ed Acroleina ...	206
<b>5.7 Confronto tra i modelli per la valutazione delle vittime e quelli per la valutazione dei feriti .....</b>	<b>206</b>
5.7.1 Scenari che prevedono incendi .....	206
5.7.1.1 Effetti termici .....	206
5.7.1.2 Effetti causati dalla presenza del fumo .....	207
5.7.2 Scenari che prevedono esplosioni .....	208
5.7.3 Rilasci tossici di Cloro, Ammoniaca ed Acroleina.....	209
<b>5.8 Modellazione degli scenari di esodo.....</b>	<b>212</b>
5.8.1 Caratterizzazione del traffico in galleria .....	212
5.8.2 Evacuazione dalla galleria .....	214
5.8.2.1 Principi di evacuazione.....	215
5.8.2.2 Tempo di “pre-movimento” .....	216
5.8.2.3 Analisi del tempo di “pre-movimento” .....	216
5.8.2.4 Valutazione del tempo di movimento.....	219
5.8.2.5 Valutazione delle conseguenze .....	219

## **CAPITOLO 6**

### **IL SOFTWARE QRAM**

<b>6.1 Introduzione .....</b>	<b>221</b>
<b>6.2 Scopo del software QRAM.....</b>	<b>222</b>
<b>6.3 Avvio del programma .....</b>	<b>223</b>
<b>6.4 Sostanze pericolose considerate dal software.....</b>	<b>227</b>

6.4.1	Tipologie di sostanze pericolose .....	227
6.4.2	Tipologie di mezzo di contenimento .....	229
6.4.3	Flussi delle sostanze pericolose .....	230
6.4.4	Caratterizzazione dei rilasci.....	232
<b>6.5</b>	<b>Scenari incidentali</b> .....	<b>234</b>
6.5.1	Probabilità di accadimento degli scenari incidentali....	238
6.5.1.1	Scenario 1: incendio di un mezzo pesante con potenza pari a 100 MW .....	238
6.5.1.2	Scenario 2: Incendio di un mezzo pesante con potenza pari a 20 MW .....	239
6.5.1.3	Scenario 3: BLEVE di GPL trasportato all'interno di un "cylinder" .....	239
6.5.1.4	Scenario 4: incendio di una pozza liquida di carburante .....	241
6.5.1.5	Scenario 5: esplosione di una nube di carburante (VCE) ....	242
6.5.1.6	Scenario 6: rilascio di Cloro .....	244
6.5.1.7	Scenario 7: BLEVE di GPL trasportato all'interno di un'autobotte .....	246
6.5.1.8	Scenario 8: esplosione di una nube di GPL.....	247
6.5.1.9	Scenario 9: incendio di un getto di vapore di GPL.....	247
6.5.1.10	Scenario 10: rilascio di Ammoniaca.....	248
6.5.1.11	Scenari 11 e 12: rilascio di Acroleina da una cisterna e da "cylinder" .....	248
6.5.1.12	Scenario 13: BLEVE di diossido di carbonio liquefatto...	248
6.5.2	Modelli per la valutazione di conseguenze e danni.....	249
6.5.3	Valutazione dei danni alla struttura .....	253
6.5.4	Valutazione dei danni all'ambiente .....	254
6.5.5	Scenari di esodo.....	258
<b>6.6</b>	<b>Descrizione della rete stradale</b> .....	<b>258</b>

<b>6.7 Periodi temporali</b> .....	262
<b>6.8 Descrizione della popolazione</b> .....	264
<b>6.9 Dati meteorologici</b> .....	266
<b>6.10 Zone di impatto</b> .....	269
<b>6.11 Inserimento dei dati nel software QRAM</b> .....	271
6.11.1 Dati preliminari.....	271
6.11.2 Dati relativi al traffico.....	273
6.11.3 Dati relativi alla galleria.....	274

## **CAPITOLO 7**

### **APPLICAZIONE DEL SOFTWARE QRAM PER L'ANALISI DI RISCHIO DEL "TRAFORO DELLE TORRICELLE"**

<b>7.1 Introduzione</b> .....	279
<b>7.2 Studio di fattibilità del Comune di Verona</b> .....	280
7.2.1 Aspetti trasportistici.....	281
7.2.2 Inquadramento geologico, geomorfologico ed idrogeologico.....	282
7.2.3 Descrizione e caratteristiche dell'intervento.....	284
7.2.3.1 Sezione tipo e tracciato.....	284
7.2.3.2 Tipologie costruttive della galleria naturale.....	285
7.2.3.3 Tipologie costruttive della galleria artificiale o trincea coperta.....	285
7.2.3.4 Impianti.....	286
7.2.4 Inserimento ambientale.....	287
<b>7.3 Progetto preliminare proposto da Technital S.p.A., Girpa S.p.A. e Verona Infrastrutture Consorzio Stabile</b> .....	289
7.3.1 Studio trasportistico.....	289

7.3.1.1 Scenario previsionale.....	290
7.3.2 Indicatori demografici e socioeconomici .....	292
7.3.3 Descrizione dell'intervento.....	294
7.3.4 Galleria naturale .....	296
7.3.5 Galleria artificiale.....	302
7.3.6 Impianti tecnologici.....	303
7.3.6.1 Impianti di illuminazione in galleria.....	303
7.3.6.2 Impianti di illuminazione di evacuazione.....	304
7.3.6.3 Impianti di ventilazione in galleria .....	304
7.3.6.4 Impianti di segnalazione di soccorso.....	306
7.3.6.5 Impianti di segnalazione e spegnimento incendi in galleria.....	307
7.3.6.6 Impianti di segnalazione fissa ed a messaggio variabile.....	308
7.3.6.7 Impianto di TV a circuito chiuso .....	308
7.3.6.8 Impianto di telecontrollo.....	309
7.3.6.9 Trattamento dei fumi .....	310
7.3.6.10 Opere civili .....	311
<b>7.4 Progetto preliminare proposto da Geodata     S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A..</b> .....	<b>312</b>
7.4.1 Studio trasporti stico.....	313
7.4.1.1 Scenario di progetto.....	314
7.4.2 Scenario demografico e socioeconomico.....	315
7.4.3 Studio di Fattibilità .....	317
7.4.4 Descrizione dell'intervento.....	319
7.4.5 Le gallerie naturali Adige e Torricelle.....	321
7.4.6 Impianti tecnologici.....	326
7.4.6.1 Impianto di illuminazione in galleria.....	327

7.4.6.1.1 <i>Impianto di illuminazione di rinforzo - livello inferiore</i> .....	327
7.4.6.1.2 <i>Impianto di illuminazione di rinforzo - livello superiore</i> .....	327
7.4.6.1.3 <i>Impianto di illuminazione permanente</i> .....	328
7.4.6.1.4 <i>Impianto di illuminazione di emergenza</i> .....	328
7.4.6.1.5 <i>Impianto di illuminazione di evacuazione</i> .....	329
7.4.6.2 <i>Impianto di ventilazione in galleria</i> .....	329
7.4.6.2.1 <i>Impianto di ventilazione longitudinale - livello superiore</i> .....	330
7.4.6.2.2 <i>Impianto di ventilazione trasversale - livello inferiore</i> .....	331
7.4.6.2.3 <i>Impianto di ventilazione dei locali tecnici</i> .....	332
7.4.6.2.4 <i>Impianto di ventilazione uscite di emergenza</i> .....	332
7.4.6.3 <i>Impianto SOS</i> .....	332
7.4.6.4 <i>Impianto semaforico</i> .....	333
7.4.6.5 <i>Segnaletica di sicurezza</i> .....	333
7.4.6.6. <i>Impianto di rilevazione incendi</i> .....	334
7.4.6.7 <i>Impianto di estinzione incendi</i> .....	334
7.4.6.7.1 <i>Impianto idrico antincendio con tecnologia “water-mist” - livello inferiore</i> .....	334
7.4.6.7.2 <i>Impianto idrico antincendio a idranti - livello superiore e livello inferiore</i> .....	336
7.4.6.8 <i>Impianto di trasmissione segnali radio</i> .....	337
7.4.6.9 <i>Impianto di supervisione</i> .....	337
<b>7.5 Applicazione del software QRAM ai progetti proposti</b> .....	<b>338</b>
7.5.1 <i>I periodi temporali</i> .....	338
7.5.2 <i>La zona d’impatto</i> .....	338

7.5.3 Rete stradale .....	339
7.5.3.1 Rappresentazione della rete stradale.....	339
7.5.3.2 Caratteristiche della rete stradale relative al primo progetto preso in esame .....	341
7.5.3.3 Caratteristiche della rete stradale relative al secondo progetto preso in esame .....	341
7.5.3.4 Caratteristiche della galleria .....	342
7.5.4 Le sostanze pericolose .....	343
7.5.5 Le tipologie di mezzo di contenimento .....	353
7.5.6 Categorie di rottura ed eventuali scenari incidentali.....	353
7.5.7 Descrizione della popolazione .....	354
7.5.8 Risultati forniti dal software QRAM.....	354
7.5.8.1 Risultati relativi al progetto preliminare proposto da Technital S.p.A., Girpa S.p.A. e Verona Infrastrutture Consorzio Stabile.....	355
7.5.8.2 Risultati relativi al progetto preliminare proposto da Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A.....	358
7.5.8.3 Confronto tra i risultati ottenuti e relativi alle due proposte di intervento .....	359

## **CAPITOLO 8**

### **CONCLUSIONI**

<b>8.1 Obbiettivi.....</b>	<b>363</b>
<b>8.2 Applicazione del software QRAM.....</b>	<b>364</b>
<b>8.3 Potenzialità e limiti del software QRAM.....</b>	<b>366</b>

<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>369</b>
--------------------------	------------

# Introduzione

Negli ultimi anni si è sempre più concretizzata un'attenzione notevole, da parte degli esperti del settore, al problema della "sicurezza" ed in particolare all'analisi dell'esposizione al rischio cui la comunità è sottoposta quotidianamente.

La sicurezza, intesa come stato di esenzione totale da pericoli, è un concetto difficilmente traducibile nella vita reale. Mentre se viene intesa come il sapere che una determinata azione non provocherà danni o li provocherà in modo prevedibile, allora tale concetto si traduce in conoscenza di tipo scientifico, basata su osservazioni ripetibili. In questo contesto essa può garantire una valutazione sensata ed oggettiva.

Inoltre è evidente l'evoluzione a livello sociale del problema "rischio", riconducibile essenzialmente sia ad una maggiore consapevolezza dei rischi insiti nelle attività umane, sia nelle maggiori aspettative di sicurezza e di certezza degli operatori specializzati e della produzione.

In definitiva, la presenza sul territorio di attività che potenzialmente presentano dei rischi pone il problema di garantire un adeguato livello di sicurezza. Tuttavia, tenuto conto che il rischio non è eliminabile in senso assoluto, la valutazione deve essere di carattere relativo ed il livello di accettabilità non rappresenta un dato fisso, ma dipende dall'evoluzione sociale del paese e muta con essa.

In questo studio, partendo da un'analisi approfondita delle varie sfaccettature che caratterizzano il concetto di rischio, si vuole mettere in evidenza l'importanza della metodologia dell'"analisi del rischio" come supporto alla scelta dei criteri più adeguati per il perseguimento dell'obiettivo sicurezza nel trasporto stradale in galleria.

Nel primo capitolo viene spiegato come i recenti disastri accaduti nelle gallerie stradali e ferroviarie, italiane e non, hanno portato agli occhi di tutti la fragilità del sistema e dei tunnel fino ad oggi ritenuti apparentemente sicuri. In queste infrastrutture le problematiche connesse alla sicurezza si manifestano



con drammaticità ed è questa la ragione per cui oggi è necessario intraprendere studi ad un livello che in passato non sempre è stato raggiunto. In questo frangente si stanno muovendo vari Stati e la Comunità Europea.

Si è giunti così alla nascita di una nuova normativa in tema di sicurezza delle gallerie stradali, presentata nel secondo capitolo, che ha permesso ai progettisti ed alle persone preposte, di cambiare il tipo di approccio e di progettare la sicurezza.

Il terzo capitolo entra maggiormente nel dettaglio di queste problematiche, ed il suo obiettivo è quello di fornire una definizione “quantitativa” del rischio, necessaria per la comprensione della procedura di valutazione del rischio stesso. Tale definizione viene utilizzata per discutere i concetti di “rischio relativo” ed “accettabilità del rischio”, e viene estesa fino a comprendere altri due concetti fondamentali: l'incertezza e la completezza. In questo contesto viene descritto il teorema di Bayes e la sua applicazione.

Successivamente, nel quarto capitolo, vengono illustrate le varie fasi da sviluppare nell'analisi di rischio, una scienza diffusamente impiegata nell'ingegneria industriale per lo studio della probabilità di accadimento di un incidente provocato da uno o più guasti in un impianto. La sua logica però è tale da poter essere impiegata in qualunque campo dell'ingegneria. Si tratta, infatti, della cosiddetta “analisi ad albero degli eventi” nella quale le cause dei punti di diramazione del sistema vengono definite utilizzando degli strumenti logici detti appunto “alberi delle cause”. L'attenzione viene posta sulle situazioni non banali, ovvero sui sistemi non coerenti, nei quali i punti di diramazione dipendono gli uni dagli altri. In queste situazioni i metodi di analisi tradizionali sono imprecisi poiché necessitano di approssimazioni e pertanto viene descritto un nuovo approccio che utilizza i BDD (*Binary Decision Diagrams*) e che affronta queste carenze.

Il quinto capitolo entra poi nello specifico delle gallerie stradali e mira a dare una spiegazione degli scenari incidentali verificabili, dei modelli da utilizzare per valutare le conseguenze fisiche di tali fenomeni e gli effetti sulle persone, sulla struttura e sull'ambiente circostante.

Pertanto è evidente che la valutazione del rischio è molto complessa e richiede l'utilizzo di software specifici. Per soddisfare tale necessità è stato sviluppato il QRAM, acronimo di *Quantitative Risk Assessment Model* (Modello per la Valutazione Quantitativa del Rischio), descritto nel dettaglio al sesto capitolo.

Infine, nel settimo viene svolta un'applicazione del software per l'analisi di rischio dell'intervento di completamento dell'anello circonvallatorio a Nord della città di Verona. Verranno messi a confronto due progetti proposti ed in base ai risultati ottenuti verranno tratte le opportune conclusioni illustrate nel capitolo 8.



# Capitolo 1

## Sicurezza nelle gallerie stradali

### 1.1 Introduzione

Le gallerie stradali sono infrastrutture molto importanti. Rappresentano, infatti, un tratto protetto dagli eventi atmosferici, riducono la lunghezza del tracciato, l'impatto ambientale, soprattutto visivo, e limitano le pendenze. D'altra parte, però, emergono anche fattori negativi come il forte condizionamento psicologico sull'utente della strada, la limitazione della visibilità, la necessità di un'impiantistica sofisticata e di conseguenza costi elevati di progettazione e realizzazione.

Queste infrastrutture possono essere distinte, principalmente, in due tipi:

- *gallerie naturali*: realizzate a sezione piena;
- *gallerie artificiali*: realizzate a cielo aperto, utilizzate anche come approccio alle gallerie naturali.

Le sezioni più utilizzate sono quelle circolari o policentriche per le gallerie propriamente dette, e rettangolari per quelle artificiali.

Le gallerie sono anche di elevata rilevanza strategica poiché facilitano la comunicazione tra i più grandi centri dell'Unione Europea e sono quindi essenziali per i trasporti a lunga distanza, svolgendo un ruolo fondamentale per il funzionamento e lo sviluppo dell'economia internazionale.

Recentemente i rischi legati ai tunnel sono aumentati a causa dell'invecchiamento delle infrastrutture stesse. La maggior parte di esse, infatti, sono state costruite seguendo specifiche obsolete. Pertanto, non solo le loro dotazioni non corrispondono più alle migliori tecniche attuali, ma le condizioni del traffico sono cambiate profondamente rispetto a quanto vennero messe in esercizio.

Anche gli utenti che usufruiscono di questi tunnel sono cambiati. Negli ultimi anni, infatti, il rischio di incendi gravi è aumentato significativamente a causa dell'uso sempre più intenso di queste infrastrutture.

Il problema della sicurezza nelle gallerie stradali ha assunto una rilevanza sociale in conseguenza dei sinistri che si sono verificati negli ultimi anni in diverse strutture dislocate lungo la Rete Stradale Transeuropea (TEN-T, TransEuropean Network Transports). Tali incidenti sono caratterizzati da un numero elevato di vittime sia tra gli utenti che tra gli addetti al soccorso ed, inoltre, rappresentano la causa di gravi danni alle strutture, perturbanti la funzionalità della rete locale dei trasporti e condizionanti in modo sensibile le economie locali a causa delle prolungate interruzioni del servizio necessarie al ripristino.

La Rete Transeuropea dei Trasporti (TEN-T) ha un ruolo cruciale nell'assicurare la libera circolazione delle merci all'interno dell'Unione europea. Su di essa transitano circa la metà dei prodotti e dei passeggeri. Gli orientamenti della TEN-T definiscono le priorità dell'Unione, definendo "rete" alcuni grandi assi stradali, in modo da convogliare i contributi finanziari dell'UE sui progetti con maggior valore aggiunto. La TEN-T costituisce un quadro di riferimento per la legislazione di altri settori e promuove la coesione economica, sociale e territoriale dell'Unione.

Questa rete comprende, in particolare, le modalità di trasporto stradale, ferroviario e marittimo e fa parte di un progetto lanciato dal Consiglio Europeo nel 1994 per rispondere alla necessità di un sistema di trasporti e di una rete efficiente di infrastrutture plurimodali, tale da facilitare la circolazione delle merci e delle persone nonché da ridurre la perifericità di alcune zone dell'Unione Europea particolarmente svantaggiate. Tali gallerie sono soggette a standard di qualità elevati e a controlli da parte della Commissione europea.

I tunnel stradali che appartengono alla Rete Transeuropea sono riportati in figura 1.1.

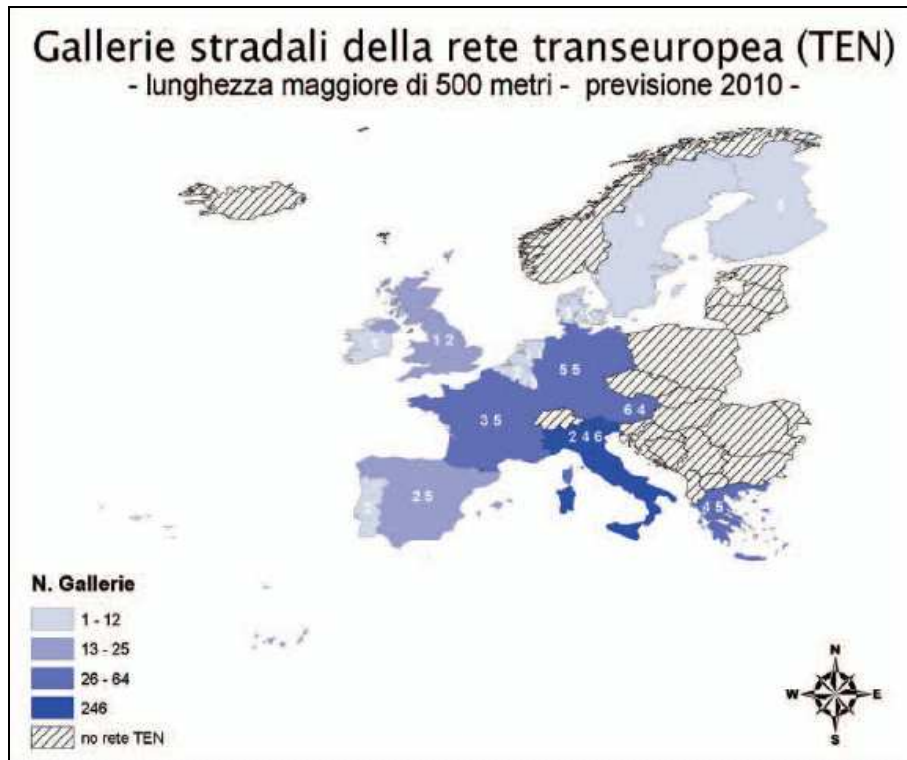


Figura 1.1: gallerie stradali della rete TEN-T di lunghezza maggiore di 500 m.

Per quanto riguarda l'Italia, invece, si può fare riferimento alla figura 1.2.

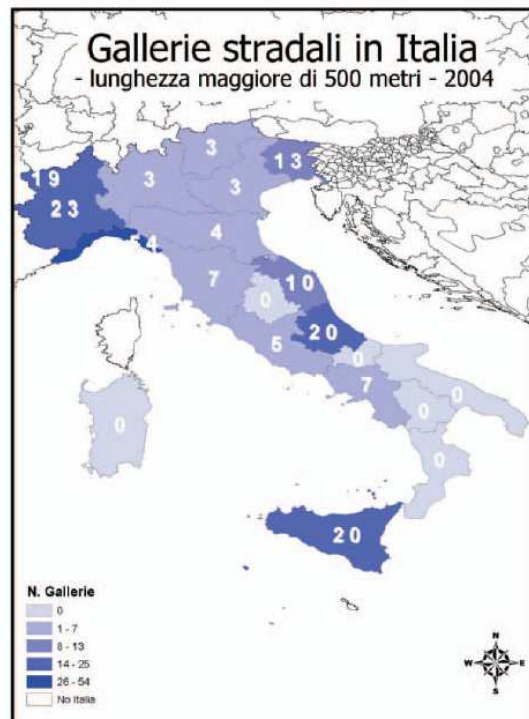


Figura 1.2: gallerie stradali di lunghezza maggiore di 500 m in Italia.

Anche se le statistiche mostrano che il numero di incidenti nei tratti stradali in galleria è inferiore rispetto a quello nei tratti a cielo aperto, è pur vero però che essi tendono all'amplificazione dei danni sia per le persone che per le strutture e gli impianti:

- 11 persone hanno perso la vita nell'incidente del San Gottardo, 39 in quello del Monte Bianco e 12 in quello del Tauern;
- i costi diretti dei recenti incendi nelle gallerie, comprese le spese di riparazione, ammontano a 210 milioni di euro all'anno;
- i costi indiretti, derivanti dalla chiusura del tunnel, sull'economia sono enormi (nel caso del Monte Bianco e solo per l'Italia ammontano a 300-400 milioni di euro all'anno).

Inoltre, essendo le gallerie degli elementi particolari all'interno di un tracciato stradale, perché capaci di influenzare il comportamento dei conducenti, il sistema d'interazione che influenza la sicurezza invece di essere costituito da tre elementi, come per i tratti all'aperto (figura 1.3), diventa più articolato come mostrato dalla figura 1.4 (M. De Guglielmo, 2007).

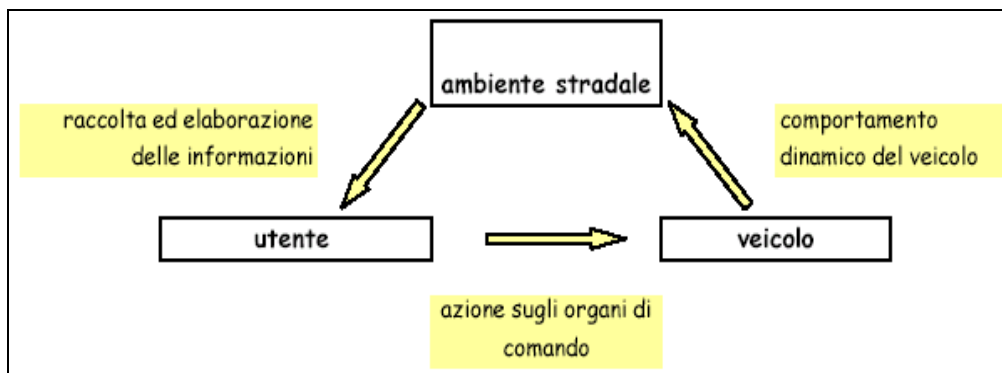


Figura 1.3: sistema di interazione per le sezioni stradali all'aperto.

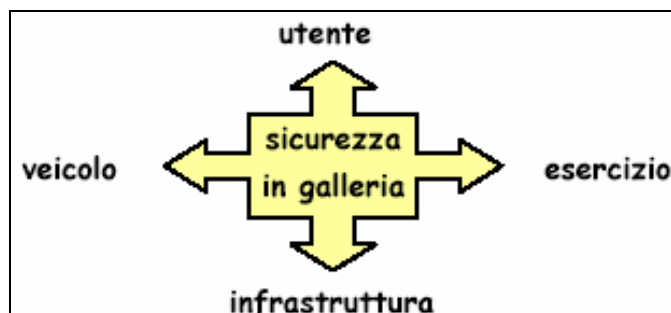


Figura 1.4: sistema di interazione per le sezioni stradali in galleria.

La sicurezza nelle gallerie stradali è, quindi, un argomento alquanto complesso e capace, per questo, di dar vita a campi di ricerca altrettanto vari ed articolati; nello specifico ambito dell'ingegneria stradale, l'interesse di tali campi di ricerca è rivolto:

- al comportamento degli utenti nelle condizioni stradali a cielo aperto (per veicolo isolato e non) ed alle modifiche cui tale comportamento è soggetto in galleria;
- alle caratteristiche dell'infrastruttura;
- alle caratteristiche dell'esercizio: la tipologia ed il funzionamento degli impianti (antincendio, ventilazione, illuminazione).

Tutti questi ambiti di ricerca confluiscono, poi, nelle analisi del rischio e nello studio dell'efficacia delle misure atte a ridurre tali rischi.

Al fine di raggiungere un ottimale livello di sicurezza nelle gallerie stradali sono stati definiti due ordini di obiettivi:

- 1) un obiettivo primario: la prevenzione;
- 2) un obiettivo secondario: la mitigazione delle conseguenze.

Oltre, cioè, al chiaro interesse per la prevenzione degli eventi critici che possono mettere in pericolo gli utenti, l'infrastruttura e l'ambiente circostante, riveste un ruolo importante la creazione di requisiti ottimali al fine di rendere possibile:

- l'autosalvataggio delle persone coinvolte;
- l'intervento immediato ed efficiente degli impianti e dei mezzi di emergenza;
- la limitazione, in generale, dei danni.



## 1.2 Sistema dei trasporti in evoluzione

Il sistema di trasporti, in Italia come nel resto dell'Europa, ha subito un forte incremento a seguito del continuo aumento di mezzi circolanti. A far fronte al bisogno di queste nuove esigenze in termini di servizi pubblici stradali, adeguati al quantitativo di veicoli circolanti, pesanti e non, si presenta la necessità di nuove infrastrutture. Le problematiche legate a questo tipo di opere, spesso di grande portata economica ed organizzativa, sono molteplici. Primo fra tutti un problema di costi, legato alla complessità dell'opera. Nella fattispecie le nuove arterie stradali e ferroviarie, necessarie per realizzare i cosiddetti *corridoi europei* (mostrati in figura 1.5), si scontrano subito con le difficoltà orografiche presenti nel territorio.



Figura 1.5: i corridoi Europei.

Basti pensare alla presenza della catena montuosa delle Alpi per rendersi conto che la progettazione di opere che devono attraversare catene montuose di grande estensione, passa attraverso ostacoli spesso apparentemente

insormontabili. Realizzare un valico stradale funzionale, negli anni passati, diventava quindi non solo opera difficoltosa, ma spesso irrealizzabile con le tecnologie del tempo. Negli ultimi anni la situazione è cambiata radicalmente, grazie soprattutto alle nuove tecnologie disponibili in termini ingegneristici e non, tanto che opere ritenute non realizzabili allora, oggi sono divenute fattibili.

Sicuramente in questo frangente l'evoluzione dei mezzi per la realizzazione di grandi opere sotterranee ha permesso la soluzione di molte problematiche inerenti la progettazione e la realizzazione delle cosiddette gallerie. Questo tipo di manufatto permette, come già spiegato, il superamento di molte barriere orografiche presenti nel territorio, in quanto consente di mantenere il tracciato con buone caratteristiche geometriche.

Se per realizzare una strada di valico senza l'impiego di una galleria (detta anche traforo o tunnel) sono necessarie opere onerose, come, ad esempio, curve a raggio ridottissimo ed elevate pendenze spesso insuperabili dal traffico pesante, la soluzione attraverso un'opera sotterranea permette di mantenere le quote di valico contenute ed un tracciato il più possibile rettilineo. Nel caso ferroviario poi, vista la necessità di un tracciato con caratteristiche geometriche molto rigorose e vincolanti, la soluzione in galleria risulta inevitabile.

Si può prendere in considerazione il tunnel di Laerdal, in Norvegia, come esempio per chiarire le disponibilità odierne a realizzare manufatti unici al mondo. Si tratta infatti di un traforo stradale situato nella parte occidentale della Norvegia, che con i suoi 24,51 km di lunghezza rappresenta la galleria stradale più lunga del mondo.

### **1.3 Le gallerie presenti in Italia**

L'Italia, a causa delle sue caratteristiche orografiche, è il Paese d'Europa con il maggior sviluppo chilometrico di gallerie, come si può notare anche dalla figura 1.6 (M. De Guglielmo, 2007).

Nazione	Tunnel ferroviari (km)	Tunnel stradali (km)	Metropolitane (km)	Totale (km)
Italia	1200	1160	60	2420
Francia	650	180	270	1100
Spagna	750	100	200	1050
Germania	380	70	550	1000
Norvegia	260	370	20	650
Svizzera	360	140	0	500
Gran Bretagna	220	30	200	450
Austria	105	210	15	330

Figura 1.6: gallerie in Europa.

Questo viene messo ancora di più in evidenza dall'istogramma rappresentato nella figura 1.7, il cui impatto visivo è maggiormente significativo.

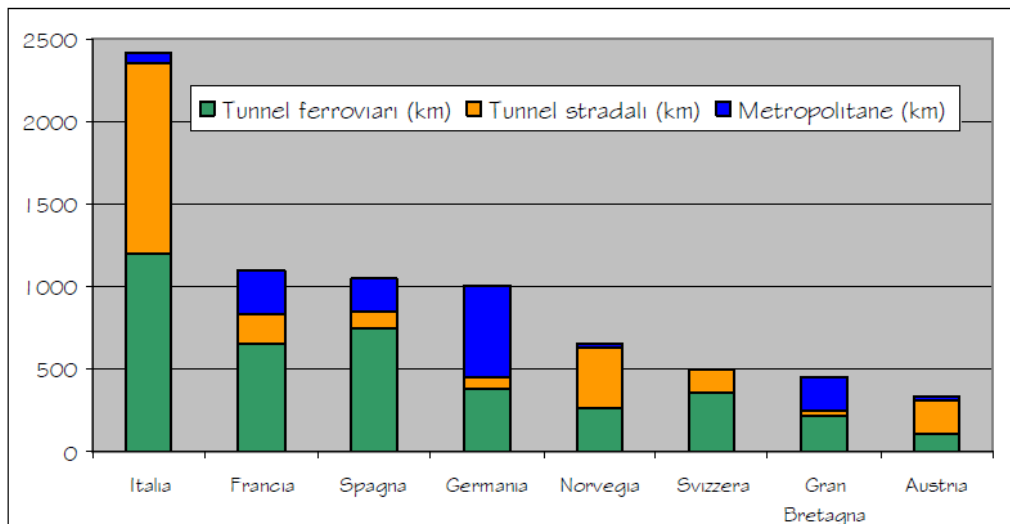


Figura 1.7: illustrazione dello sviluppo chilometrico delle gallerie in Europa.

Il fatto che i tunnel stradali si sviluppano per un'estensione di poco inferiore rispetto a quelli ferroviari, viene sottolineato anche dal diagramma illustrato dalla figura 1.8.

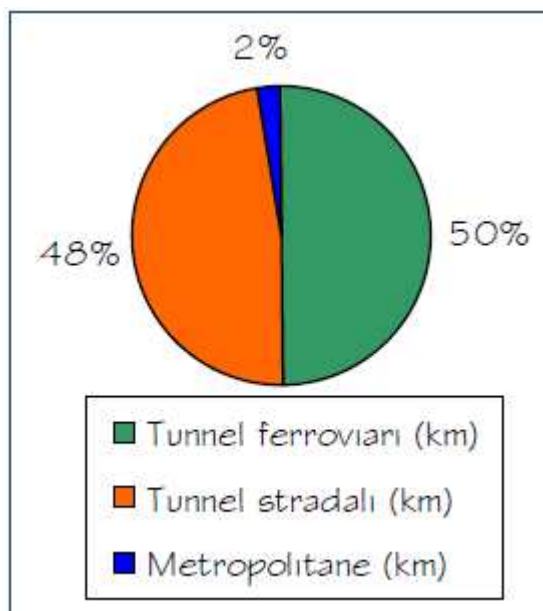


Figura 1.8: distribuzione percentuale delle gallerie in Italia.

Le gallerie stradali italiane, fatta eccezione per il traforo carrozzabile del Col di Tenda (1883), vedono la luce dopo la Prima Guerra mondiale, periodo che coincide con lo sviluppo delle automobili, la necessità di maggiori traffici commerciali con i Paesi confinanti e la mobilità all'interno del Paese stesso.

Mentre dopo la Seconda Guerra mondiale si apre la stagione dei grandi trafori alpini dal Gran S. Bernardo (1965) al Fréjus (1980). Oggi si contano centinaia di gallerie stradali di lunghezza superiore ad 1 km, e ben tre trafori di lunghezza superiore ai 10 km (il Fréjus di 12895 m, il Monte Bianco di 11611 m, entrambi tra Italia e Francia; il Gran Sasso d'Italia lungo 10176 m). Vi sono inoltre svariati progetti di tunnel con lunghezze anche di decine di chilometri e si prevede di far ricorso a percorsi sotterranei in aree urbane.

Grande importanza rivestono, infine, le gallerie stradali che fanno parte della cosiddetta Rete Transeuropea dei Trasporti, e l'Italia presenta il maggior numero di tunnel stradali appartenenti alla rete TEN-T: da sola ne detiene circa il 60% (R.Borchiellini, F.Colella, V.Verda, 2007), motivo per il quale la

progettazione della sicurezza nel nostro paese deve essere presa necessariamente in considerazione.

Come confermato dalla figura 1.9, oggi la situazione totale è di 717 gallerie esistenti, 57 in costruzione, 45 in fase di progetto, per un ammontare di 954 km esistenti, 264 km in progetto, 104 km in costruzione (S. Bonvicini, 2005).

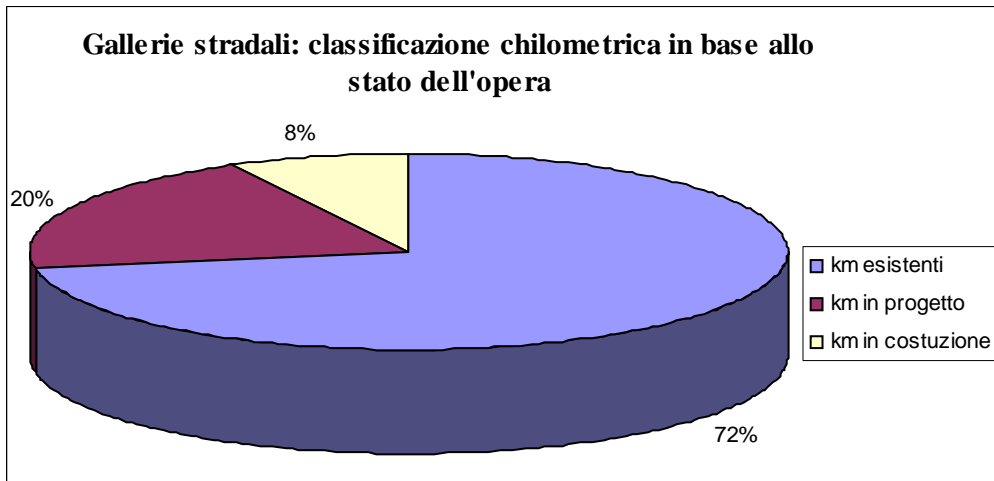


Figura 1.9: percentuale delle gallerie stradali in base allo stato di fatto.

Le gallerie stradali, di lunghezza superiore ai 1000 m, sono distribuite tra autostrade e strade statali per un'estensione totale di 487 km (figura 1.10).

	n°	Sviluppo [km]
<b>Autostrade</b>	186	358
<b>Strade statali</b>	75	129
<b>TOTALI</b>	261	487

Figura 1.10: gallerie di lunghezza superiore a 1000 m in Italia.

La figura 1.11 e la tabella 1.1 mostrano una suddivisione delle gallerie nelle varie regioni italiane. Come si può notare, alcuni valori della tabella non corrispondono, e questa discrepanza è imputabile al fatto che alcuni tunnel attraversano due regioni e quindi sono stati conteggiati in voci diverse.

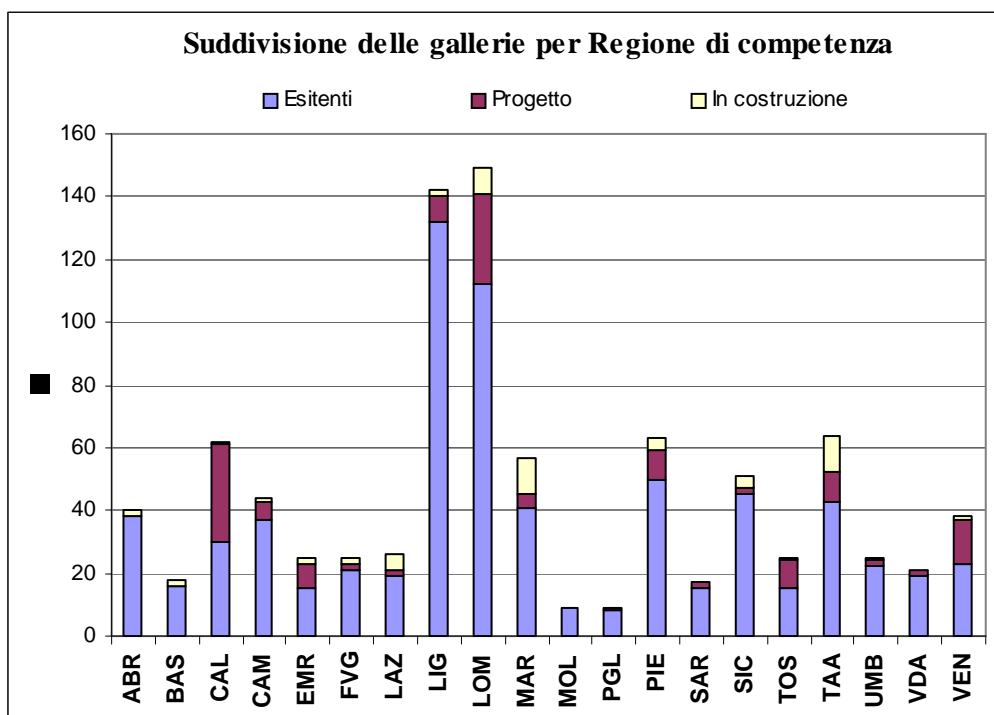


Figura 1.11: suddivisione delle gallerie per Regione di competenza.

Sigla	Regione	N°	Esistenti	In costruzione	Progetto	Tot future
CAL	Calabria	62	30	1	31	32
CAM	Campania	44	37	1	6	7
EMR	Emilia Romagna	24	15	2	8	10
FVG	Friuli Venezia Giulia	25	21	2	2	4
LAZ	Lazio	25	19	5	2	7
LIG	Liguria	142	132	2	8	10
LOM	Lombardia	149	112	8	29	37
MAR	Marche	56	41	12	4	16
MOL	Molise	8	9	0	0	0
PGL	Puglia	8	8	0	1	1
PIE	Piemonte	63	50	4	9	13
SAR	Sardegna	17	15	0	2	2
SIC	Sicilia	51	45	4	2	6
TOS	Toscana	26	15	1	9	10
TAA	Trentino Alto Adige	65	43	12	9	21
UMB	Umbria	25	22	1	2	3
VDA	Val d'Aosta	21	19	0	2	2
VEN	Veneto	38	23	1	14	15
	Di collegamento	13	10	0	2	2
Totale		919	720	60	142	202

Tabella 1.1: gallerie in Italia.

## 1.4 Caratteristiche delle gallerie stradali

Le gallerie stradali sono progettate in due diverse tipologie, a singola canna o doppia canna, a seconda della necessità, ovvero del volume di traffico che la galleria deve sopportare e di considerazioni economiche dovute alla geologia del terreno in cui avviene l'escavazione.

Solitamente i lavori di escavazione di rocce dure hanno fatto propendere, soprattutto in passato, per la scelta di galleria ad unico fornice con traffico bidirezionale. Tale scelta è stata spesso pagata con una minor sicurezza del tratto sotterraneo (quindi maggiore rischio di incidenti) e da una veloce saturazione del tratto interessato in termini di veicoli che possono viaggiare sul percorso in questione in un determinato intervallo di tempo.

Secondo la normativa vigente (D.Lsg. n 264 del 5/10/2006) la costruzione di gallerie a canna singola è giustificata solo se le previsioni indicano che il volume del traffico resterà moderato, inferiore alle 10000 unità/giorno per corsia (un'unità è rappresentata da un veicolo a motore, qualunque esso sia) nei successivi 15 anni. Per le gallerie a circolazione bidirezionale è obbligatoria la costruzione di gallerie di sicurezza speciali o la costruzione di brevi gallerie di fuga perpendicolari al tunnel e con sbocco all'esterno o di una galleria parallela di sicurezza con aperture di comunicazione a intervalli massimi di 500 metri per permettere agli utenti di mettersi in salvo, indicate con segnali luminosi almeno ogni 100 metri e con segnali stradali ogni 25 metri.

Nei paragrafi successivi si mettono in evidenza le caratteristiche delle gallerie a singola canna con traffico bidirezionale e quelle a doppia canna con traffico unidirezionale.

### **1.4.1 Gallerie stradali a canna singola**

Nelle gallerie stradali a singola canna il traffico è bidirezionale. Tale tipologia di galleria è la più semplice ed economica, e per questo la più diffusa nel mondo; ad esempio molti trafori alpini, quali il San Gottardo, il Gran San Bernardo ed il Monte Bianco, hanno questa struttura.

Le gallerie di tale tipologia sono generalmente costituite da due corsie, una per senso di marcia, con larghezza complessiva della sede stradale di 7-8 m. Ad entrambi i lati spesso sono presenti, oltre che appositi spazi per il drenaggio delle acque, dei marciapiedi per l'evacuazione in caso di incidente e per garantire l'accesso in galleria per opere di manutenzione. Sotto tali marciapiedi di solito sono posti i cavi per l'alimentazione degli apparati elettrici all'interno della galleria. Il marciapiede ha una larghezza variabile, da 0,5 a 1,5 metri. La larghezza del marciapiede ha influenza sulla frequenza degli incidenti, infatti in gallerie strette con marciapiedi esigui l'automobilista ha la tendenza di guidare al centro della carreggiata e questo comporta un aumento del rischio di collisione.

La sezione trasversale della galleria a singola canna e traffico bidirezionale in generale è circolare, o al più ellittica, con il piano stradale posto ad un'altezza di 1-2 m dal fondo dell'escavazione, ed il profilo è tale che la larghezza massima della galleria non si discosti molto da quella del piano stradale. Naturalmente, poiché il foro praticato nel terreno è circolare, l'altezza di tali gallerie è simile alla loro larghezza, e ciò comporta un'area trasversale molto ampia, dell'ordine di 45-50 m<sup>2</sup>.

In figura 1.12 è possibile vedere la rappresentazione della sezione trasversale di una galleria a singola canna; nello specifico si tratta della galleria del Gran San Bernardo.



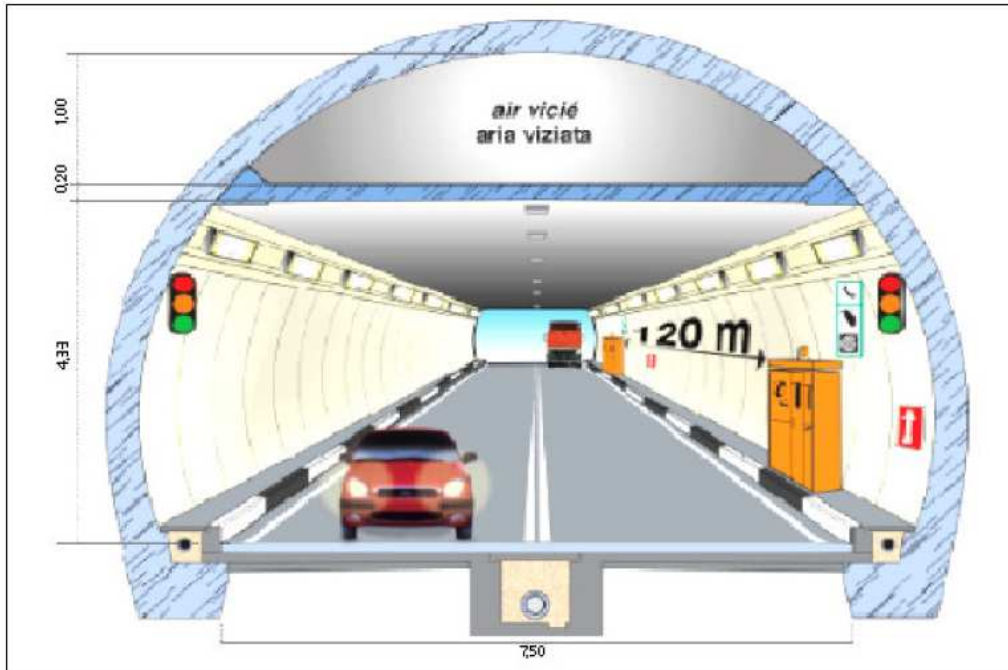


Figura 1.12: sezione del traforo del Gran San Bernardo.

Nelle gallerie più lunghe si trovano anche delle aree laterali per la sosta di emergenza dei veicoli che secondo l'attuale normativa (D.Lsg. n 264 del 5/10/2006) devono essere poste ad un intervallo massimo di 1000 metri. Attualmente, a seconda della lunghezza della galleria l'intervallo tra queste piazzole di sosta varia da 250 metri fino a 1000 metri. In alcuni casi è presente una galleria di soccorso per l'evacuazione rapida del tunnel, senza avere la necessità di raggiungere i portali, e per il rapido raggiungimento dell'interno della galleria anche in presenza di congestione del traffico.

Solitamente tali tunnel di servizio permettono il passaggio di veicoli di soccorso di dimensioni ridotte, avendo solitamente diametro di circa 2 metri.

## 1.4.2 Gallerie stradali a canna doppia

Le gallerie a doppia canna sono caratterizzate da traffico unidirezionale in ogni fornice. Esse richiedono un investimento economico molto superiore rispetto al caso di tunnel ad unico foro, ma sono molto più sicure. Da studi svizzeri risulta che nelle gallerie a doppia canna si abbassa di circa il 50% sia il numero di incidenti che quello delle vittime rispetto ai tunnel ad unico fornice. La loro costruzione diventa oggi molto importante, da un lato per la sempre crescente attenzione riposta nella sicurezza nei trasporti, dall'altro per la necessità di strade con capacità maggiori rispetto al passato, visto che si sta andando verso la saturazione dell'attuale sistema viario, soprattutto nella zona alpina.

Le caratteristiche costruttive di ogni canna sono molto simili, per quel che riguarda geometria e forma, a quelle di una galleria ad unico fornice e traffico bidirezionale, mentre il sistema di drenaggio ed i marciapiedi in questo caso sono posti su un solo lato della carreggiata, a destra rispetto al senso di marcia dei veicoli. Altro fattore di differenza rispetto alla galleria ad unica canna è da ritrovarsi nelle vie di fuga presenti; in gallerie a doppio fornice, con l'introduzione di collegamenti tra i due tunnel, si aggiunge un'importante via di fuga ad ogni canna. Tali vie di collegamento devono trovarsi con intervallo massimo di 500 m, secondo le disposizione di legge (D.Lsg. n 264 del 5/10/2006). Esse possono essere attrezzate con accessori per accrescere la sicurezza in caso di incidente, come porte tagliafuoco, anche questo accade in rari casi poiché si preferisce lasciare libero il passaggio tra i due fornici. Studi recenti dimostrano anche che tali vie di comunicazione devono essere tenute in considerazione nella previsione degli effetti di un incidente; in assenza di porte infatti i fumi prodotti da un incendio sviluppatosi in una delle due canne potrebbero passare anche nell'altra canna.

## 1.5 Incidenti che si sono verificati in galleria

Le analisi degli incidenti, sviluppate con sempre maggior interesse negli ultimi anni, hanno dimostrato che l'evento incidentale è conseguenza, in genere, del malfunzionamento di uno o più degli elementi del sistema trasporto stradale e delle loro reciproche iterazioni (figura 1.13).

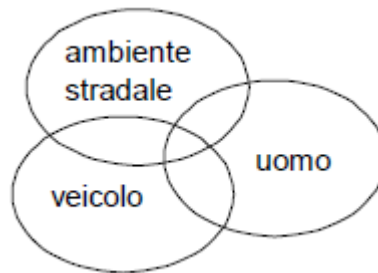


Figura 1.13: componenti del sistema stradale.

Dal punto di vista della frequenza, gli incidenti in galleria si concentrano nelle aree di transizione agli imbocchi, molto più rispetto alla parte centrale del tunnel. Dal punto di vista della severità delle conseguenze e quindi di quello che comunemente può intendersi come pericolosità, invece, accade il contrario. La figura 1.14 mette in evidenza i vari livelli di pericolosità a seconda della zona che si prende in considerazione.

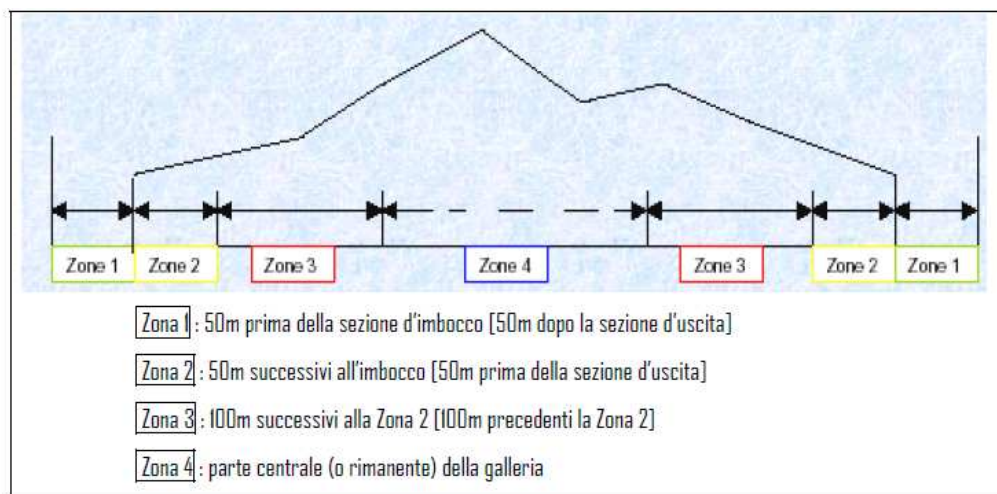


Figura 1.14: suddivisione longitudinale della galleria per livelli di pericolosità.

Il più temuto tra gli incidenti, per l'entità degli effetti e delle conseguenze, è l'incendio: i fumi ed i gas tossici, sviluppati ad alte temperature (in particolare il monossido di carbonio), mantengono pericolosi livelli di concentrazione anche ad elevata distanza, creando difficoltà non solo alle persone già presenti all'interno della galleria ma anche ai sopravvenienti soccorsi. Durante un incendio e dopo il suo spegnimento anche l'ambiente circostante la galleria è sottoposto a pericolo per l'alterazione delle caratteristiche delle acque superficiali, raccolte dai sistemi di drenaggio, nonché delle acque superficiali o sotterranee nelle strette vicinanze della strada. Questo ancor più nei casi d'incendio di sostanze esplosive, tossiche, infiammabili ed inquinanti in genere.

L'incendio è, però, raramente la conseguenza di un classico incidente avvenuto per collisione tra due veicoli o per sbandamento di un veicolo con successivo urto contro la parete; è molto più frequentemente, infatti, la conseguenza di un guasto meccanico e/o elettrico del veicolo.

Perciò, è necessario prendere in considerazione il trasporto di merci pericolose su strada. Infatti:

- diversi studi hanno dimostrato che gli incidenti che si verificano durante il trasporto di merci pericolose hanno un potenziale di danno analogo a quello che si verifica nelle installazioni fisse che effettuano stoccaggio e lavorazioni delle stesse sostanze;
- il volume di merci pericolose trasportate è significativo: secondo i dati della Commissione Europea nel 2006 il volume totale delle merci pericolose trasportato in Europa è pari a circa 110 miliardi di t/km anno e le merci pericolose rappresentano circa l'8% dell'intero volume delle merci trasportate;
- nonostante gli incidenti stradali coinvolgenti merci pericolose siano rari, l'opinione pubblica percepisce l'attività di trasporto di merci pericolose come estremamente rischiosa, e avverte fortemente la necessità di ridurre i rischi connessi a tale attività.

La figura 1.15 mostra che in ambito internazionale la casistica di incidenti in galleria è molto ampia e tende ad infittirsi negli ultimi anni, soprattutto a causa (R.Borchiellini, F.Colella, V.Verda, 2007):

- dell'aumento del numero e della lunghezza delle gallerie;
- dell'incremento vertiginoso del traffico;
- delle caratteristiche chimico-fisiche e merceologiche dei carichi trasportati e dei materiali con i quali vengono realizzati i vari mezzi di trasporto.

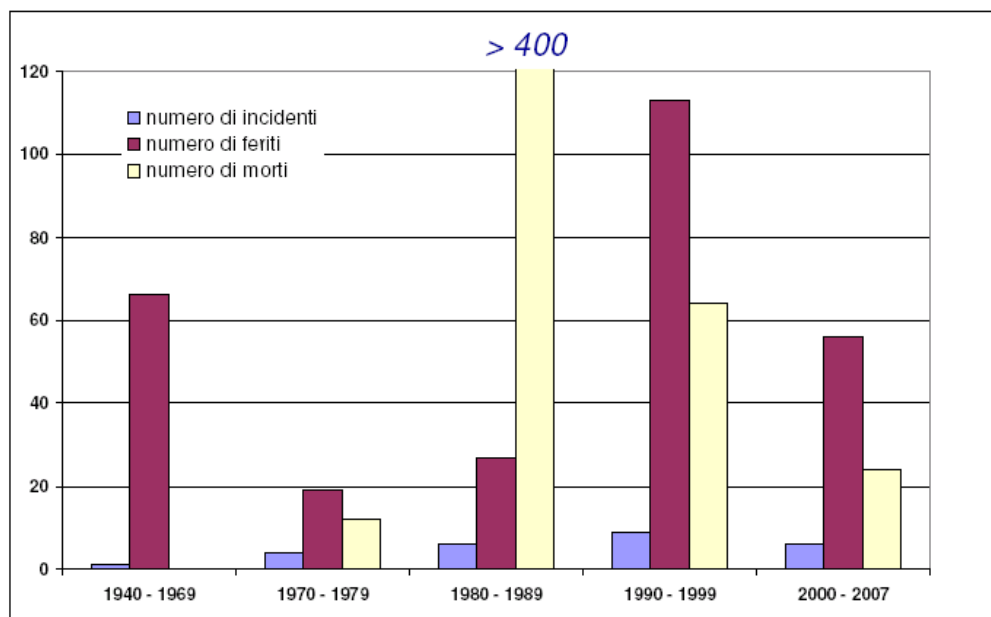


Figura 1.15: casistica internazionale di incidenti in galleria.

Scrutando i dati statistici, riportati nella tabella 1.2, relativi agli incidenti più gravi degli ultimi anni avvenuti nelle gallerie stradali di tutto il mondo dal 1949 al 2004, è doveroso sottolineare che ben 6, su un totale di 33, riguardano l'Italia (S. Bonvicini, 2005).

<b>Anno</b>	<b>Galleria</b>	<b>Paese</b>	<b>Causa</b>	<b>Danni (morti, feriti)</b>
1949	Holland	USA	Caduta Carico	66 f
1965	Blue Montain	USA	Guasto Motore	
1969	Moorfleet	Amburgo	Guasto Freni	Strutture
1974	Chesapeak Bay	USA	Guasto Freni	1 f
1975	Guardarrama	Guardarrama	Sconosciuta	Strutture
1976	Portale d'Italie	Francia	Guasto Motore	
1978	Velsen	Olanda	Collisione	5 m, 5 f
1979	Nihonzaka	Giappone	Collisione	7 m, 5 f
1980	Sakai	Giappone	Collisione	1 m
1982	Salang	Afganistan	Collisione	2000 m, 5 f
1982	Caldecott	USA	Collisione	7 m, 2 f
1983	Pecrile	Italia	Collisione	8 m, 22 f
1986	L'armè	Francia	Collisione	3 m, 5 f
1987	Gumefens	Svizzera	Collisione	2 m, 3 f
1993	Serra Ripoli	Italia	Collisione	4 m, 4 f
1993	Isola Delle Femmine	Italia	Collisione	5 m, 20 f
1993	Hovden	Norvegia	Collisione	5 f
1993	Fréjus	Francia	Guasto	
1994	Hugounot	Sud Africa	Rottura Cambio bus	31 m, 28 f
1995	Pfaender	Germania	Collisione	53 m, 4 f
1997	Prapontin	Susa, Italia	Surriscaldamento Freni	5 f
1999	M.Bianco	Italia	Perdita	39 m
1999	Tauren Tunnel	Austria	Collisione	12 m
2000	Oslofjord Tunnel	Norvegia	N.D	
2000	Tauren Tunnel	Austria	Fuoco Da Mezzo Pesante	
2000	Seljestad	Norvegia	Collisione	20 f
2001	Gleinalm	Gratz, Austria	N.D	N.D
2001	San Gottardo	Svizzera	Collisione	11 m
2001	Guldborgsund	Danimarca	Collisione	5 m, 9 f
2001	Tauren Tunnel	Austria	Collisione	
2002	Lytle Tunnel	USA	Collisione	
2003	Vicenza	Italia	Ribaltamento	6 m, 50 f
2004	Baregg	Svizzera	Collisione	1 m

Tabella 1.2: casistica incidenti in galleria.

## **1.5.1 Indagine realizzata sui dati storici**

Una precisa analisi effettuata sui dati statistici relativi agli incidenti stradali avvenuti in galleria conduce ad importanti considerazioni (S. Bonvicini, 2005). I valori raccolti, infatti, possono essere classificati su scala temporale, cioè in base all'anno in cui si sono verificati, e su scala geografica, ovvero in base al luogo di accadimento ed infine è possibile realizzare una classificazione tenendo in considerazione le cause che hanno generato l'incidente.

### **1.5.1.1 Classificazione su scala temporale**

Gli incidenti raccolti coprono un arco temporale che va all'incirca dalla fine della Seconda Guerra Mondiale fino ai giorni nostri. Il periodo considerato è, evidentemente, abbastanza esteso e non si sono verificati incidenti in ogni anno. Pertanto, per avere una minore dispersione dei dati essi sono stati aggregati in bienni iniziando dal '44-45, con l'eccezione degli ultimi dati, in cui l'aggregazione è stata eseguita su un lasso di tempo di tre anni (2002-2003-2004).

La tabella 1.3 riporta questa classificazione.

<b>Anno</b>	<b>Incidenti</b>	<b>Morti</b>	<b>Feriti</b>
44-45	1	608	60
46-47	0	0	0
48-49	1	0	66
50-51	0	0	0
52-53	0	0	0
54-55	0	0	0
56-57	0	0	0
58-59	0	0	0
60-61	0	0	0
62-63	0	0	0
64-65	1	0	0
66-67	0	0	0
68-69	1	0	0
70-71	0	36	0
72-73	1	30	0
74-75	2	43	75
76-77	1	1	0
78-79	2	12	8
80-81	2	11	5
82-83	3	2016	22
84-85	0	0	0
86-87	2	5	5
88-89	1	71	51
90-91	0	0	100
92-93	4	9	29
94-95	2	4	28
96-97	0	0	13
98-99	2	55	9
00-01	6	16	29
02-04	3	7	50
<b>TOTALE</b>	<b>34</b>	<b>2924</b>	<b>550</b>

Tabella 1.3: classificazione temporale degli incidenti nelle gallerie stradali.

La figura 1.16 rappresenta, graficamente, i valori che sono riportati nella tabella sopra.



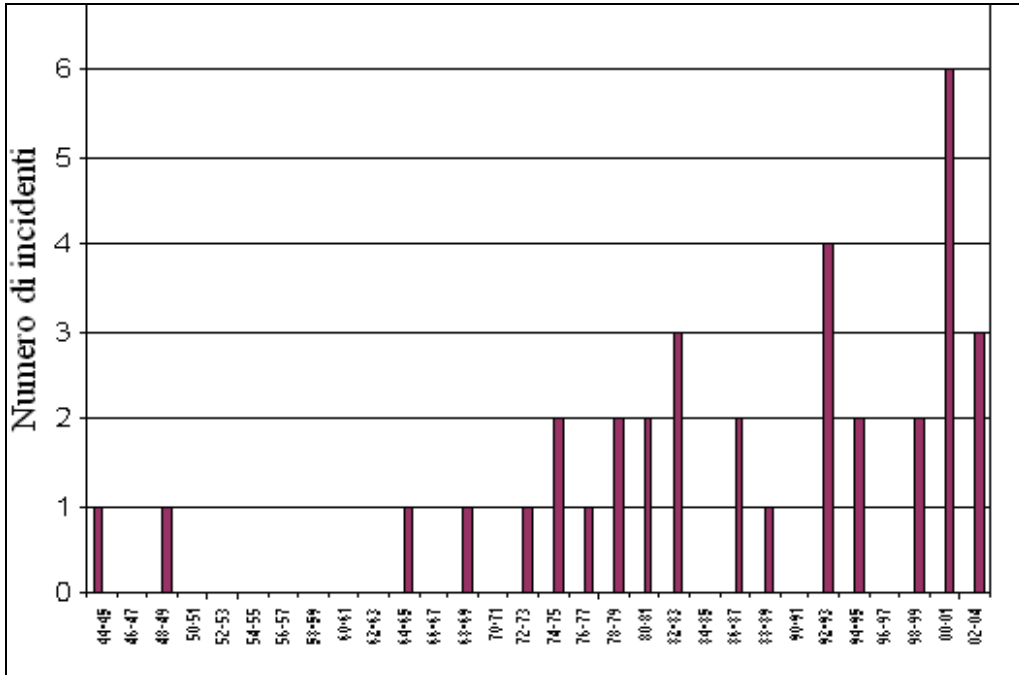


Figura 1.16: classificazione temporale del numero di incidenti nelle gallerie stradali.

Da questi grafici emerge come il progresso tecnico che si è avuto con la fabbricazione di autoveicoli sempre più veloci e di maggiori dimensioni, sia andato ad incidere sul numero di incidenti in galleria con un aumento di questi nel tempo. Altro fattore da tenere in debita considerazione è il livello di traffico, aumentato notevolmente dagli anni '40 ad oggi.

Per quanto riguarda il numero di morti, invece, tale dato è di difficile interpretazione, poiché viene influenzato pesantemente da tragedie di proporzioni immani, come ad esempio quella afgana (2000 morti e un numero imprecisato di feriti nell'incidente di un convoglio militare sovietico che trasportava carburanti, nella galleria Salang, il 3 novembre 1982).

Si può evidenziare, invece, che il numero di feriti è piuttosto basso. Questo è dato dal fatto che un incidente in galleria lascia poche possibilità di sopravvivenza, visti gli impedimenti nel raggiungere posti sicuri e la difficoltà di soccorso dei feriti.

### 1.5.1.2 Classificazione su scala geografica

I valori raccolti, in base al paese in cui si sono verificati gli incidenti stradali in galleria, vengono riportati nella tabella 1.4 qui di seguito (S. Bonvicini, 2005):

Paese	Numero incidenti	Morti	Feriti
<b>Italia</b>	6	584	168
<b>Francia</b>	4	102	45
<b>Germania</b>	2	3	0
<b>Gran Bretagna</b>	0	43	182
<b>Spagna</b>	1	96	0
<b>Svizzera</b>	3	14	0
<b>Austria</b>	3	12	0
<b>Norvegia</b>	3	12	24
<b>Olanda</b>	1	5	5
<b>Danimarca</b>	1	5	9
<b>USA</b>	5	7	69
<b>Giappone</b>	3	43	8
<b>Sud Africa</b>	1	1	28
<b>Bosnia</b>	0	34	N.D
<b>Afganistan</b>	1	2000	N.D

Tabella 1.4: classificazione in base al paese di accadimento degli incidenti.

Analogamente alla classificazione precedente, i dati elencati nella tabella possono essere graficati ottenendo così la figura 1.17.

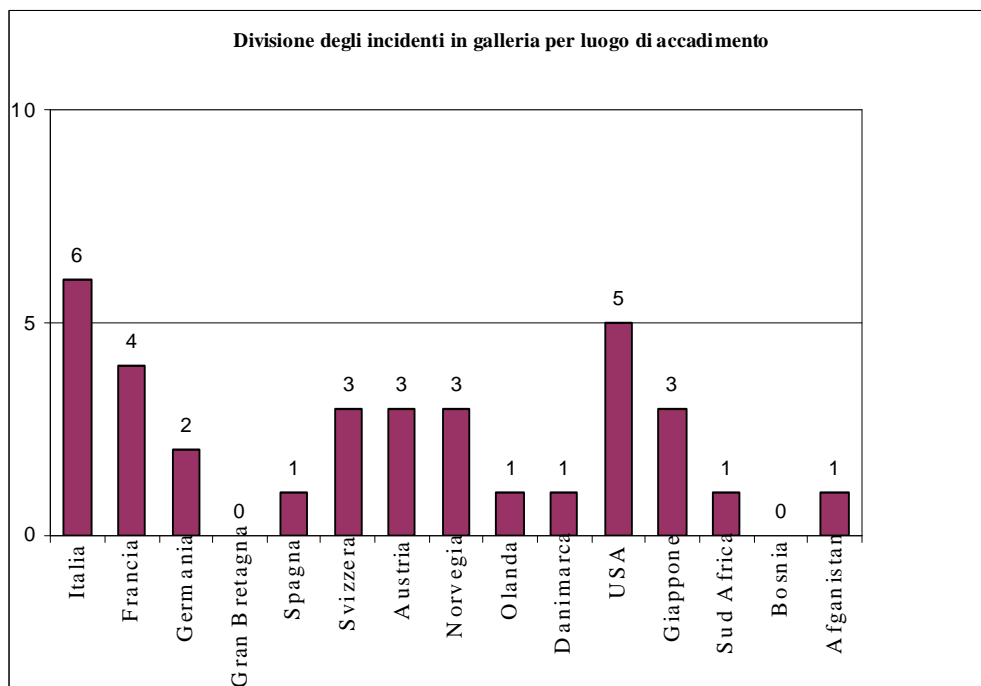


Figura 1.17: divisione degli incidenti in galleria stradale in base al paese di accadimento.

Dai valori raccolti è possibile evincere che in Europa, così come in Giappone, ogni incidente crea un rilevante numero di vittime, anche se non si hanno rapporti vittime/incidente elevati come quelli di Paesi meno sviluppati, dove le misure di sicurezza sono spesso al di sotto della soglia minima. Questo porta a dire che, se è pur vero che il progredire della tecnica abbia creato delle difficoltà, aumentando il numero di incidenti nel tempo, essa ha permesso anche un'evoluzione del livello di sicurezza soprattutto nei Paesi maggiormente sviluppati.

Da considerare infine l'anomalia statunitense, presumibilmente dovuta al fatto che in questo Paese, sfruttando gli immensi spazi a disposizione, si possano far correre strade in luoghi poco densamente abitati, non solo, ma il fatto che queste abbiano volumi di traffico scarso fa sì che gli incidenti in galleria, oltre agli occupanti del veicolo, non coinvolgano molte altre persone.

### **1.5.1.3 Classificazione in base alle cause che provocano gli incidenti in galleria**

Questo tipo di analisi permette di comprendere quali siano i principali fenomeni che danno origine agli incidenti in galleria.

Sono state prese in considerazione le seguenti cause:

- guasto meccanico: si intende il guasto a parti meccaniche del motore o del veicolo più in generale, quali freni e cambio;
- foratura dei pneumatici o loro scoppio;
- perdita del carico o di parte di esso;
- mancanza di carburante, con conseguente fermata in galleria e collisione da parte dei veicoli che sorraggiungono;
- urto fra veicoli o urto con la struttura della galleria (marciapiedi, pareti, ecc.);
- ribaltamento del mezzo;
- incendio per perdita di carburante, con riferimento al carburante contenuto nel serbatoio del mezzo e non all'eventuale carico del mezzo stesso;

Il “ribaltamento” dell'automezzo non viene analizzato in dettaglio, per cui non è possibile sapere la causa di tale evento, ad esempio alta velocità, urto o spostamento improvviso del carico.

I risultati di questa classificazione sono elencati nella tabella 1.5.

Causa di incidenti in galleria stradale	Numero	Probabilità %
Guasto meccanico	6	18
Foratura di pneumatici	2	6
Perdita del carico	1	3
Mancanza di carburante	0	0
Urto fra veicoli o con la struttura della galleria	20	58
Ribaltamento	1	3
Incendio per perdita di carburante	1	3
Altro	1	3
N.D.	2	6
<b>Totale</b>	<b>34</b>	<b>100</b>

Tabella 1.5: classificazione in base alla causa dell'incidente.

Il termine “altro” indica che le cause che hanno provocato tali incidenti non sono comprese tra quelle elencate sopra. Mentre il termine “N.D.” suggerisce che non ci sono informazioni disponibili relative a quegli eventi.

I dati vengono graficati in figura 1.18 con la relativa probabilità storica di accadimento.

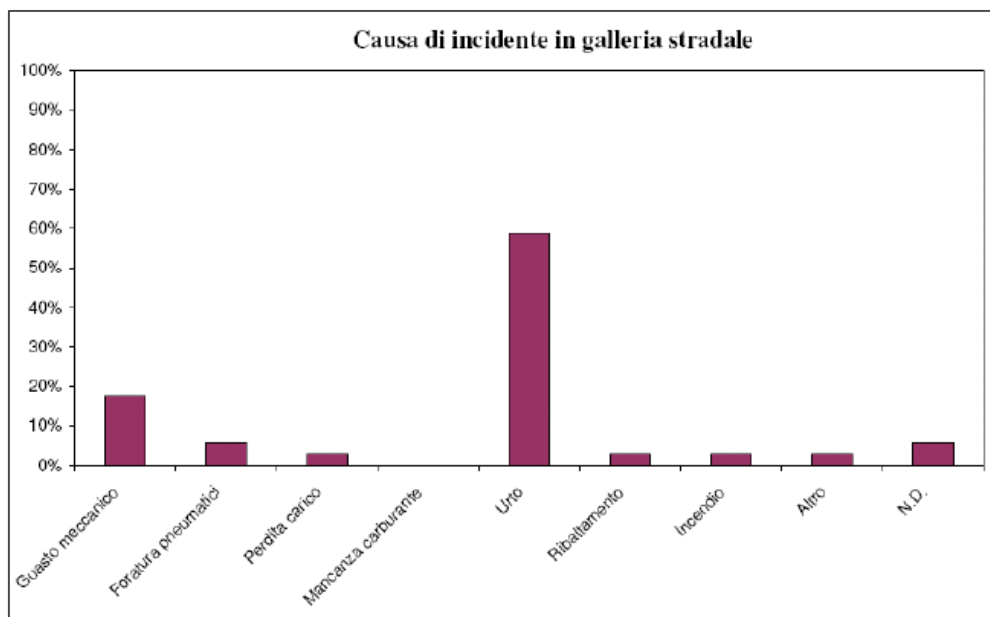


Figura 1.18: classificazione in base alla causa dell'incidente.

Si può notare come la maggior parte degli incidenti sia dovuta a collisioni, di cui non si specifica la natura, ovvero se esse siano avvenute tra due autoveicoli o tra autoveicolo ed una struttura fissa della galleria. Tale evento ricopre circa due terzi del campione in esame.

Tali dati possono essere confrontati con altre ricerche effettuate sullo stesso argomento.

Anche il World Road Congress dell'AIPCR, congresso annuale organizzato fin dal 1908 con lo scopo di condividere le tecniche e le esperienze maturate nel campo delle infrastrutture e dei trasporti stradali, ha condotto uno studio relativo alle cause di incidente all'interno di gallerie stradali, analizzando nello specifico il caso di incendio.

Gli incidenti sono stati classificati in base all'evento iniziatore e sono state adottate le stesse cause descritte in precedenza; i risultati sono riassunti nella tabella 1.6.

<b>Causa della fermata</b>	<b>Numero</b>	<b>Probabilità %</b>
Guasto meccanico	8	58
Foratura di pneumatici	0	0
Perdita del carico	1	7
Mancanza di carburante	1	7
Urto fra veicoli o con la struttura della galleria	1	7
Ribaltamento	0	0
Incendio per perdita di carburante	1	7
Altro	2	14
N.D.	0	0
<b>Totale</b>	<b>14</b>	<b>100</b>

Tabella 1.6: causa di fermata in galleria, che ha provocato incendi, secondo uno studio del World Road Congress.

Anche il PIARC si è occupato di analizzare le cause di incidente in galleria. Il PIARC (acronimo di Permanent International Association of Road Congresses) o World Road Association, è un organismo che riunisce 109 Paesi, per l'interscambio di conoscenze ed informazioni sulla strada e sulla politica del trasporto stradale all'interno di un sistema di viabilità sostenibile.

In un suo studio ha analizzato 22 casi di incendio in tunnel avvenuti nella zone OECD ed in Sudafrica. I dati di tale studio sono riportati in tabella 1.7, per la quale è stata ancora adottata la classificazione sopra esposta. In 8 casi la causa dell'incendio è da ricondursi a problemi relativi il veicolo, cioè al guasto del motore in 4 casi e al guasto del cambio in 2 casi (riuniti sotto la voce “guasto meccanico”) e alla rottura degli pneumatici in 2 casi.

<b>Causa dell'incidente</b>	<b>Numero</b>	<b>Probabilità %</b>
Guasto meccanico	6	27
Foratura di pneumatici	2	9
Perdita del carico	1	5
Mancanza di carburante	0	0
Urto fra veicoli o con la struttura della galleria	13	59
Ribaltamento	0	0
Incendio per perdita di carburante	0	0
Altro	0	0
N.D.	0	0
<b>Totale</b>	<b>22</b>	<b>100</b>

Tabella 1.7: motivo di incidente, con sviluppo di incendio, in galleria secondo uno studio PIARC.

Data l'esiguità del campione non è possibile considerare questi dati come statisticamente significativi, ma queste informazioni fanno riflettere.

In figura 1.19 vengono riportati graficamente i dati storici raccolti in questo lavoro ed i due studi sopra citati, ovvero quello presentato al World Road Congress nel 1987 e lo studio del PIARC. Dal confronto sui vari studi sviluppati si nota come la raccolta di dati PIARC e quella di dati storici siano piuttosto simili, mentre i dati del World Road Congress si discostano di molto dai primi due. Questo può essere spiegato dall'esiguità del campione di quest'ultima analisi, che prende in considerazione solo 14 casi.

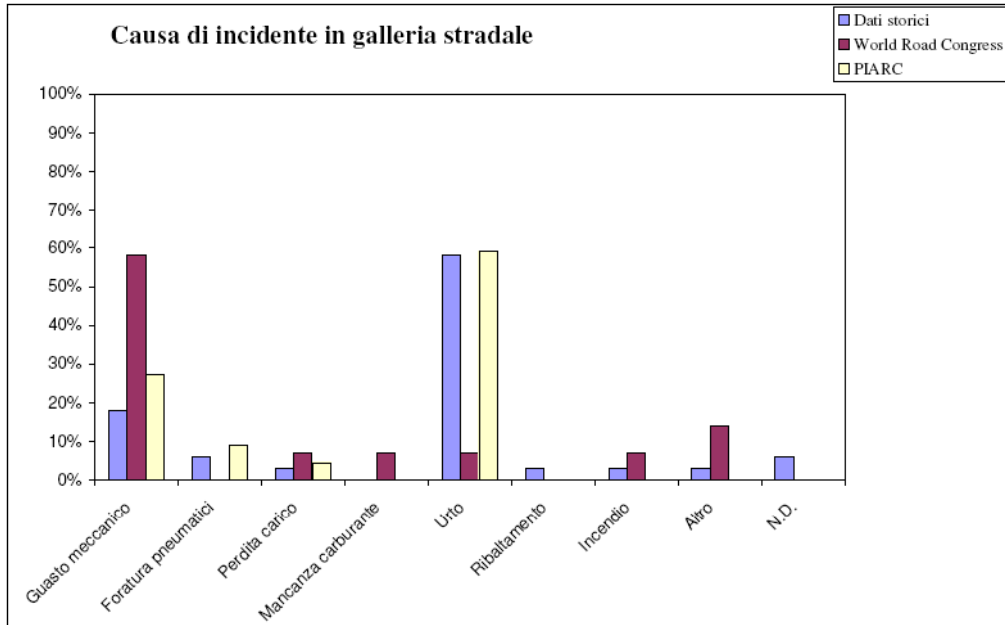


Figura 1.19: confronto, tra i vari studi, delle cause di incidente in galleria.

Per concludere, è importante mettere in evidenza che per gli incidenti stradali avvenuti in galleria, che coinvolgono mezzi pesanti, è possibile affermare che la prima causa di essi è l'urto tra veicoli o contro le strutture fisse (marciapiedi, pareti o strutture fisse presenti all'interno della galleria), ma fondamentale risulta anche la probabilità data da guasti dell'automezzo, sia delle parti meccaniche che dei pneumatici. Si fa notare infine come il carico trasportato incida poco sul tasso di incidenti in galleria e molto sulle conseguenze che tale incidente può avere.

Un fattore molto importante per la sicurezza risulta l'età del veicolo, che ne determina, in maniera pesante, la frequenza di guasto. Nella figura 1.20 è possibile vedere come vi siano dei parchi di automezzi di età molto avanzata in alcuni Paesi europei, ad esempio in Spagna, e come questo problema sia molto marcato per i Paesi divenuti più di recente Stati Membri dell'Unione Europea.



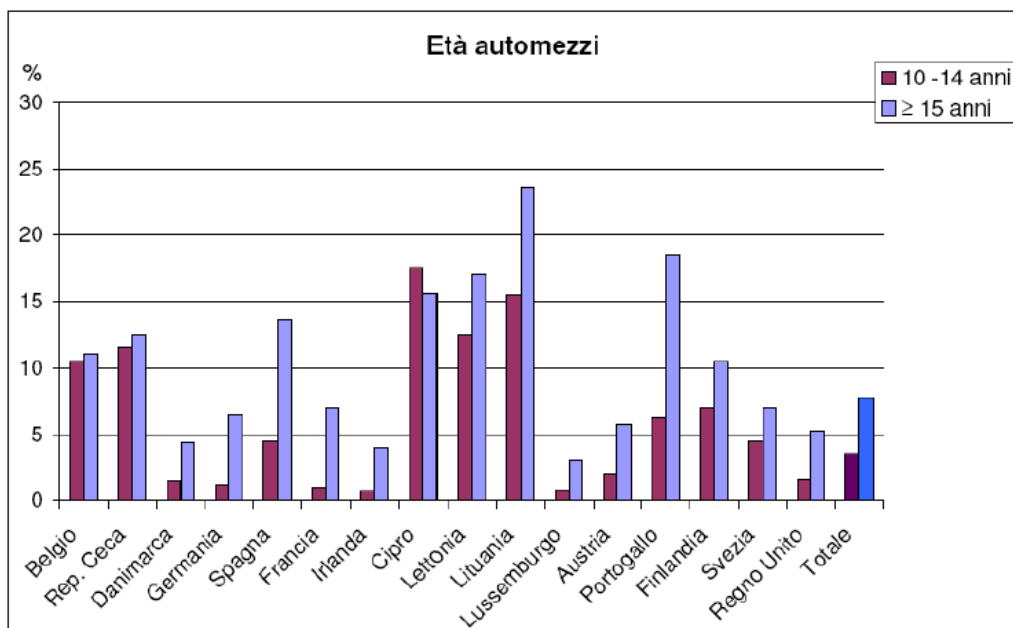


Figura 1.20: età degli automezzi nei Paesi dell'Unione Europea.

## 1.6 Alcuni incidenti gravi avvenuti in galleria

### 1.6.1 Incidente nella galleria del Monte Bianco

Negli ultimi anni uno degli incidenti in galleria più costosi in termini di perdite di vite umane e danno economico, è stato l'incidente del tunnel del Monte Bianco, fra Italia e Francia, avvenuto il 24 marzo 1999.

La galleria del Monte Bianco, a singola canna con due sensi di marcia, lunga 11611 metri e larga 8,6 metri, di cui 7 di carreggiata, è stata inaugurata nel 1965. Nel corso degli anni i piani di ammodernamento hanno previsto l'installazione di sistemi di videosorveglianza e la creazione di 18 rifugi antincendio pressurizzati posti ogni 600 metri. La ventilazione è di tipo semitrasversale.

Il disastro del marzo 1999 è stato causato dall'incendio del motore di un mezzo pesante che stava trasportando farina e margarina. L'autista si è fermato all'interno del tunnel e ha tentato di spegnere le fiamme, ma esse sono aumentate e si sono estese al carico (in figura 1.21 si possono vedere i resti dell'autocarro).



Figura 1.21: i resti dell'autocarro da cui ha avuto origine l'incendio.

Il sistema di ventilazione della galleria ha portato i fumi di combustione all'ingresso francese del tunnel, dove si è formata una densa nube di fumo e gas incombusti. Il servizio di emergenza, non avendo informazioni sull'estensione dell'incendio e sul numero di veicoli coinvolti, non è intervenuto repentinamente. I rifugi per le persone all'interno della galleria non hanno resistito al calore e, a causa dell'assenza di un sistema di segnalazione, i veicoli hanno continuato ad entrare nel tunnel anche dopo lo scoppio dell'incendio. Il rogo ha avuto una durata di 53 ore, raggiungendo temperature di oltre 1000 °C, che hanno causato lo scioglimento dell'asfalto ed il collasso delle strutture in cemento.

In tutto sono perite 39 persone, la maggior parte per asfissia, e non risultano feriti; i danni economici diretti sono stati stimati in 200 milioni di euro. Il tunnel non ha riaperto al traffico se non dopo il marzo 2002.

## 1.6.2 Incidente nel traforo del Tauerntunnel

Il 29 maggio 1999, due mesi dopo l'incidente del Monte Bianco, nel tunnel autostradale che attraversa la catena degli Alti Tauri, in Austria, è avvenuto un altro grave incidente. Il Tauerntunnel è una galleria lunga 6400 metri, ad unica canna e doppio senso di marcia, con sistema di ventilazione di tipo trasversale, aperto al traffico nel 1975.

Un incidente accorso il giorno precedente, 28 maggio 1999, aveva reso necessaria l'istallazione di un semaforo mobile all'interno della galleria, per la regolazione del traffico che avveniva a sensi di marcia alternati. La fila di veicoli fermi al semaforo rosso, tra i quali era presente anche un autocarro carico di bombolette di vernice spray, è stata investita da un autocarro che sopraggiungeva, a causa di un colpo di sonno dell'autista dello stesso. Di conseguenza 24 veicoli hanno preso fuoco. La figura 1.22 inquadra i resti di alcuni autoveicoli dopo l'incendio.



Figura 1.22: scenario tragico presente dopo l'incendio.

Il fumo sviluppatosi è migrato inizialmente verso il soffitto, permettendo alle persone di uscire dal tunnel, ma alcune esplosioni successive, a carico delle

bombolette spray, hanno generato molto calore e fumo, tale da rendere impossibile trovare una via di fuga. A causa del tamponamento 8 persone sono morte, e altre 4 sono perite nell'incendio a seguito dell'incidente, mentre non sono riportati feriti.

### **1.6.3 Incidente nella galleria del San Gottardo**

Due anni dopo i casi della galleria del Monte Bianco e del Tauerntunnel, il 24 Ottobre 2001, un incidente ancor più grave è accaduto nel tunnel del San Gottardo, in Svizzera, uno dei più lunghi al mondo, con un'altissima concentrazione di traffico (21000 veicoli/giorno nel 1999).

La galleria del San Gottardo è stata aperta al traffico nel 1980. Costituita da un'unica canna a traffico bidirezionale, lunga 16918 metri, con carreggiate di ampiezza pari a 7,8 metri e sede stradale di 9,2 metri. Presenta un impianto di ventilazione di tipo trasversale, un impianto di video-sorveglianza, un tunnel di servizio che corre parallelo alla galleria e rifugi antincendio posti ogni 250 metri. Sono inoltre presenti semafori, ogni 250 metri, per il blocco del traffico in caso di emergenza.

L'incidente del 2001 è stato causato dalla collisione fra due camion, uno dei quali stava trasportando pneumatici e teli cerati che rapidamente hanno preso fuoco. La figura 1.23 mostra l'incendio che si è sviluppato in seguito alla collisione.



Figura 1.23: incendio del 24 ottobre 2001 nella galleria autostradale del San Gottardo.

I vigili del fuoco non sono stati in grado di entrare nel tunnel a causa del forte calore sviluppato e dello spesso fumo presente. Comunque, un'efficiente sistema di emergenza ha limitato le vittime. La presenza di un tunnel di servizio ha salvato molte persone, le barriere semaforiche di emergenza hanno fermato i veicoli in entrata nel tunnel, il sistema di ventilazione è passato allo stato di emergenza e le squadre di soccorso sono state allertate prontamente. Nonostante questo, 11 persone hanno perso la vita, la maggior parte per asfissia. La stima dei costi per la riparazione della galleria e la liquidazione da parte delle compagnie di assicurazione dei veicoli è ammontata a circa 12 milioni di euro.

## Capitolo 2

# Analisi di rischio di una galleria stradale: la normativa di riferimento

### 2.1 Introduzione

La criticità delle gallerie stradali dal punto di vista della sicurezza dei trasporti è stata avvertita anche dagli organi preposti all'emanazione di linee guida, norme e leggi.

Le normative nazionali su tali infrastrutture stradali, sviluppatasi solo in tempi recenti ed in seguito ai gravissimi incidenti avvenuti nei trafori alpini, costituiscono uno strumento di riferimento utile ed in continuo aggiornamento, come si può sinteticamente rilevare dall'elenco che segue, esplicativo anche delle finalità principali.

Pertanto, nel presente capitolo si intende esporre, a grandi linee, quanto è stato predisposto in ambito normativo relativamente alla sicurezza nel trasporto in galleria.

### 2.2 Circolare Ministeriale n.7938 del 06/12/1999

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

Questa circolare è stata emessa in seguito al gravissimo incidente che si è verificato all'interno della galleria del Monte Bianco. Tale evento ha evidenziato la necessità di impartire disposizioni più precise in relazione alla sicurezza della circolazione dei veicoli all'interno delle gallerie stradali, con particolare riferimento ai mezzi che trasportano materiali pericolosi, come definiti dall'articolo 168 del decreto legislativo 30 aprile 1992, numero 285 e successive modificazioni.

Le direttive indicate vengono impartite nella costruzione e nell'adeguamento dei tunnel stradali, e dei relativi impianti di sicurezza, sia per dare una tempestiva risposta alle esigenze di sicurezza evidenziate dai recenti incidenti, sia per avviare una fase conoscitiva sugli effettivi livelli di rischio delle gallerie inserite lungo la rete stradale italiana.

A tal fine occorre, in via preliminare, procedere ad una descrizione tecnica delle caratteristiche geometriche di ogni galleria inserita nella rete di competenza di ciascun ente proprietario o concessionario di strade, nonché degli impianti e dei dispositivi di sicurezza previsti nei tunnel, compilando per ognuno di essi una scheda utile ai fini di una classificazione articolata in funzione dei livelli di rischio. La figura 2.1 mostra un modello di tali schede, presente negli allegati della circolare (M. De Guglielmo, 2007).

<b>MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI</b>	
Consiglio Superiore dei LL.PP.	
<b>DATI CONOSCITIVI DELLE GALLERIE E DEI TRAFORI STRADALI</b>	
<b>SEZIONE 1 - IDENTIFICAZIONE GALLERIA E DATI GENERALI</b>	
Ente Proprietario o Concessionario: _____	
Autostrada	<input type="checkbox"/>
Strada Statale	<input type="checkbox"/>
Strada Regionale	<input type="checkbox"/>
Strada Provinciale	<input type="checkbox"/>
Strada Comunale	<input type="checkbox"/>
Urbana	<input type="checkbox"/>
Extraurbana	<input type="checkbox"/>
Denominazione della galleria: _____	
Ubicata in: Comune _____	
Provincia _____ Regione _____	
La galleria fa parte di una serie di gallerie (insere su un tratto omogeneo caratterizzato da più gallerie in sequenza) <input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No	
Galleria: Naturale	<input type="checkbox"/>
Artificiale	<input type="checkbox"/>
con pregallerie	<input type="checkbox"/>
entrambe imbocchi	<input type="checkbox"/>
a fornice unica	<input type="checkbox"/>
a fornice doppia	<input type="checkbox"/>
tenestrata	<input type="checkbox"/>
lato valle	<input type="checkbox"/>
lato monte	<input type="checkbox"/>
Anno apertura al traffico: _____	
By-pass (esterno su imbocchi galleria)	<input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
Vie fuga (eunicoli)	<input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
percorsibili dai veicoli	<input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
pedonali	<input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
Breve descrizione: _____	
_____	
_____	
<b>SEZIONE 3 - IMPIANTI E SEGNALETICA</b>	
GALLERIE FORNICE UNICO/DX	<input type="checkbox"/>
GALLERIE FORNICE SINISTRO	<input type="checkbox"/>
<b>IMPIANTI D'ILLUMINAZIONE</b>	
assiale continua	<input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
laterale continua	<input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
file	n° _____
distanza tra le armature	m _____
circuiti elettrici d'illuminazione	n° _____
regime d'illuminazione	Diurno <input type="checkbox"/>
	Notturno <input type="checkbox"/>
	%Diurno _____
regolazione continua	Automatica <input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No
regolazione a gradini	Automatica <input type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No

Figura 2.1: esempi di allegati 1/13 e 16/13.

Per quanto riguarda i provvedimenti attinenti alla circolazione, viene richiamata la facoltà degli enti proprietari o concessionari di strada di limitare il movimento o di imporre specifiche prescrizioni ai veicoli che trasportano determinati prodotti pericolosi, in relazione alle caratteristiche geometriche e

funzionali dell'infrastruttura, ai flussi di traffico (TGM) ed alla dotazione di impianti di sicurezza.

Inoltre, per le gallerie stradali di lunghezza maggiore o uguale a 2000 m bidirezionali, deve essere imposta una distanza di sicurezza tra i veicoli di almeno 100 m durante la marcia, mediante l'adozione di un segnale opportuno. Mentre, in relazione ai rischi conseguenti alle manovre di sorpasso, legati alle caratteristiche geometriche ed alle condizioni di visibilità, è di fondamentale importanza valutare la necessità di disporre il divieto di sorpasso, per i veicoli di massa a pieno carico superiore ad un determinato limite e, ove necessario, per tutti gli altri mezzi.

La circolare impone anche agli enti proprietari di effettuare verifiche tecniche relative alle distanze di visuale libera nonché alla geometria del tracciato e della sezione trasversale della galleria, determinando, ove necessario, i relativi limiti di velocità nella galleria medesima e nella zona di approccio alla stessa.

Poiché, come già evidenziato nel capitolo precedente, gli incidenti si concentrano nelle aree di transizione agli imbocchi, è fondamentale posizionare adeguatamente, sin dalle zone di approccio, tutti i segnali verticali ed orizzontali che interessano le gallerie. In particolare, per quanto riguarda la segnaletica verticale, si richiama l'attenzione dell'utente con il cartello "galleria" posizionato prima di ogni tunnel, mentre per quella orizzontale devono essere utilizzate strisce continue oblique di colore bianco, di raccordo, in caso di eventuali variazioni larghezza della carreggiata.

Considerato che il primo elemento di rischio, nella circolazione dei veicoli all'interno delle gallerie stradali, è rappresentato dalla scarsa visibilità, gli enti proprietari o concessionari di strade devono provvedere, da normativa, a verificare gli impianti di illuminazione dei tunnel che si trovano lungo la rete di propria competenza e garantire che i rivestimenti delle pareti laterali siano di colore chiaro. Ovviamente, è compito loro assicurare, nel tempo, il mantenimento di tale colorazione.

Inoltre, viene previsto che tutte le gallerie stradali di lunghezza maggiore o uguale a 1000 m in ambito extraurbano, e a 500 m in ambito urbano,



dovranno essere attrezzate con le seguenti dotazioni minime di impianti di sicurezza:

- Colonnine SOS foniche, collocate in corrispondenza delle piazzole di sosta di emergenza;
- pannelli segnaletici luminosi di pericolo;
- eventuale integrazione con impianti semaforici;
- estintori da collocare nella medesima posizione delle colonnine foniche;
- idranti con bocchette UNI 45, ogni 200 m, limitatamente alle gallerie di lunghezza maggiore o uguale a 2000 m.

Infine, per quanto concerne i tunnel presidiati o dotati di centro di controllo, deve essere redatto un manuale di sicurezza contenente l'individuazione, l'analisi e la valutazione di tutti i potenziali rischi connessi all'esercizio della galleria, secondo i criteri idonei a valutare la frequenza degli eventi e la relativa gravità in base alla stima di danni potenziali.

### **2.3 Decreto Ministeriale 05/06/2001**

*“Sicurezza nelle gallerie stradali”.*

Questo Decreto è rafforzativo della circolare presentata nel paragrafo precedente, e obbliga gli enti proprietari e concessionari di strade ad effettuare il censimento previsto, tramite la compilazione della scheda mostrata dalla figura 2.1, in prefissati termini (entro sei mesi dalla data di pubblicazione).

Inoltre, viene prescritto che le modalità di attuazione di tutti gli adempimenti previsti nella circolare 6 dicembre 1999, n. 7938, nonché gli ulteriori interventi per il miglioramento della sicurezza, ivi compresa la definizione dei criteri per l'analisi del rischio e gli adempimenti conseguenti all'art. 8/bis della legge 13 luglio 1999, n. 226, devono contenuti in una specifica normativa tecnica.

## 2.4 Decreto Ministeriale 05/11/2001

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

In attuazione dell'art. 13 del DLgs 30/04/1992 n.285 (Nuovo Codice della Strada) il Ministro specifica le “Norme geometriche e funzionali per la costruzione delle strade”, in relazione alla loro classificazione secondo il Codice stesso.

La qualificazione funzionale è basata sulle tipologie delle utenze e delle attività ammesse sulle strade. I criteri di progettazione, invece, riguardano gli elementi geometrici dell'asse e della sezione delle strade urbane ed extraurbane per garantire sicurezza e regolarità di marcia.

In particolare, per le gallerie sono illustrate le sezioni trasversali in funzione della categoria di strada in cui ricadono, tenendo presente che per il tipo A le carreggiate e le banchine poste a sinistra, nonché le banchine a destra, devono essere mantenute di dimensioni invariate rispetto all'esterno. Inoltre, come è possibile notare dalle figure 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 (M. De Guglielmo, 2007):

- in tutti i casi l'altezza libera della galleria, misurata a partire da un punto qualsiasi della piattaforma, non deve essere inferiore a 4.80 m con un franco libero in corrispondenza della carreggiata non inferiore a 5.00 m;
- per le gallerie ricadenti in strade di tipo A, B e D è opportuno contenere le emissioni di sostanze inquinanti, non superando la pendenza longitudinale del 4% ed ancor meno nel caso di lunghe gallerie;
- per le gallerie di lunghezza superiore ai 1000 m sono previste piazzole di sosta e collegamenti pedonali di dimensioni minime indicate.

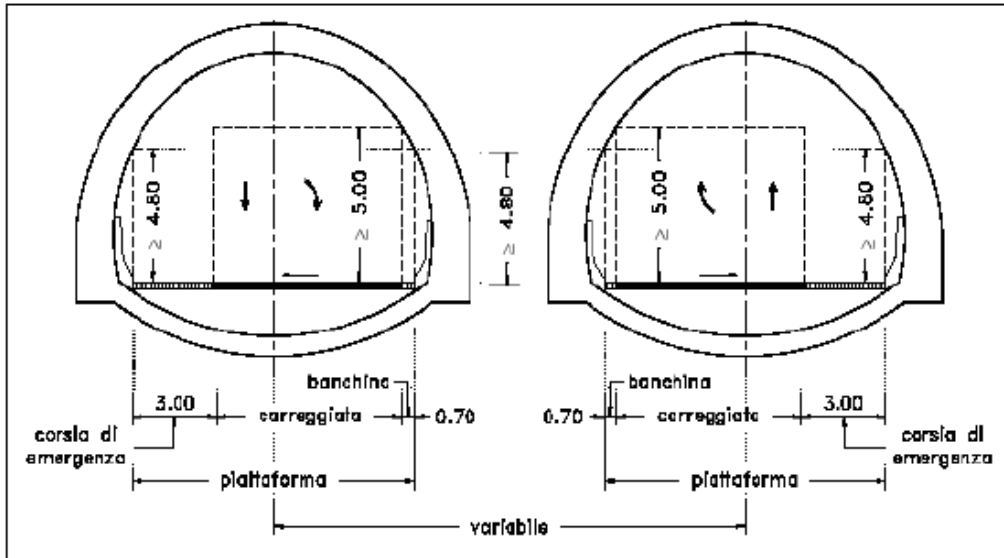


Figura 2.2: galleria a doppio fornice per le strade di tipo A.

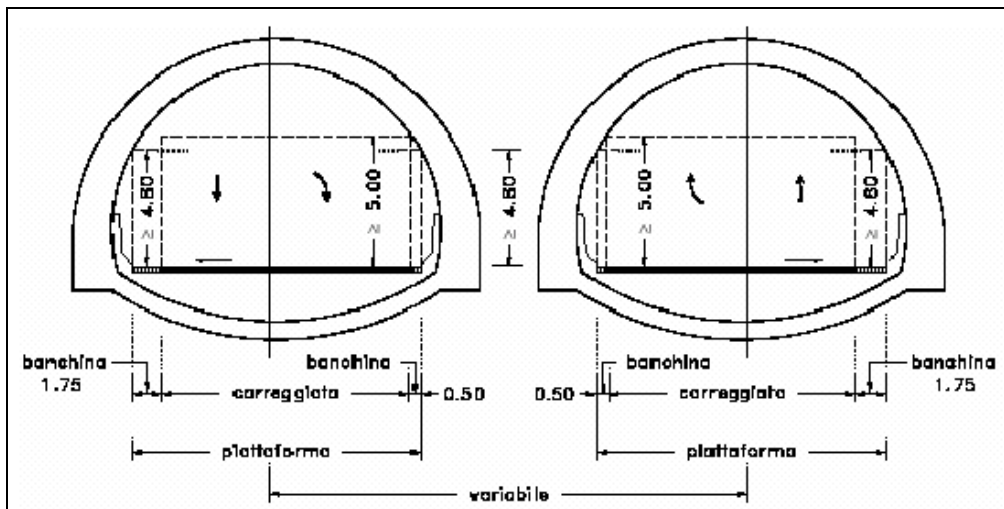


Figura 2.3: galleria a doppio fornice per le strade di tipo B.

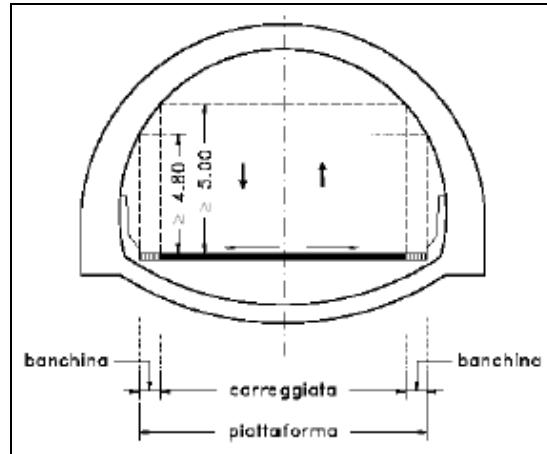


Figura 2.4: galleria ad un unico foro per le strade di tipo C ed F in ambito urbano.

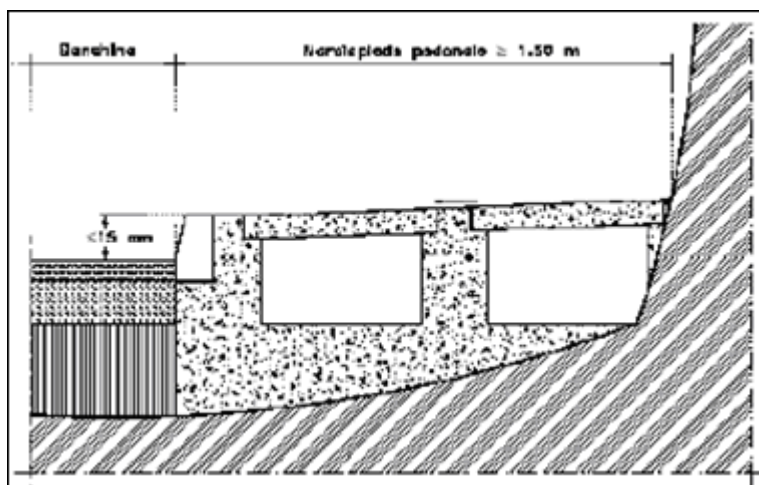
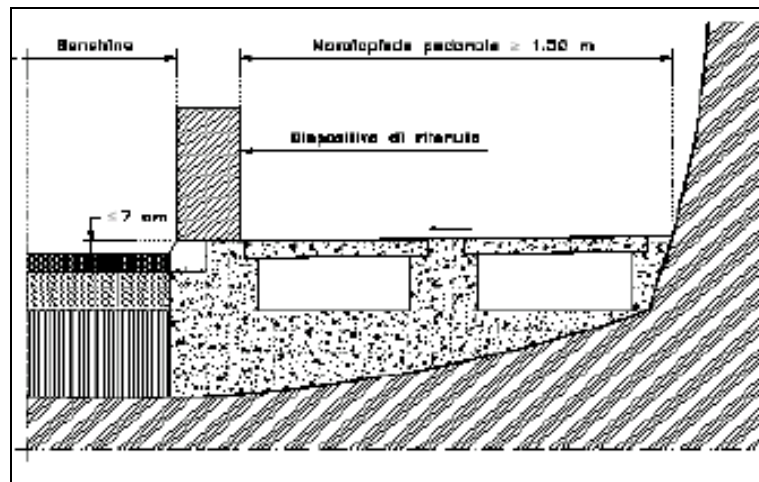


Figura 2.5: margini laterali delle gallerie per strade di tipo D, E, ed F in ambito urbano.

## 2.5 Norma UNI 11095 del 01/12/2003

“Luce ed illuminazione – illuminazione delle gallerie”.

La norma UNI è il riferimento, in mancanza di documenti normativi (anche a livello internazionale), sull'illuminazione delle gallerie stradali. Essa specifica i requisiti cui deve rispondere l'impianto al fine di assicurare al conducente del veicolo, sia di giorno che di notte, l'ingresso, il percorso e l'uscita dal tratto coperto alla velocità illuminotecnica di progetto con grado di sicurezza e comfort non inferiore a quelli dei corrispondenti ai tratti di strada all'aperto.

La figura 2.6 rappresenta un esempio di come deve essere realizzata l'illuminazione delle cosiddette gallerie *corte* in base alle proprie caratteristiche (M. De Guglielmo, 2007).

Lunghezza della galleria	<25 m	$25\text{ m} \leq L < 75\text{ m}$	$75\text{ m} \leq L \leq 125\text{ m}$
L'uscita è ben visibile dalla distanza di arresto? <sup>1)</sup>	si	no	si
La luce naturale penetra liberamente in galleria? <sup>2)</sup>	si	no	si
La luminanza delle pareti è adeguata? <sup>3)</sup>	si	no	si
Il traffico orario è scarso? <sup>4)</sup>	si	no	si
illuminazione da realizzare	Nessuna	illuminazione di livello pari al 50% di quanto previsto per le gallerie lunghe	illuminazione di livello pari al 100% di quanto previsto per le gallerie lunghe
1)	La distanza di arresto si valuta nel tratto antistante l'imbocco.		
2)	Si ritiene, ai fini del prospetto, che la luce penetri liberamente nella galleria quando la luminanza della carreggiata a metà galleria sia $\geq 1/4$ della luminanza di velo calcolata secondo 4.1 per ambedue gli imbocchi.		
3)	Si ritiene, ai fini del prospetto, che la luminanza delle pareti è adeguata quando sia $>0,6 \cdot L_c$ essendo $L_c$ la luminanza della carreggiata.		
4)	Si ritiene, ai fini del prospetto, che il traffico giornaliero medio (TGM) sia scarso quando non supera il valore di 3 000 veicoli/giorno e non sia prevista la presenza di ciclisti o pedoni.		

Figura 2.6: illuminazione delle gallerie *corte*.

## 2.6 Decreto Ministeriale n.3476 del 14/09/2005

“Norme di illuminazione delle gallerie stradali”.

Ai fini del miglioramento della sicurezza stradale, della riduzione degli incidenti e per l'adeguamento dei sistemi di illuminazione delle gallerie, con

particolare attenzione al contenimento dei consumi energetici, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha emanato il Decreto 14 settembre 2005 “Norme di illuminazione delle gallerie stradali”, pubblicato lo scorso 20 dicembre sulla Gazzetta ufficiale.

All’Art. 1 del Decreto si legge “l’illuminazione delle gallerie stradali ed autostradali, con traffico totalmente o parzialmente motorizzato, esistenti e di nuova realizzazione, deve essere progettata e verificata secondo le indicazioni contenute nella norma UNI 11095 del 2003”. Quest’ultima è stata descritta nel paragrafo precedente.

Il testo del Decreto prosegue indicando le modalità relative alla progettazione delle gallerie e dei relativi impianti di illuminazione, che deve essere condotta da un progettista di comprovata esperienza specifica, oltre che nel rispetto della norma UNI anche in osservanza dei seguenti criteri:

- ottimizzazione delle modalità e dei tempi di installazione e di manutenzione;
- affidabilità di funzionamento;
- durabilità dei componenti e del sistema;
- decadimento dell’efficienza degli apparecchi di illuminazione (fattore di manutenzione);
- integrazione dell’impianto di illuminazione con altri eventuali sistemi di sicurezza;
- ottimizzazione dei costi di installazione, gestione e manutenzione.

Per la scelta della luminanza di entrata, da porre a base del dimensionamento dell’impianto, la distanza di riferimento va determinata con la velocità di progetto illuminotecnico, utilizzando i diagrammi presenti nell’appendice B della norma UNI.

Anche le verifiche illuminotecniche delle gallerie esistenti, in corso di realizzazione e da realizzare, comprese quelle di collaudo e di esercizio, devono essere condotte secondo le indicazioni della norma sopra citata, con cadenze stabilite e prevedendo oltre alle verifiche sull’illuminamento, misurazioni di luminanza sia inizialmente che durante la vita dell’impianto,

con periodicità definita in dipendenza delle caratteristiche tecniche dell'impianto stesso.

Qualora le verifiche eseguite sulle gallerie esistenti o in corso di realizzazione non soddisfino i requisiti contenuti nella norma UNI 11095 del 2003, i relativi sistemi di illuminazione dovranno essere adeguati, ad eccezione dei casi in cui si sia già provveduto ai sensi delle istruzioni tecniche CIE 88-1990.

## 2.7 Circolare ANAS n.33 del 2005

*“Sagome interne e principali dotazioni infrastrutturali delle gallerie stradali”.*

Con l'entrata in vigore del D.M. 5/11/2001 e della Direttiva Europea 2004/54/CE, l'ANAS ha ritenuto necessario definire nuove soluzioni progettuali per le sagome interne delle gallerie e per le dotazioni infrastrutturali necessarie per rispondere ai requisiti di sicurezza in esercizio.

La figura 2.7 mostra un esempio di sezione tipo, con allargamento in curva, di una galleria stradale (M. De Guglielmo, 2007).

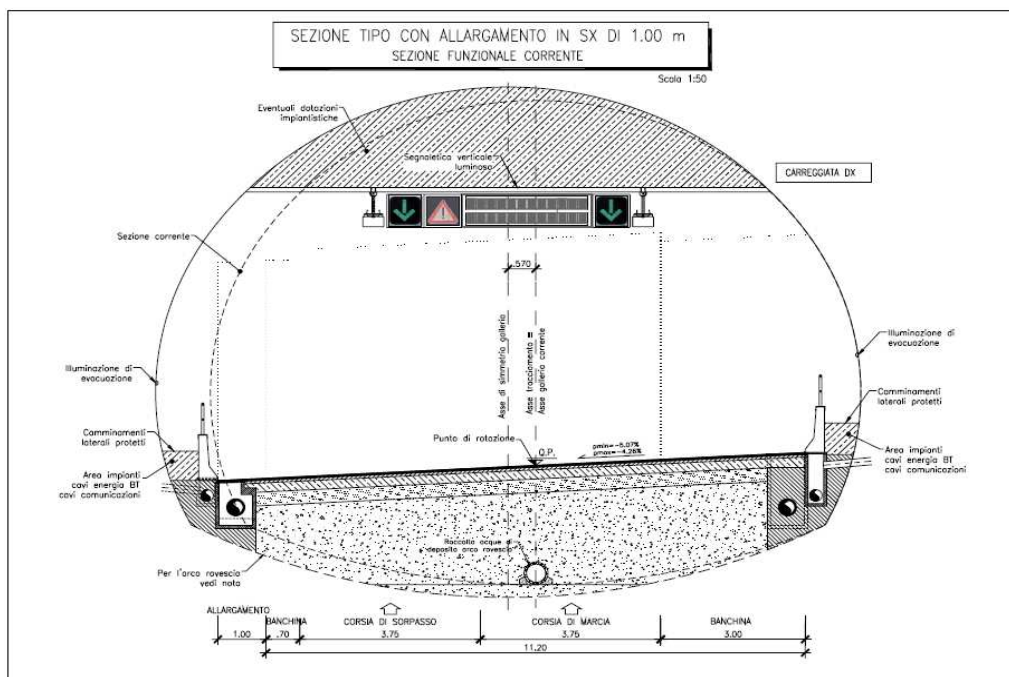


Figura 2.7: galleria di categoria A, sezione corrente con allargamento in curva.

## 2.8 Direttiva 2004/54/CE

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

Il sistema di trasporto ed in particolare la rete stradale TEN-T, hanno un'importanza fondamentale nel contribuire all'integrazione europea e nell'assicurare un'elevata qualità della vita per i cittadini. Pertanto, l'UE ha il compito di garantire un livello di sicurezza, di servizi e di comfort elevato, uniforme e costante su questa rete stradale.

La Direttiva 2004/54/CE, promulgata dal Parlamento Europeo, individua gli obiettivi di sicurezza da perseguire, identifica un insieme di parametri da considerare, fissa i gruppi di requisiti minimi da soddisfare, suggerisce un approccio sistemico nella formulazione e comparativo nei contenuti, per la progettazione della sicurezza nelle gallerie di nuova costruzione, indica l'analisi di rischio come lo strumento analitico da utilizzare per determinare il livello di sicurezza di una galleria, fissando le condizioni di applicazione e dettagliando gli obiettivi da perseguire.

I gravi sinistri che si sono verificati nelle gallerie stradali sottolineano l'importanza di queste infrastrutture sul piano umano, economico e culturale. Alcuni tunnel europei che sono entrati in servizio in anni lontani erano stati progettati in un'epoca in cui le possibilità tecniche e le condizioni di trasporto erano molto diverse da quelle attuali. Oggi si riscontrano, pertanto, livelli di sicurezza disomogenei che devono essere migliorati.

Questo risanamento viene, appunto, garantito attraverso la presente direttiva, 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.

Tale ordinanza si applica a tutti i tunnel della rete stradale transeuropea di lunghezza superiore a 500 m, siano essi già in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progetto.

Per le gallerie in esercizio è consentito agli Stati Membri di adottare misure di riduzione dei rischi alternative a quelle proposte dalla Direttiva



stessa, qualora le caratteristiche delle gallerie non consentano la completa adesione alle prescrizioni formulate, purché tali misure si traducano in una protezione equivalente o accresciuta. L'efficacia di questi provvedimenti alternativi deve essere dimostrata mediante un'*analisi dei rischi*.

Prima di procedere alla descrizione di quest'analisi, è importante chiarire i ruoli e le responsabilità.

### **2.8.1 Organizzazione della sicurezza**

Attraverso questa direttiva vengono istituiti nuovi ruoli nella gestione di una galleria stradale:

- *autorità amministrative;*
- *gestore della galleria;*
- *responsabile della sicurezza;*
- *ente per le ispezioni.*

#### **2.8.1.1 Autorità amministrative**

*Le autorità amministrative* saranno nominate dagli Stati membri ed avranno la responsabilità generale per tutti gli aspetti relativi alla sicurezza di una galleria, prendendo le disposizioni necessarie per garantire l'osservanza della presente direttiva. L'autorità amministrativa può essere istituita a livello nazionale, regionale o locale.

Ciascun tunnel della rete transeuropea, situato sul territorio di un solo Stato membro, è soggetto alla responsabilità di una sola autorità. Pertanto, per le gallerie situate sul territorio di due Stati membri, ciascuno di questi può nominare un'autorità amministrativa. Entrambe dovranno autorizzare l'entrata in servizio di ogni nuova galleria o la ricostruzione di una già esistente. Avranno il potere di sospendere o limitare la gestione di un tunnel se i requisiti di sicurezza non sono rispettati.

In alternativa, i due Stati membri designano un'autorità comune. In ogni caso essa svolge i seguenti compiti:

- definisce i requisiti dei controlli di sicurezza;

- sovrintende ai programmi di formazione e all'equipaggiamento dei servizi di emergenza;
- precisa i compiti dei responsabili della sicurezza;
- sovrintende ed attua le misure di riduzione dei rischi;
- provvede alla chiusura delle gallerie per verifiche ed alla formazione dei servizi di emergenza.

### **2.8.1.2 Gestore della galleria**

Per ciascuna galleria situata sul territorio di uno Stato membro, che si trovi nella fase di progettazione, di costruzione o di funzionamento, l'autorità amministrativa identifica, quale *gestore della galleria*, l'organismo pubblico o privato, responsabile della gestione della galleria nella fase interessata. Questa funzione può essere esercitata dalla stessa autorità amministrativa.

Per ogni galleria situata sul territorio di due Stati membri, le due autorità amministrative corrispondenti, o quella comune, riconoscono un solo organismo responsabile del funzionamento del tunnel.

Per tutti gli incidenti o eventi di rilievo, che si verificano in una galleria, il gestore deve redigere un rapporto di inconvenienti che viene trasmesso al *responsabile della sicurezza*, all'autorità amministrativa ed ai servizi di pronto intervento entro il termine massimo di un mese dalla data in cui si è prodotto l'incidente.

In definitiva il ruolo del gestore della galleria è quello di:

- garantire la sicurezza degli utenti in normali condizioni d'uso ed in situazioni di emergenza;
- controllare il funzionamento di tutte le installazioni;
- provvedere alla manutenzione delle installazioni della struttura ed elettromeccaniche.

### **2.8.1.3 Responsabile della sicurezza**

Per ciascuna galleria, il gestore designa un *responsabile della sicurezza*, che deve essere preventivamente accettato dall'autorità amministrativa, e che

coordina tutte le misure di prevenzione e di salvaguardia dirette a garantire la sicurezza degli utenti e del personale di esercizio.

Il responsabile può essere un membro del personale del tunnel o dei servizi di pronto intervento, gode di piena autonomia per tutte le questioni attinenti alla sicurezza nelle gallerie stradali e, relativamente a tali questioni, non riceve alcuna istruzione da un datore di lavoro. Inoltre, può assolvere le sue mansioni per più infrastrutture in una determinata regione.

Le funzioni di cui è il responsabile sono le seguenti:

- assicura il coordinamento con servizi di pronto intervento e partecipa alla preparazione dei piani operativi;
- partecipa alla pianificazione, all'attuazione ed alla valutazione degli interventi di emergenza;
- partecipa alla definizione dei piani di sicurezza e delle specifiche della struttura, degli equipaggiamenti e del funzionamento, sia nel caso di gallerie nuove sia nel caso di modifica di gallerie già esistenti;
- verifica che il personale di esercizio ed i servizi di pronto intervento, vengano formati, e partecipa all'organizzazione di esercitazioni svolte ad intervalli regolari;
- viene consultato sulla messa in servizio della struttura, sugli equipaggiamenti e sul funzionamento delle gallerie;
- verifica che siano effettuate la manutenzione e le riparazioni della struttura e degli equipaggiamenti delle gallerie.

#### **2.8.1.4 Ente per le ispezioni**

Gli Stati membri garantiscono che le ispezioni, le valutazioni ed i collaudi vengano effettuati da *enti per le ispezioni*. Questa funzione può anche essere esercitata dall'autorità amministrativa.

Ogni ente deve possedere un alto livello di competenza e disporre di procedure di qualità elevata, e deve essere funzionalmente indipendente dal gestore della galleria.

L'autorità amministrativa è tenuta a verificare che ispezioni periodiche vengano effettuate dall'ente per le ispezioni onde garantire che tutte le gallerie contemplate dalla presente direttiva siano conformi alle disposizioni della stessa.

Il periodo intercorrente tra due controlli consecutivi di un determinato tunnel, non deve superare i sei mesi.

Qualora, in base alla relazione dell'ente, si evidenzi che una galleria non è conforme alle disposizioni della presente direttiva, l'autorità amministrativa comunica al gestore della galleria ed al responsabile della sicurezza che devono essere adottate misure destinate ad accrescere la sicurezza dell'infrastruttura stessa. Inoltre, definisce le condizioni per il mantenimento in esercizio o la riapertura della galleria che si applicheranno fino al completamento degli interventi correttivi, nonché qualsiasi altra restrizione e condizione pertinente.

## **2.8.2 Analisi dei rischi**

L'analisi dei rischi viene effettuata, se necessario, da un organismo funzionalmente indipendente dal gestore della galleria. Il contenuto ed i risultati di tali studi devono essere inseriti nella documentazione di sicurezza trasmessa all'autorità amministrativa.

Si tratta di un'analisi dei rischi di una determinata galleria, che tiene conto di tutti gli elementi inerenti alle sue caratteristiche progettuali e delle condizioni del traffico che incidono sulla sicurezza; per cui vengono prese in considerazione le caratteristiche ed il tipo di traffico, la lunghezza e la geometria della galleria, nonché il numero previsto di veicoli pesanti in transito giornaliero.

Gli Stati membri provvedono affinché, a livello nazionale, venga utilizzata una metodologia analitica e ben definita, corrispondente alle migliori pratiche disponibili ed informano della metodologia applicata la Commissione.

Quest'ultima pubblica, entro cinque anni dall'entrata in vigore della presente direttiva, una relazione sulle pratiche seguite e, se necessario, presenta

proposte ai fini dell'adozione di una metodologia di analisi dei rischi comune ed armonizzata.

## **2.8.3 Requisiti tecnici**

### **2.8.3.1 Infrastrutture**

I requisiti minimi richiesti sono suddivisi nelle tre seguenti categorie principali:

- 1) misure strutturali:
  - a) numero di fornici e corsie;
  - b) geometria della galleria;
- 2) impianti:
  - a) illuminazione;
  - b) ventilazione;
  - c) antincendio;
- 3) ulteriori misure di sicurezza:
  - a) segnaletica;
  - b) centri di controllo;
  - c) impianti di sorveglianza;
  - d) sistemi di comunicazione.

Essi sono ulteriormente articolati come: obbligatori per tutte le gallerie, obbligatori con eccezioni, non obbligatori o raccomandati, a seconda di come il traffico (TGM per corsia) e la lunghezza del fornice caratterizzano la galleria in esame. In questo paragrafo vengono spiegati solamente quelli principali.

*Classificazione delle gallerie.* Un nuovo sistema di classificazione delle gallerie prevede 5 livelli di installazione in funzione del tipo di galleria del volume del traffico e della lunghezza dell'infrastruttura. Le gallerie di livello I devono soddisfare i requisiti di sicurezza più elevati.

*Numero delle fornici.* La costruzione di manufatti a canna singola è giustificata solo se le previsioni a lungo termine indicano che il volume del traffico resterà moderato.

*Vie di fuga.* Per i tunnel di livello I e II a circolazione bidirezionale è obbligatoria la costruzione di vie di fuga o gallerie di sicurezza speciali.

*Ventilazione.* Le gallerie a canna singola a circolazione bidirezionale devono essere munite di ventilazione trasversale e/o semitrasversale con possibilità di scarico. La ventilazione longitudinale che convoglia il fumo in una direzione può essere usata in queste gallerie solo quando le condizioni del traffico consentono ai veicoli non coinvolti in un congestionamento stradale di uscire dalla galleria.

*Uscite di emergenza.* Se le condizioni locali evidenziano che le disposizioni di cui sopra sono insufficienti, è doveroso costruire brevi gallerie di fuga perpendicolari con sbocco all'esterno, o una galleria parallela di sicurezza con aperture di comunicazione a intervalli massimi di 500 metri per permettere agli utenti di mettersi in salvo. Non devono essere costruiti rifugi privi di uscita sulle vie di fuga verso l'esterno.

*La distanza tra le piazzole* non deve essere superiore a 1000 metri.

*Disposizioni supplementari* per:

- gallerie a doppia canna: in caso di sinistro l'altra fornice viene utilizzata come via di fuga ed arteria di soccorso. Gallerie di comunicazione per i pedoni devono collegare le canne a intervalli non superiori a 500 metri. Una galleria di comunicazione su tre deve permettere il passaggio di veicoli di emergenza. La diffusione di fumo o di gas da una canna all'altra deve essere impedita;
- gallerie in pendenza, poiché possono aumentare i rischi, non sono autorizzate pendenze longitudinali superiori al 5%;
- gallerie con problemi di congestione: per quelle unidirezionali con traffico congestionato si applicano norme di ventilazione più severe;
- gallerie subacquee: deve essere eseguita un'analisi dei rischi per stabilire la necessità di limitazioni parziali o totali al trasporto di merci pericolose.

*Installazioni minime per tutte le gallerie:*

- vie di fuga: devono essere indicate con segnali luminosi almeno ogni 100 metri e con segnali stradali ogni 25 metri;
- estintori: devono essere installati sistematicamente nelle gallerie a intervalli di almeno 150 metri e agli imbocchi. Bocchette antincendio per i pompieri devono disponibili almeno ogni 150 metri;
- impianto di radiodiffusione: deve essere disponibile in tutte le gallerie con frequenze speciali utilizzabili dai servizi di emergenza. Il gestore della galleria e i servizi di emergenza devono poter interrompere le trasmissioni radio per trasmettere messaggi di emergenza;
- impianti di video-sorveglianza: devono essere installati in gallerie di lunghezza superiore a 1000 metri e comprendere rivelatori automatici di sinistri;
- installazione sicura dei cavi ad alta e bassa tensione. I circuiti devono essere progettati in modo che un guasto locale non danneggi i circuiti ancora integri.

*Segnaletica stradale.* Devono essere impiegati segnali stradali specifici per indicare le vie di fuga e gli impianti di sicurezza nelle gallerie, come quelli mostrati nella figura 2.8.



Figura 2.8: esempi di segnaletica.

*Sale di controllo:* l'autorità amministrativa deve decidere se per le gallerie è necessaria una sala di controllo.

La figura 2.9 (M. De Guglielmo, 2007) riassume le informazioni relative ai requisiti minimi.



SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI			Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni
			500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3.000m	>3000m	
Misure strutturali	2 o più fornici	§2.1						Obbligatorio se le previsioni su 15 anni indicano traffico > 10000 veicoli/corsia
	Dislivelli ≤ 5 %	§2.2	*	*	*	*	*	Obbligatorio a meno che non sia geograficamente possibile.
	Banchine pedonabili di emergenza	§2.3.1 §2.3.2						Obbligatorio se non esiste una corsia di emergenza, a meno che sia rispettata la condizione di cui al punto 2.3.1. Nelle gallerie esistenti sprovviste sia di corsie di emergenza sia di banchine pedonabili di emergenza devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzate.
	Uscite di emergenza almeno ogni 500 m	§2.3.3 §2.3.9	○	○	*	*	*	La creazione di uscite di emergenza nelle gallerie esistenti deve essere valutata caso per caso.
	Gallerie trasversali per i servizi di pronto intervento almeno ogni 1500 m	§2.4.1	○	○/●	○	○/●	●	Obbligatorio nelle gallerie a doppio fornice di lunghezza superiore a 1500 m.
	Punti di attraversamento dello spartitraffico al di fuori di ciascuna portale	§2.4.2	●	●	●	●	●	Obbligatorio al di fuori delle gallerie a due o più fornici ovunque sia geograficamente possibile.
	Piazzole di sosta almeno ogni 1000 m	§2.5						Obbligatorio nelle nuove gallerie bidirezionali > 1500 m sprovviste di corsie di emergenza. Nelle gallerie bidirezionali esistenti > 1500 m in funzione dell'analisi della situazione. Per le gallerie nuove ed esistenti, in funzione della lunghezza supplementare utilizzabile della galleria.
	Drenaggio di liquidi infiammabili e tossici	§2.6	*	*	*	*	*	Obbligatorio se è autorizzato il trasporto di merci pericolose.
Caratteristiche ignifughe delle strutture	§2.7	●	●	●	●	●	Obbligatorio se un eventuale cedimento locale può avere conseguenze catastrofiche.	
SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI			Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni
			500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3.000m	>3.000 m	
Illuminazione	Illuminazione ordinaria	§2.8.1	●	●	●	●	●	
	Illuminazione di sicurezza	§2.8.2	●	●	●	●	●	
	Illuminazione di evacuazione	§2.8.3	●	●	●	●	●	
Ventilazione	Ventilazione meccanica	§2.9	○	○	○	●	●	
	Disposizioni speciali per la ventilazione (semi) trasversale	§2.9.5	○	○	○	○	●	Obbligatorio nelle gallerie bidirezionali dove esiste un centro di controllo.
Stazioni di emergenza	Almeno ogni 150 m	§2.10	●	●	●	●	●	Munite di telefono e di 2 estintori. È consentito un intervallo massimo di 250 m nelle gallerie esistenti.
Erogazione idrica	Almeno ogni 250 m	§2.11	●	●	●	●	●	Se non è prevista, è obbligatorio assicurare in altro modo una sufficiente erogazione idrica.
Segnaletica stradale		§2.12	●	●	●	●	●	Per tutti gli impianti di sicurezza previsti per gli utenti della galleria (cfr. allegato III).
Centro di controllo		§2.13	○	○	○	○	●	La sorveglianza di diverse gallerie può essere accentrata in un unico centro di controllo.
Impianti di sorveglianza	Telecamere	§2.14	●	●	●	●	●	Obbligatorio se esiste un centro di controllo.
	Rilevamento automatico degli incidenti e/o degli incendi	§2.14	●	●	●	●	●	Almeno uno dei due sistemi è obbligatorio nelle gallerie dove esiste un centro di controllo.
Impianto per chiudere la galleria	Semafori prima degli ingressi	§2.15.1	○	●	○	●	●	
	Semafori all'interno della galleria almeno ogni 1000 m	§2.15.2	○	○	○	○	●	Raccomandato se esiste un centro di controllo e se la lunghezza è superiore a 3000 m.
SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI			Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni
			500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3.000m	>3.000 m	
Sistemi di comunicazione	Ritrasmissioni radio ad uso dei servizi di pronto intervento	§2.16.1	○	○	○	●	●	
	Messaggi di emergenza via radio destinati agli utenti della galleria	§2.16.2	●	●	●	●	●	Obbligatorio se esistono canali di trasmissione radio destinati agli utenti della galleria e se esiste un centro di controllo.
	Altoparlanti nei rifugi e presso le uscite	§2.16.3	●	●	●	●	●	Obbligatorio se gli utenti della galleria in fase di evacuazione devono aspettare prima di poter raggiungere l'esterno.
Alimentazione elettrica		§2.17	●	●	●	●	●	Per assicurare il funzionamento dell'impianto di sicurezza indispensabile almeno durante l'evacuazione degli utenti della galleria.
Caratteristiche ignifughe degli impianti		§2.18	●	●	●	●	●	Devono mirare al mantenimento delle necessarie funzioni di sicurezza.

Figura 2.9: requisiti minimi.

### 2.8.3.2 Regole da rispettare

In base alla situazione è doveroso rispettare le prescrizioni previste dalla direttiva. Di seguito vengono presentate quelle relative alla sicurezza:

- *lavori nelle gallerie*: le chiusure di corsia per lavori di costruzione o di manutenzione devono sempre iniziare, essere indicate e terminare all'esterno della galleria;
- *gestione dei sinistri*: in caso di incidente grave, tutte le canne della galleria devono essere chiuse. Il tempo di intervento dei servizi di emergenza deve essere inferiore a 10 minuti per le gallerie di classe I;
- *attività del centro di controllo*: per tutte le gallerie, comprese quelle transfrontaliere, un unico centro deve avere sempre il controllo completo;
- *chiusura della galleria*: gli utenti devono esser informati sui migliori percorsi alternativi possibili. Questi ultimi costituiscono parte di un piano di emergenza;
- *trasporto di merci pericolose*: dopo aver effettuato un'analisi dei rischi, segnali stradali devono indicare se nella galleria possono essere trasportate merci pericolose;
- *sorpasso nelle gallerie*: un'analisi dei rischi stabilisce se ai mezzi pesanti è consentito il sorpasso nel caso in cui vi sia più di una corsia per ogni senso di marcia;
- *distanza tra i veicoli*: gli utenti stradali devono mantenere una distanza di sicurezza minima dal veicolo che li precede di 50 metri per le autovetture e 100 metri per i mezzi pesanti, alla velocità massima consentita;

### 2.8.3.3 Veicoli

Tutti gli autotreni, autobus e le autocorriere che transitano in galleria devono essere dotati di estintori. I loro serbatoi supplementari devono essere vuoti. Gli Stati membri devono effettuare controlli a campione per far rispettare queste norme.

#### **2.8.3.4 Informazioni agli utenti della strada**

Gli Stati membri devono organizzare regolarmente campagne di informazione sulla sicurezza nelle gallerie relative al comportamento corretto che deve essere mantenuto dagli utenti della strada, in particolar modo in relazione ai guasti meccanici dei veicoli, agli ingorghi, incidenti, incendi ed informazioni sulle installazioni di sicurezza disponibili nei tunnel. Queste raggugli devono essere indicati nelle aree di sosta precedenti la galleria e all'ingresso del tunnel stesso, quando la circolazione è bloccata.

In futuro tutte le infrastrutture dovranno essere equipaggiate in modo da garantire al loro interno il funzionamento ininterrotto dei mezzi di comunicazione come i telefoni cellulari. Quando un utente compone il numero di emergenza 112 da un telefono cellulare in una galleria, l'operatore della galleria deve essere allertato per primo.

## **2.9 Decreto Legislativo n. 264 del 05/10/2006**

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

In tale decreto, la direttiva 2004/54/CE viene riportata senza sostanziali variazioni (né per l'applicabilità, né per le disposizioni circa i requisiti minimi) ed è integrato, come richiesto a tutti gli stati membri, l'articolo 13 recante l'indicazione della necessità di un'analisi del rischio. Essa è, infatti, prevista sia per le gallerie esistenti che presentano carenze rispetto ai requisiti di sicurezza di tipo strutturale, sia per le gallerie che presentano caratteristiche speciali (di cui all'articolo 4, comma 8), e sarà oggetto di studio in questo capitolo.

La presente direttiva si applica 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.

Gli obbiettivi prefissati sono i seguenti:

- *prevenzione*: prevenire gli eventi critici che mettono in pericolo la vita umana, l'ambiente e le installazioni di una galleria;

- *attenuazione delle conseguenze*: creare le condizioni ideali affinché le persone coinvolte in un incidente possano mettersi in salvo, garantire un'azione efficiente dei servizi di emergenza, proteggere l'ambiente e limitare i danni materiali.

Gli standard richiesti, che come detto sono circa gli stessi della direttiva 2004/54/CE, vengono suddivisi in due categorie:

- 1) *requisiti organizzativi*: riguardano l'organizzazione della sicurezza all'interno della galleria e la definizione dei ruoli e delle responsabilità;
- 2) *requisiti tecnici*: riguardano l'infrastruttura ed i suoi equipaggiamenti.

### **2.9.1 Obiettivi di sicurezza e metodologia di analisi di rischio**

La metodologia presentata si riferisce esclusivamente all'analisi degli eventi considerati critici nello specifico ambiente confinato delle gallerie, vale a dire incendi, collisioni con incendio, sversamenti di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche e nocive.

Eventi propri dell'incidentalità stradale, connessi a caratteristiche geometriche dell'infrastruttura e non indotti dallo specifico ambiente galleria, che non comportino per l'utenza rischi aggiuntivi rispetto ai rischi connessi alla circolazione stradale, sono da considerarsi e fronteggiarsi per la prevenzione nell'ambito della regolamentazione del traffico e della progettazione stradale. Le vittime di questi ultimi incidenti vanno contabilizzate nell'ambito dell'incidentalità stradale.

L'*Analisi di Rischio Quantitativa* è la metodologia analitica e ben definita, identificata come idonea per determinare il livello di rischio proprio delle gallerie presenti sulla rete stradale italiana recependo le raccomandazioni contenute nella Direttiva 2004/54/CE inerente i Requisiti Minimi di Sicurezza per le gallerie presenti sulla rete stradale transeuropea.

Questo studio dei tunnel stradali deve essere sviluppato adottando un approccio sistemico adatto allo specifico ambito del sistema galleria.

Il livello di dettaglio da adottare nell'applicazione di tale metodologia, al sistema galleria, deve consentire la determinazione della salvabilità degli utenti per scenari derivanti dagli eventi incidentali considerati critici nello specifico ambiente "Galleria" e deve essere mirato ad ottenere una misura quantitativa del rischio associato alla singola infrastruttura, su un fissato lasso temporale e con riferimento a ben definiti indicatori quantitativi.

I requisiti minimi di sicurezza sono prevalentemente preposti a svolgere un ruolo specifico di protezione, mitigazione o inibizione del potenziale incremento di pericolosità dell'evento iniziatore (come per esempio la potenza termica di un focolaio), nonché di facilitazione delle azioni di auto-soccorso per l'esodo e di soccorso in condizioni di emergenza. Alcuni dei suddetti requisiti svolgono anche un ruolo generale di prevenzione in condizioni di esercizio.

L'analisi deve essere sviluppata in tutte le circostanze indicate nel Decreto ed in particolare per ogni galleria che, non ottemperando ai requisiti minimi obbligatori, necessita dell'adozione di misure di sicurezza alternative al fine di dimostrare che esse siano in grado di garantire un livello di sicurezza equivalente od accresciuto.

#### **2.9.1.1 Scopo dell'analisi**

L'Analisi di Rischio ha lo scopo di misurare, nell'ambito di applicazione del presente decreto, il livello di rischio di una galleria stradale in termini di opportuni indicatori quantitativi.

Viene richiesta un'analisi di tipo comparativo per un tunnel esistente che presenti un qualche deficit nei requisiti minimi ascritti al gruppo di appartenenza.

La *galleria virtuale* rappresenta la galleria identificata dagli stessi parametri di sicurezza dell'infrastruttura in esame e che possiede tutti i requisiti minimi obbligatori del gruppo di appartenenza caratterizzati da specifiche prestazioni in assenza di malfunzionamento.

La comparazione viene condotta tra la galleria virtuale e quella reale con un adeguamento progettuale realizzato introducendo requisiti alternativi e misure di sicurezza compensative a parità di condizioni di funzionamento.

Le condizioni prestazionali sono definite in termini di affidabilità ed efficienza dei dispositivi e dei sottosistemi che realizzano le misure di sicurezza.

### **2.9.1.2 Metodologia di analisi**

La metodologia di un'Analisi di Rischio Quantitativa si deve riferire ad una galleria determinata e deve tener conto di:

- incidentalità caratteristica della galleria, rilevata o di progetto;
- tutti gli elementi inerenti alle caratteristiche progettuali della stessa, come la lunghezza, la geometria e la pendenza;
- caratteristiche prestazionali dei requisiti di sicurezza di cui la galleria stessa è dotata;
- condizioni di traffico che incidono sulla sicurezza, quali il volume, la composizione ed il tipo di traffico, in particolare la percentuale di veicoli pesanti in transito giornaliero.

Tale metodologia considera una galleria con le sue specifiche caratteristiche, localizzata sul territorio ed in interazione con l'ambiente circostante.

I sottosistemi di sicurezza determinano la risposta del sistema alle condizioni di emergenza e conseguentemente definiscono quelle di pericolo per la popolazione esposta agli eventi critici possibili.

Gli scenari incidentali e la loro evoluzione in galleria in termini di pericolosità sono rappresentati mediante modelli che includano come elementi costitutivi *l'albero delle cause*, *l'evento critico iniziatore* e *l'albero degli eventi*.

L'evento critico iniziatore è caratterizzato in termini di probabilità di accadimento e pericolosità potenziale sulla base di evidenze statistiche, eventualmente integrate da informazioni disponibili per la singola galleria con

riferimento ai tassi di incidentalità rilevati ed alle specificità progettuali della stessa.

L'albero degli eventi è caratterizzato in termini di probabilità di accadimento degli eventi critici iniziatori e di probabilità condizionate di evoluzione lungo i singoli specifici rami, come espressione dell'affidabilità e dell'efficienza delle misure di sicurezza installate o previste.

Gli eventi terminali dei rami dell'albero degli eventi, determinati in numero dalle combinazioni mutuamente esclusive delle azioni di condizionamento esercitate dalle misure mitigative previste, individuano gli scenari possibili di emergenza.

La salvabilità degli utenti in una specifica galleria viene determinata attraverso la quantificazione e la zonizzazione del flusso del pericolo all'interno della struttura.

Le diverse zone del flusso del pericolo individuano le condizioni nelle quali si realizza il processo di esodo degli utenti dalla galleria.

I risultati della modellazione del flusso del pericolo costituiscono i dati di ingresso per la simulazione del processo di esodo.

Il numero degli utenti coinvolti in questa fase è determinato attraverso la formulazione e la soluzione di idonei modelli di formazione delle code nella galleria analizzata.

I risultati dell'analisi di rischio sono utilizzati per costruire diversi indicatori quantitativi del rischio, a seconda delle necessità:

- il rischio come valore atteso del danno si ottiene come somma dei prodotti tra le probabilità dei singoli eventi critici iniziatori e le corrispondenti sommatorie delle probabilità degli eventi terminali dei singoli rami dell'albero moltiplicate per i corrispondenti indicatori di danno espressi in numero di vittime normalizzato all'anno;
- il rischio come distribuzione delle probabilità di superamento di predeterminate soglie di danno viene rappresentato graficamente sul piano  $F - N$  (dove  $F$  indica la probabilità di superamento della soglia e  $N$  il numero di fatalità) dalla distribuzione cumulata complementare (probabilità di superamento delle soglie di danno) ottenuta in

corrispondenza dei valori degli indicatori di danno (soglie di danno) associati agli eventi terminali dei singoli rami dell'albero degli eventi.

### 2.9.1.3 Obiettivi di sicurezza e criteri di accettabilità

Gli obiettivi di sicurezza ed i criteri di accettabilità del rischio per le gallerie stradali, da applicare ad ogni singola canna nel caso di gallerie a più fornici indipendenti, sono rappresentati dalle linee soglia riportate nella figura 2.10 seguente.

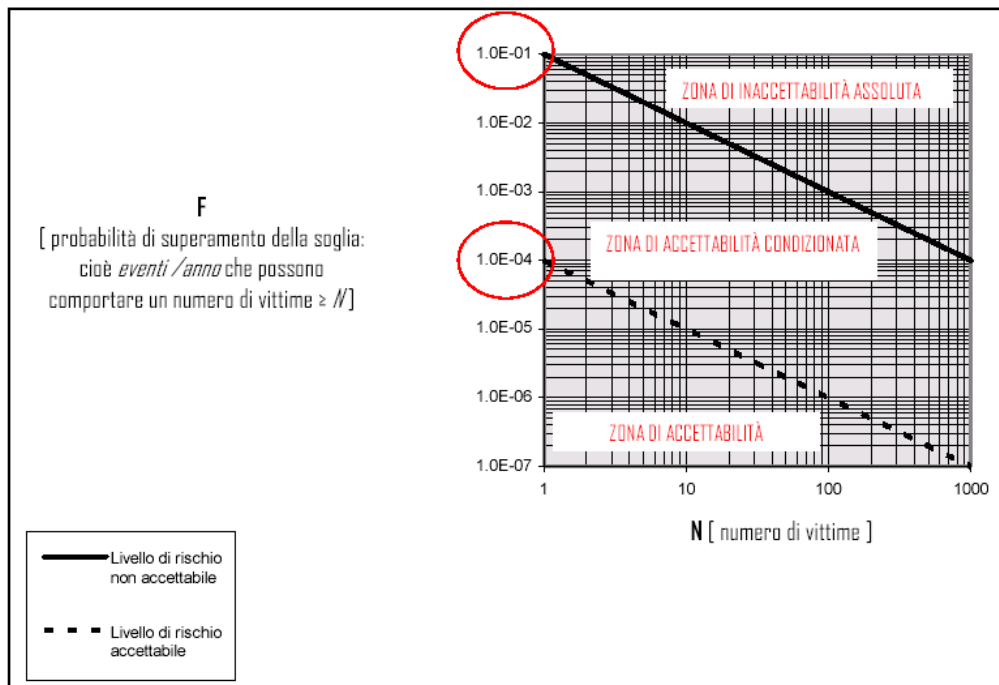


Figura 2.10: linee di soglia rappresentanti i criteri di accettabilità del rischio per gallerie stradali.

Il livello di rischio accettabile rappresenta un riferimento utile alla Commissione, per la valutazione dei risultati dell'Analisi di Rischio effettuata secondo il criterio ALARP (AS LOW AS REASONABLY POSSIBLE).

In tutti i casi previsti dal decreto, incluso il caso in cui si debba verificare il livello di rischio di una galleria con caratteristiche speciali, si deve direttamente confrontare la distribuzione cumulata complementare della galleria reale con il limite di rischio tollerabile.



Quando viene richiesta l'analisi di rischio quantitativa con criterio comparativo per la dimostrazione dell'equivalenza garantita da misure compensative, tale analisi deve essere condotta sulla galleria reale dotata di requisiti integrativi verificando che il valore atteso del danno della galleria in esame sia uguale o inferiore a quello della galleria virtuale a parità di condizioni di funzionamento dei sottosistemi.

Ai fini dell'analisi di rischio dovranno essere usati i dati ricavati dalla Banca Dati prevista nell'articolo 13, oppure provenienti da fonti ufficiali o reperibili in letteratura e ritenuti significativi dalla Commissione permanente per le gallerie.

La Commissione, dopo un opportuno periodo di osservazione, si riserva, in base all'evoluzione ed alla previsione del traffico e dell'incidentalità specifica delle gallerie, di modificare i termini di applicazione della presente procedura.

## **2.10 Circolare ANAS n. 17 del 2006**

*“Linee guida per la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali”.*

Queste linee guida nascono dalla Direzione Progettazione Anas nell'intento di costruire uno strumento che “misurasse” i provvedimenti da adottare ottimizzando i costi, nel senso anche di ampliare i sistemi e le misure di sicurezza senza prevedere misure che si dimostrassero inefficaci o, ancor di più, inutili. Nel contempo, le numerose soluzioni che arrivavano dal mondo della progettazione, dovevano essere governate verso criteri di uniformità ed omogeneità.

In quest'ambito nascono le Linee Guida per la Progettazione della Sicurezza nelle Gallerie Stradali che tengono anche conto di tutti quei provvedimenti normativi nazionali ed internazionali che nel frattempo vengono emanati, quali la Direttiva Europea per la Sicurezza delle gallerie della rete transeuropea ed i decreti ministeriali che definiscono le caratteristiche geometriche delle gallerie stesse.

Quindi è possibile affermare che questo documento risponde all'esigenza dell'ANAS di dotarsi di uno strumento che garantisca omogeneità nelle scelte progettuali relative alla sicurezza nelle gallerie della rete stradale nazionale.

Come si vedrà meglio in seguito, vi sono differenze fra le prescrizioni della Direttiva Europea 54/2004/CE e le cosiddette "prescrizioni Anas".

Queste differenze sono rappresentate nella tabella 2.1 che caratterizza in termini di prestazioni le misure di sicurezza previste dalla Direttiva integrate da suggerimenti progettuali derivanti dalla buona pratica.

	Azione		Standard	Riferimento	Pericolo (ARP)
	Preventiva	Proteettiva			
Corsie di emergenza	*		Presenti	Marciapiedi e/o piazzole sosta	Mancanti
Piazzole di sosta	*		600 m	1000 m	> 1500 m
Uscite di emergenza		*	300 m	500 m	1000 m
Larghezza porte		*	150 cm	120 cm	90 cm
Larghezza marciapiedi		*	120 cm	90 cm	60 cm
Percorsi d'esodo		*	Liberi-rettilinei	Liberi	Ostacoli- Barriere-Tortuosità
Drenaggio	*		Presente (ADR)	Mancante (ADR frequenza ridotta)	Mancante (ADR)
Portata drenaggio			100 l/s	50 l/s	<50 l/s
Illuminazione ordinaria	*		Rinforzo regolato + Illuminazione Permanente + Illuminazione Sicurezza	Rinforzo non regolato + Illuminazione Permanente + Illuminazione Sicurezza	Illuminazione Permanente
Illuminazione esodo		*	5 lux	3 Lux	1 lux
Segnaletica esodo		*	35 m	75 m illuminata	100 m
Ventilazione longitudinale	*	*	Monodirezionali < 3000 m Bidirezionali < 1000 m (VDF = 300 m)	Monodirezionali 4000 m Bidirezionali 1500 m (VDF = 500 m)	Monodirezionali > 5000 m Bidirezionali > 1500 m (VDF > 500 m)
Ventilazione semitrasversale	*	*	Monodirezionali > 4000 m; urbane > 1500 m Bidirezionali > 1500 m (VDF = 500 m)	Monodirezionali 6000 m; urbane 2000 m Bidirezionali 3000 m (VDF = 500 m)	Monodirezionali > 7000 m o urbane > 3000 m Bidirezionali > 3000 m (VDF > 500 m)
Ventilazione naturale			1,5 m/s	2 m/s	4 m/s
Velocità longitudinale max			5 m/s	6 m/s	7 m/s
Velocità critica		*	4 m/s	2,5 m/s	1,5 m/s
Velocità controllata max		*	1 m/s	1,5 m/s	2 m/s
Portata estrazione fumi		*	200-250 m³/s	150 m³/s	100 m³/s
Interdistanza bocchette estrazione		*	70	100	150
Tempo inversione ventilazione		*	120 s	180 s	300 s
Resistenza al fuoco ventilatori, serrande motorizzate, supporti			400°C 90 min	250 ° C 90 min	Mancante
Ventilazione uscite emergenza		*	Sanitaria + pressurizzazione	Pressurizzazione	Mancante
Velocità porte aperte vie di fuga		*	2-3 m/s	0,75	Mancante
Pressurizzazione		*	50 Pa	30 Pa	Mancante
Ricambio aria esterna		*	50 m³/h persona	20 m³/h persona	Mancante
Comunicazioni	*	*	PMV+GSM+SOS +Ritrasmissioni	PMV + SOS	Mancante
SOS	*		150 m	250 m	>500 m
Tempo allertamento servizi soccorso	*		60 s	120 s	180 s
Rilevazione	*		Telecamere + cavo	Cavo + OP o Telecamere +CO o OP	OP o CO o cavo
Tempi Rilevazione	*		120 s	180 s	300 s
Impianto antincendio		*	Mitigazione+Idranti	Idranti	Mancante
Interdistanza idranti			150 m	250 m	> 300 m
Tempo mitigazione autocarro		*	120 s	180-240 s	300 s

Tabella 2.1: misure di sicurezza previste dalla direttiva con integrazioni.

Le righe evidenziate in azzurro concernono variabili di progetto non contemplate in modo esplicito dalla Direttiva.

I valori riportati nella colonna denominata “Standard” assicurano, quando adottati, la realizzazione di una struttura conforme allo Standard di Sicurezza Anas.

I valori riportati nella colonna denominata “Riferimento” sono corrispondenti alla buona pratica corrente e se adottati assicurano la formulazione di un progetto, o la realizzazione di una struttura, caratterizzata da un livello di sicurezza accettabile, benché prossimo al limite di tollerabilità del rischio.

I valori riportati nella colonna denominata “Pericolo (ARP)”, individuati mediante l'applicazione della metodologia dell'analisi di rischio, forniscono livelli di sicurezza inaccettabili nella formulazione di un progetto, o nella realizzazione di una struttura.

### **2.10.1 Procedura di progettazione della sicurezza per una galleria stradale**

Il metodo di progettazione della sicurezza si basa su tre concetti fondamentali:

- 1) quantificazione della sicurezza, tradotta in termini di rischio accettato;
- 2) caratterizzazione in termini di affidabilità ed efficienza delle barriere di sicurezza;
- 3) casistica degli scenari di esodo possibili in caso di evento incidentale.

Se condotta secondo i dettami delle linee guida, la progettazione della sicurezza si prefigge alcuni scopi così sintetizzati:

- creare una procedura completa e unica in modo da integrare le metodologie di progettazione già esistenti;
- quantificare il livello del rischio di un progetto o di un'opera esistente e successivamente verificare se tale rischio risulti accettabile o meno;
- creare un nuovo metodo di progettazione basato su di un metodo cosiddetto probabilistico prestazionale.

La procedura di progettazione della sicurezza adottata nelle Linee Guida è sintetizzata nella figura 2.11 seguente.

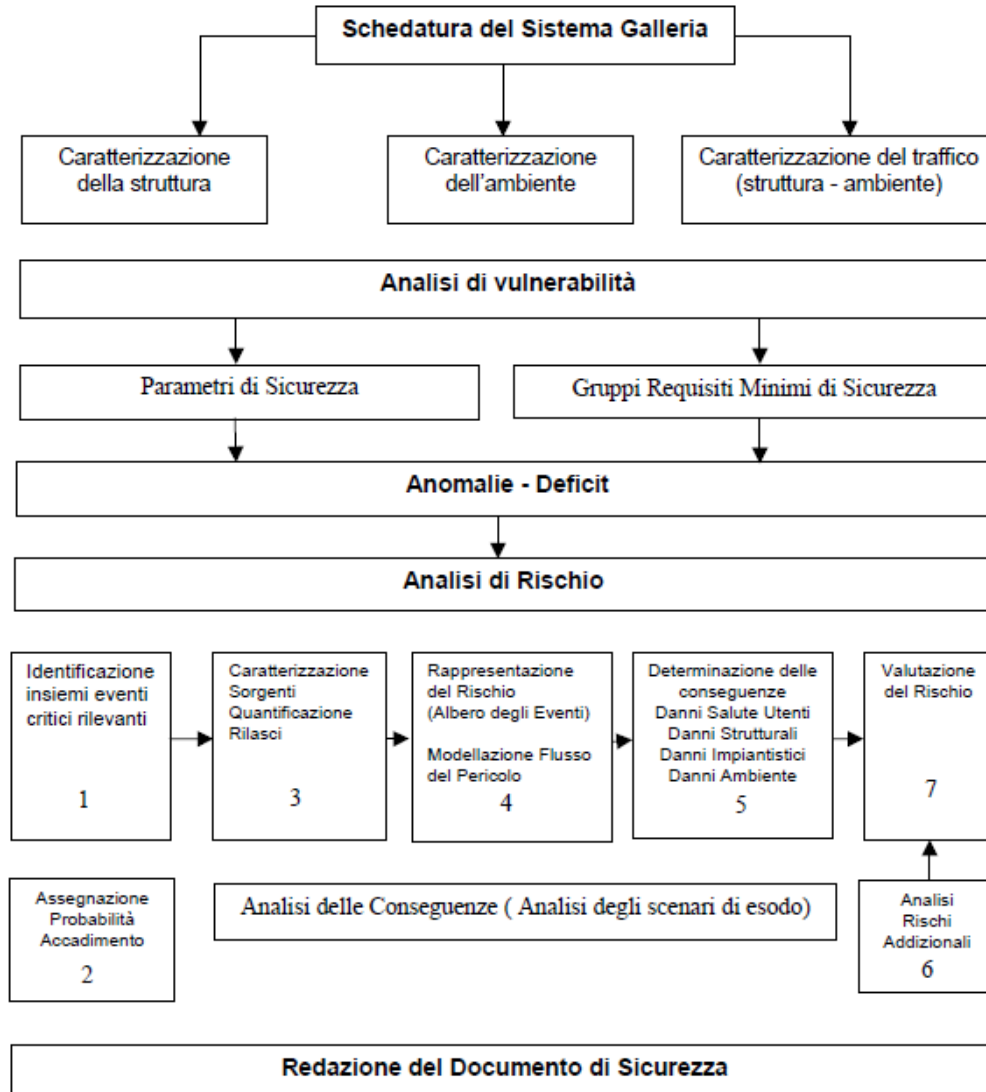


Figura 2.11: procedura di progettazione della sicurezza di una galleria stradale.

Pertanto, la documentazione di sicurezza di una galleria stradale deve comprendere:

- risultati derivanti dalla *schedatura della galleria* e delle relative zone di imbocco;

- risultati di un'*analisi di vulnerabilità* della galleria, mirata alla definizione delle sue anomalie ed alla verifica del rispetto dei requisiti minimi di sicurezza previsti dalla Normativa;
- risultati dell'*analisi di rischio* per le criticità che non ottemperano i requisiti minimi obbligatori;
- procedure di controllo e gestione dell'infrastruttura.

### **2.10.1.1 Schedatura del sistema galleria**

Il modello di schedatura del sistema galleria è articolato in un insieme di schede appartenenti a tre classi distinte e complementari:

- 1) *schede di struttura*;
- 2) *schede di evento*;
- 3) *schede di intervento*.

Le *schede di struttura*, raccolte dagli organi competenti, potrebbero costituire la base per la costruzione di una banca dati rigorosa ed omogenea, a disposizione degli esperti, per effettuare indagini mirate da utilizzare nell'analisi di rischio di eventi incidentali nell'ambito del sistema trasporti.

Esse comprendono:

- dati di identificazione geografica e giuridica dell'opera;
- dati di caratterizzazione dell'ambiente circostante;
- dati di caratterizzazione geometrica dell'opera;
- dati statistici sul traffico e sull'incidentalità nella struttura e nell'ambiente circostante;
- dati sinottici sui sistemi di sicurezza installati o previsti;
- dati sulle esercitazioni periodiche su scala reale ovvero sulle simulazioni di eventi incidentali rilevanti condotte.

Le *schede di evento* potrebbero costituire la base per aggiornare le misure di sicurezza ed impiegare in modo ottimale i sistemi di sicurezza nell'azione di intervento.

Queste comprendono tutti i dati relativi a:

- tempistica di intervento;
- personale impiegato;
- automezzi ed attrezzature impiegate;
- stato degli impianti;
- scenario incidentale;
- operazioni di intervento.

Le *schede di intervento* potrebbero costituire la base per ottimizzare i tempi e le strategie di intervento, razionalizzare la gestione del personale e delle attrezzature, affinare la logistica nell'emergenza.

La schedatura del sistema galleria può essere effettuata mediante le schede riportate nell'allegato 2 delle linee guida; alcune di queste vengono rappresentate dalle figure 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19 (V. Vignali, 2009).

Scheda 1 IDENTIFICATIVO DEL PROGETTO			
Nome Tratta Stradale			
Nome della Galleria			
Anno di costruzione		Anno di inizio gestione	
Società di Gestione			
Numero gallerie presenti sulla tratta			
Tipologia progetto		Affidamento	Consegna
<input type="checkbox"/> Studio fattibilità			
<input type="checkbox"/> Progetto preliminare			
<input type="checkbox"/> Progetto definitivo			
<input type="checkbox"/> Progetto definitivo per appalto integrato			
<input type="checkbox"/> Progetto esecutivo			
<input type="checkbox"/> Revisione di progetto			
<input type="checkbox"/> Progetto di adeguamento			
Tipologia progetto		Galleria di nuova realizzazione	<input type="checkbox"/>
		Galleria esistente	<input type="checkbox"/>
		Galleria in corso di realizzazione	<input type="checkbox"/>
		Altro:	<input type="checkbox"/>
Osservazioni			

DATI IDENTIFICATIVI

TIPO DI PROGETTO

Figura 2.12: schedatura di una galleria: *identificativo del progetto*.

Scheda 2 IDENTIFICATIVO DELLA GALLERIA			
Nome Galleria			
Anno di costruzione			
Nome Tratta Viaria			
Classe tratta viaria			
Tipologia		Costruzione	
Autostradale	<input type="checkbox"/>	Naturale	<input type="checkbox"/>
Stradale urbano	<input type="checkbox"/>	Artificiale	<input type="checkbox"/>
Stradale extra-urbano	<input type="checkbox"/>	Trincea coperta	<input type="checkbox"/>
Altro	<input type="checkbox"/>	Sottomarina	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	Altro	<input type="checkbox"/>
Numero canne			
Direzionalità	Unidirezionale <input type="checkbox"/>	Bidirezionale <input type="checkbox"/>	
Canna 1*	Direzione		
Progressiva Chilometrica			
Coordinate UTM			
Localizzazione Portale di ingresso		Orientamento	
Quota s.l.m.			
Localizzazione Portale di uscita		Orientamento	
Quota s.l.m.			
Canna 2	Direzione		
Progressiva Chilometrica			
Coordinate UTM			
Localizzazione Portale di ingresso		Prov.	
Quota s.l.m.			
Localizzazione Portale di uscita		Prov.	
Quota s.l.m.			
Trasporto ADR	NO	<input type="checkbox"/>	
	SI	Libero	<input type="checkbox"/>
		Scortato	<input type="checkbox"/>
		Limitato nel Tempo	<input type="checkbox"/>
		Limitato nella Tipologia	<input type="checkbox"/>
Accessibilità ai fonici	Canna 1	SI <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
	Canna 2	SI <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>

DATI IDENTIFICATIVI

TIPOLOGIA DELL'OPERA

SPECIFICHE TOPOGRAFICHE DEGLI IMBOCCHI

TRASPORTO ADR

Figura 2.13: : schedatura di una galleria: *identificativo della galleria*.

**SPECIFICHE GEOMETRICHE  
DELLE CANNE**

**SPECIFICHE DEI  
COLLEGAMENTI DI  
SICUREZZA**

**CARATTERISTICHE DEL  
TRACCIATO**

**SPECIFICHE DEI LUOGHI  
SICURI**

Scheda 3 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DELLA GALLERIA				
<b>Canna 1*</b>				
Direzione				
Lunghezza		m		
Larghezza		m		
Altezza		m		
Pendenza media %				
Forma della Sezione				
Contro soffitto	<input type="checkbox"/>	N° vani	Area sezione [m <sup>2</sup> ]	
Cunicolo sotto traccia	<input type="checkbox"/>	N° vani	Area sezione [m <sup>2</sup> ]	
N° Corsie	N° Corsie emergenza			
Area della Sezione m <sup>2</sup>				
<b>Canna 2</b>				
Direzione				
Lunghezza		m		
Larghezza		m		
Altezza		m		
Pendenza Media %				
Forma della Sezione				
Contro soffitto	<input type="checkbox"/>	N° vani	Area sezione [m <sup>2</sup> ]	
Cunicolo sotto traccia	<input type="checkbox"/>	N° vani	Area sezione [m <sup>2</sup> ]	
N° Corsie	N° Corsie emergenza			
Area della Sezione m <sup>2</sup>				
Numero by-pass / gallerie pedonali	N°	Interdistanza	m	
Numero by-pass / gallerie carrabili	N°	Interdistanza	m	
Numero svincoli interni	Interdistanza		m	
Altezza sagoma limite	m			
Marciaipiedi	<input type="checkbox"/>	N° per carreggiata	Larghezza	m
Pendenza (≤ 10%) %				
Caratteristiche delle Vie di Accesso				
Resistenza al Carico (≥ 20 t) T				
Altezza Libera (≥ 4 m) m				
Raggio di Volta (≥ 3 m) m				
<b>Tracciato</b>				
Imbocchi in curva				
Numero curve in galleria				
Raggio di curvatura max min med				
Restringimenti di carreggiata in galleria				
Svincoli o incroci in galleria				
<b>Sistema di Vie di Uscita</b>				
Lunghezza m Sezione m <sup>2</sup>				
<b>Percorsi di Esodo</b>				
Interno Galleria <input type="checkbox"/>				
Canna Parallela <input type="checkbox"/>				
Galleria Servizio <input type="checkbox"/>				
Canale Ventilazione <input type="checkbox"/>				
<b>Luoghi sicuri</b>				
Dinamici n°				
Capacità n° persone				
Classe REI				
Filtro antifumo <input type="checkbox"/>				
Dimensioni m				
Spaziatura m				
Impianto Ventilazione <input type="checkbox"/>				
Aria esterna <input type="checkbox"/>				
Impianto Trasmissioni <input type="checkbox"/>				
Videocamera TV <input type="checkbox"/>				
<b>Uscite di Emergenza</b>				
Uscite Luoghi Sicuri Statici		N°	Uscite Dirette Esterno	N°
Uscite Luoghi Sicuri Dinamici		N°	Uscite Canna Parallela	N°
Uscite Canale Ventilazione		N°	Uscite Galleria Servizio	N°
Uscite By-pass		N°	Uscite	N°
<b>Piazze di sosta</b>				
<input type="checkbox"/>				
Interdistanza m				
<b>Attraversamento all'esterno dei portali</b>				
Portale 1 <input type="checkbox"/>				
Portale 2 <input type="checkbox"/>				
Osservazioni				

Figura 2.14: schedatura di una galleria: *caratterizzazione geometrica della galleria.*



Scheda 4 - CARATTERISTICHE AMBIENTALI			
Località			
Zona climatica			
Temperatura media invernale		°C	
Temperatura media estiva		°C	
Precipitazioni		Giorni/anno	
Nebbia		Giorni/anno	
Velocità media del vento ai portali		m/s	Dev. St
Direzione prevalente del vento		°Nord	Dev. st.
Differenza di pressione barometrica tra i portali		Pa	
Fenomeni anemologici anomali storici catalogati			
Categoria di stabilità atmosferica prevalente			
Distanza comando VVF		km	
Distanza comando servizi di pubblica sicurezza		km	
Distanza servizi di pronto intervento sanitario		km	
Distanza struttura sanitaria attrezzata per l'emergenza		Km	
Distanza eliporto - aeroporto		Km	
Viabilità alternativa		Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
Tipologia viabilità alternativa		Autostradale-Urbana-Extraurbana	
Presenza di intersezioni a valle dei portali di uscita		Precedenza	<input type="checkbox"/>
		Semaforo	<input type="checkbox"/>
		Rotonda	<input type="checkbox"/>
Centro abitato prossimo alla struttura			
Distanza centro abitato		km	
Densità media di popolazione nella zona di influenza dei portali		Portale 1 (abitanti /km <sup>2</sup> )	Portale 2 (abitanti /km <sup>2</sup> )
<b>Portale 1</b>			
Distanza recettore sensibile prossimo al portale			
Tipologia recettore			
Zonizzazione acustica		Classe	
<b>Portale 2</b>			
Distanza recettore sensibile prossimo al portale			
Tipologia recettore			
Zonizzazione acustica		Classe	
<b>Camini ventilazione</b>			
Distanza recettore sensibile prossimo al portale			
Tipologia recettore			
Zonizzazione acustica		Classe	
<b>Presenza di impianti di processo, sistemi di trasporto dell'energia, terminali sistemi di trasporto</b>			
Impianti chimici	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Impianti petrolchimici	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Impianti di produzione industriale	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Porto marittimo	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Dogana	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Terminal-nodo intermodale	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Centri smistamento merci	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Oleodotti	<input type="checkbox"/>	Distanza km	
Gasdotti	<input type="checkbox"/>	Distanza km	

**DATI METEOROLOGICI**

**SPECIFICHE SUI SERVIZI DI PRONTO INTERVENTO**

**DATI DI POPOLAZIONE AGLI IMBocchi**

**DATI SUGLI IMPIANTI INDUSTRIALI CIRCOSTANTI**

Figura 2.15: schedatura di una galleria: *caratteristiche ambientali*.

**DATI DI TRAFFICO DELLA GALLERIA**

**DATI DI TRAFFICO SULLA VIABILITA' ALTERNATIVA**

Scheda 5.1		TRAFFICO CANNA 1 / DIREZIONE 1			
Tipologia di Traffico	A. Leggero	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	B. Misto	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	C. Pesante	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
Composizione traffico	Veicoli Leggeri	%	Dev. Standard		
	Veicoli Pesanti	%	Dev. Standard		
Regime di Traffico	Rado	<input type="checkbox"/>	Frequenza	sulla tratta	
	Scorrevole	<input type="checkbox"/>	Frequenza	sulla tratta	
	Congestionato	<input type="checkbox"/>	Frequenza	sulla tratta	
Volume di traffico in ingresso dal casello di prossimità	A. Leggero	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	B. Misto	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	C. Pesante	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
Trasporto ADR	<input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Sulla tratta <input type="checkbox"/> Al casello di prossimità				
	<input type="checkbox"/> Si	<input type="checkbox"/> Libero			
		<input type="checkbox"/> Scortato			
		<input type="checkbox"/> Limitato nel tempo			
			<input type="checkbox"/> Limitato nella tipologia		
Traffico Medio Giornaliero (media annua)		Veicoli/Giorno			
Traffico Medio Giornaliero (massimo mensile)		Veicoli/Giorno			
Stagionalità					
Traffico di Punta		Veicoli/Ora	Ora/e di punta		
Scheda 5.3		TRAFFICO AMBIENTE CIRCOSTANTE			
Viabilità alternativa					
Tipologia di Traffico	A. Leggero	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	B. Misto	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	C. Pesante	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
Composizione traffico	Veicoli Leggeri	%	Dev. standard		
	Veicoli Pesanti	%	Dev. standard		
Regime di Traffico	Rado	<input type="checkbox"/>	Frequenza	sulla tratta	
	Scorrevole	<input type="checkbox"/>	Frequenza	sulla tratta	
	Congestionato	<input type="checkbox"/>	Frequenza	sulla tratta	
Volume di traffico in ingresso dal casello di prossimità	A. Leggero	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	B. Misto	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
	C. Pesante	<input type="checkbox"/>	% su (A+B+C)	% sulla tratta	
Trasporto ADR	<input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Sulla tratta <input type="checkbox"/> Al casello di prossimità				
	<input type="checkbox"/> Si	<input type="checkbox"/> Libero			
		<input type="checkbox"/> Scortato			
		<input type="checkbox"/> Limitato nel tempo			
			<input type="checkbox"/> Limitato nella tipologia		
Traffico Medio Giornaliero		Veicoli/Giorno			
Traffico Medio Giornaliero (massimo mensile)		Veicoli/Giorno			
Stagionalità					
Traffico di Punta		Veicoli/Ora	Ora/e di punta		

Figura 2.16: schedatura di una galleria: *traffico*.

Scheda 6.1		SINOSI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELLA GALLERIA		
Sistema di Illuminazione	Ornamento		<input type="checkbox"/>	
	Sicurezza	Linea Preferenziale Cabina	<input type="checkbox"/>	
		Linea Preferenziale G.E.	<input type="checkbox"/>	
	Evacuazione <input type="checkbox"/>	Batterie Tampone		<input type="checkbox"/>
Picchetti luminosi			<input type="checkbox"/>	
	Altezza		m	
Sistema di Ventilazione				
Tipologia	Naturale		<input type="checkbox"/>	
	Longitudinale		<input type="checkbox"/>	
	Semitrasversale/Trasversale	Invertibile		<input type="checkbox"/>
		Non Invertibile		<input type="checkbox"/>
	Trasversale <input type="checkbox"/>	Ibrido		<input type="checkbox"/>
Ibrido			<input type="checkbox"/>	
Configurazione	Numero centrali		Numero camini	
	Numero tratti		Lunghezza max tratto	
			m	
Canna 1	Numero acceleratori			
	Diametro acceleratori		mm	
	Spinta acceleratori		N	
Canna 2	Numero acceleratori			
	Diametro acceleratori		mm	
	Spinta acceleratori		N	
Scheda 6.2		SINOSI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELLA GALLERIA		
Sistema di Comunicazione	Segnalazione Acustica	Altoparlanti	<input type="checkbox"/>	
		Guida sonora	<input type="checkbox"/>	
	Segnalazione Ottica	TV-CC		<input type="checkbox"/>
		Pannelli a Messaggio Variabile		<input type="checkbox"/>
		Ai portali		<input type="checkbox"/>
		Interdistanza in galleria		m
		Semafori		<input type="checkbox"/>
		Ai portali		<input type="checkbox"/>
	Segnalazione Radio	Interdistanza in galleria		m
		Segnaletica di Sicurezza		<input type="checkbox"/>
Cavo Fessurato			<input type="checkbox"/>	
Messaggi agli utenti			<input type="checkbox"/>	
	Frequenze Attive	PS	<input type="checkbox"/>	
		VVF	<input type="checkbox"/>	
			<input type="checkbox"/>	
Sistema Servizi Ausiliari		Circuito Aria Compressa	<input type="checkbox"/>	
		Altro:	<input type="checkbox"/>	
Stazioni di emergenza	Interdistanza		m	
	Telefono	<input type="checkbox"/>	Estintori	
	Pulsante allarme	<input type="checkbox"/>	Armadio/ticchia	
Monitoraggio parametri Ambientali	Anemometri	<input type="checkbox"/>	Sensori CO <sub>2</sub>	
	Sensori CO	<input type="checkbox"/>	Opacimetri	
	Sensori NOx	<input type="checkbox"/>		
Sistema di Rivelazione Segnalazione Incendio	Rivelatori Fumi	<input type="checkbox"/>	Opacimetri	
	Sensori CO	<input type="checkbox"/>	Rivelatori Gas Tossici	
	Sensori CO <sub>2</sub>	<input type="checkbox"/>	Telecamere	

Figura 2.17: schedatura di una galleria: sistemi di sicurezza.

Scheda 7.1 <b>COMPORAMENTO AL FUOCO DELLA STRUTTURA</b>				
<b>Costruzione</b>				
<b>Rivestimento</b>	<b>Tipo calcestruzzo</b>			
	Resistenza a compressione	Mpa		
	Porosità			
	Additivi speciali	Fibre: polimeriche, metalliche		
	Materiale di rivestimento			
	Spessore rivestimento	Mm		
	<b>Materiale armatura</b>			
	Carico di rottura	Mpa		
	Carico di rottura residuo	%	Temperatura	°C
	Spessore copriferro	Mm		
	Classe di resistenza strutturale	R		
	Resistenza spalling	Min		
	<b>Controsoffitto</b>	<b>Tipo calcestruzzo</b>		
Resistenza a compressione		Mpa		
Porosità				
Additivi speciali		Fibre: polimeriche, metalliche		
Materiale di rivestimento				
Spessore rivestimento		Mm		
Materiale tasselli di fissaggio				
Carico di rottura		Mpa		
carico di rottura residuo		%	Temperatura	°C
<b>Materiale armatura</b>				
Carico di rottura		Mpa		
Carico di rottura residuo		%	Temperatura	°C
Spessore copriferro		Mm		
Classe di resistenza	REI			
Resistenza spalling	Min			
<b>Cunicoli Sotto traccia</b>	<b>Tipo calcestruzzo</b>			
	Resistenza a compressione	Mpa		
	Porosità			
	Additivi speciali	Fibre: polimeriche, metalliche		
	Materiale di rivestimento			
	Spessore rivestimento	Mm		
	<b>Materiale armatura</b>			
	Carico di rottura	Mpa		
	carico di rottura residuo	%	Temperatura	°C
	Spessore copriferro	Mm		
Classe di resistenza	REI			
Resistenza spalling	Min			

Figura 2.18: schedatura di una galleria: *comportamento a fuoco della struttura*.

<b>Emergenza</b>			
<b>Canna 1 fornice di ingresso (se si)</b>			
Esiste interoperabilità tra Canna 1 e Canna 2 SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		Distanza dal fornice dell'innesto della viabilità di emergenza strada al cancello	
Distanza tra fornice e cancello		Tempo medio di percorrenza tra cancello e fornice	
<b>Localizzazione della superficie per la logistica di emergenza</b>			
Dimensione della superficie per la logistica di emergenza		Tempi e mezzi per l'attivazione operativa della superficie per la logistica di emergenza	
Attrezzature, impianti e dotazioni esistenti in piazzale di emergenza			
Tipo di custodia			
<b>Canna 1 fornice di uscita (se si)</b>			
Esiste interoperabilità tra Canna 1 e Canna 2 SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		Distanza dal fornice dell'innesto della viabilità di emergenza strada al cancello	
Distanza tra fornice e cancello		Tempo medio di percorrenza tra cancello e fornice	
<b>Localizzazione della superficie per la logistica di emergenza</b>			
Dimensione della superficie per la logistica di emergenza		Tempi e mezzi per l'attivazione operativa della superficie per la logistica di emergenza	
Attrezzature, impianti e dotazioni esistenti in piazzale di emergenza			
Tipo di custodia			
<b>Canna 2 fornice di ingresso (se si)</b>			
Esiste interoperabilità tra Canna 1 e Canna 2 SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		Distanza dal fornice dell'innesto della viabilità di emergenza strada al cancello	
Distanza tra fornice e cancello		Tempo medio di percorrenza cancello-fornice	
<b>Localizzazione della superficie per la logistica di emergenza</b>			
Dimensione della superficie per la logistica di emergenza		Tempi e mezzi per l'attivazione operativa della superficie per la logistica di emergenza	
Attrezzature, impianti e dotazioni esistenti in piazzale di emergenza			
Tipo di custodia			
<b>Canna 2 fornice di uscita (se si)</b>			
Esiste interoperabilità tra Canna 1 e Canna 2 SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>		Distanza dal fornice dell'innesto della viabilità di emergenza strada al cancello	
Distanza tra fornice e cancello		Tempo medio di percorrenza tra cancello e fornice	
<b>Localizzazione della superficie per la logistica di emergenza</b>			
Dimensione della superficie per la logistica di emergenza		Tempi e mezzi per l'attivazione operativa della superficie per la logistica di emergenza	
Attrezzature, impianti e dotazioni esistenti in piazzale di emergenza			
Tipo di custodia			
Esiste piano di emergenza del Gestore SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Anno di aggiornamento / revisione			
Esiste piano di emergenza del Esterno SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Anno di aggiornamento / revisione			
Osservazioni			

Figura 2.19: schedatura di una galleria: *emergenza*.

Il modello di schedatura proposto non ha carattere cogente. Esso può essere utilizzato per le parti di specifica competenza dai soggetti coinvolti nella progettazione e nella gestione del sistema galleria stradale.

Tuttavia, risulta funzionale al gestore del sistema galleria in quanto consente l'acquisizione dei dati necessari alla redazione di procedure di manutenzione e gestione delle risorse così come alla determinazione dell'affidabilità e dell'efficienza dei sistemi di sicurezza.

### 2.10.1.2 Analisi di vulnerabilità

L'analisi di vulnerabilità di una galleria prevede:

- definizione dei *fattori di pericolo* ad essa propri espressi in funzione dei *parametri di sicurezza*;
- associazione della galleria analizzata al *gruppo di requisiti minimi di sicurezza* ad essa pertinente, sulla base dei parametri di sicurezza;
- la *verifica di conformità* del progetto, mirata all'individuazione di deficit nei requisiti minimi di sicurezza che si manifestano tra la galleria reale e quella virtuale ascritta al relativo gruppo di appartenenza.

#### ***Fattori di pericolo.***

I *fattori di pericolo* per il sistema galleria stradale sono raggruppati in:

- fattori di pericolo connessi alle caratteristiche architettoniche e strutturali dell'opera;
- fattori di pericolo connessi all'ambiente circostante;
- fattori di pericolo connessi al fenomeno traffico.

I fattori di pericolo connessi alle caratteristiche architettoniche e strutturali dell'opera possono essere individuati in termini di:

- anno di costruzione;
- lunghezza (galleria singola, gallerie in serie);
- sezione (larghezza della carreggiata, altezza massima, marciapiedi);
- tracciato (profilo orizzontale e verticale della galleria e delle zone di imbocco);
- tipologia costruttiva (unidirezionale, bidirezionale, corsie di emergenza).

D'altra parte, i fattori di pericolo connessi alle caratteristiche dell'ambiente possono essere individuati in termini di:

- condizioni meteorologiche prevalenti agli imbocchi ed orientazione;
- accessibilità della struttura (accesso agli imbocchi, accesso alla galleria, viabilità alternativa);
- localizzazione sul territorio delle squadre di soccorso.

Infine i fattori di pericolo connessi al traffico possono essere individuati in termini di:

- volume di traffico (traffico giornaliero medio, stagionalità);
- composizione del traffico (traffico pesante, traffico ADR);
- regimi di traffico (traffico scorrevole, traffico congestionato).

I valori limite dei parametri di sicurezza per i quali non si verificano variazioni significative della frequenza di accadimento di eventi incidentali sono riportati nella tabella 2.2. Essi possono essere utilizzati quale riferimento per la definizione di caratteristiche speciali per i parametri di sicurezza richieste dalla Direttiva.

<b>Parametro di sicurezza caratteristico</b>	<b>Unidirezionale</b>	<b>Bidirezionale</b>
Numero di corsie per senso di marcia	3	2
Lunghezza corsie [m]	3,5	3,5
Pendenza [%]	5	3
Raggio di curvatura [m]	100	100
Frazione veicoli pesanti [%]	25	15
Congestione traffico [min/giorno]	30	30
Stagionalità traffico	2	2
Nebbia [% annua]	20	20
Precipitazioni [% annua]	20	20

Tabella 2.2: parametri di sicurezza.

I risultati dell'analisi statistica delle serie storiche di dati sull'incidentalità stradale, mirata all'identificazione dei legami funzionali tra frequenza di accadimento e parametri di sicurezza caratteristici, permettono di definire una scala semi-quantitativa del pericolo.

**Gruppi di requisiti minimi di sicurezza.**

La tabella 2.3 sintetizza i dieci gruppi di requisiti minimi di sicurezza ordinati in funzione della tipologia di galleria, del volume di traffico per corsia, della lunghezza della struttura.

Gallerie unidirezionali	500 <L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	3000<L<4000
VT < 2000 v/g cor	I	II			
2000 < VT < 10000 v/g cor			III	IV	V
Gallerie bidirezionali	500 <L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	3000<L<4000
VT < 2000 v/g cor	VI	VII			
2000 < VT < 10000 v/g cor			VIII	IX	X

Tabella 2.3: gruppi di requisiti minimi di sicurezza.

Una generica galleria, le cui caratteristiche individuate in termini di parametri di sicurezza ricadano all'interno di uno qualsiasi dei suddetti gruppi, deve soddisfare i requisiti minimi di sicurezza ascritti al gruppo.

L'analisi dei rischi deve essere sviluppata per ogni galleria che, non ottemperando i requisiti minimi obbligatori, necessita di soluzioni alternative al fine di dimostrare che esse sono in grado di garantire un livello di sicurezza equivalente od accresciuto rispetto a quello assicurato dai requisiti minimi del gruppo al quale il tunnel in esame appartiene.

Queste osservazioni portano a definire:

- *Galleria virtuale*: una galleria che risponde alle prescrizioni della Direttiva Europea in termini di parametri e requisiti minimi di sicurezza con i sistemi operanti in condizioni ideali;
- *Galleria reale*: una galleria esistente, oppure un progetto di adeguamento o di realizzazione dell'opera, caratterizzati in termini di parametri di sicurezza e requisiti minimi posseduti dalla struttura o previsti nei progetti con i sistemi operanti in condizioni reali.

La figura 2.20 esemplifica l'analisi di vulnerabilità per il sistema galleria stradale.



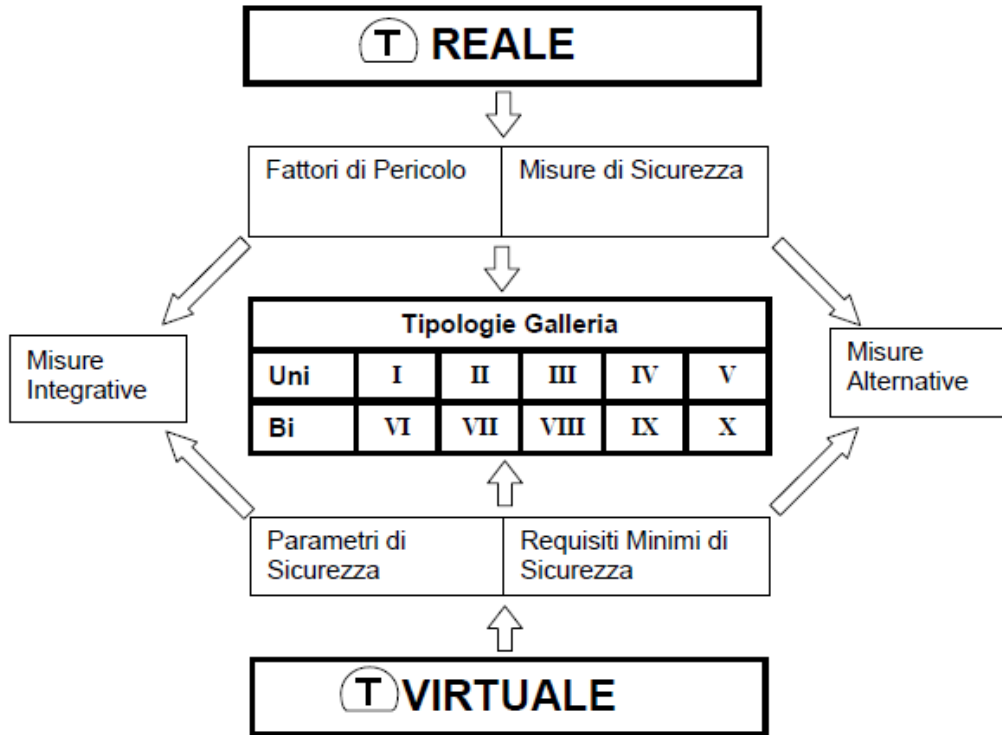


Figura 2.20: analisi di vulnerabilità per il sistema galleria stradale.

***Verifica di conformità.***

La *verifica di conformità* del progetto è mirata all'individuazione di deficit nei requisiti minimi di sicurezza, e può essere sviluppata utilizzando le tabelle 2.4 e 2.5 che rappresentano il sommario delle informazioni relative ai requisiti minimi.

SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI		Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni	
		500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3.000m	>3000m		
<b>MISURE STRUTTURALI</b>	2 o più forni	§2.1					Obbligatorio se le previsioni su 15 anni indicano traffico > 10000 veicoli/corsia.	
	Dislivelli ≤ 5 %	§2.2	*	*	*	*	Obbligatorio a meno che non sia geograficamente possibile.	
	Banchine pedonabili di emergenza	§2.3.1 §2.3.2	*	*	*	*	Obbligatorio se non esiste una corsia di emergenza, a meno che sia rispettata la condizione di cui al punto 2.3.1. Nelle gallerie esistenti sprovviste sia di corsie di emergenza sia di banchine pedonabili di emergenza devono essere adottate misure supplementari e/o rafforzate.	
	Uscite di emergenza almeno ogni 500 m	§2.3.3 §2.3.0	○	○	*	*	La creazione di uscite di emergenza nelle gallerie esistenti deve essere valutata caso per caso.	
	Gallerie trasversali per i servizi di pronto intervento almeno ogni 1500 m	§2.4.1	○	○/●	○	○/●	●	Obbligatorio nelle gallerie a doppio fornice di lunghezza superiore a 1500 m.
	Punti di attraversamento dello spartitraffico al di fuori di ciascun portale	§2.4.2	●	●	●	●	●	Obbligatorio al di fuori delle gallerie a due o più fornici ovunque sia geograficamente possibile.
	Piazzole di sosta almeno ogni 1000 m	§2.5	○	○	○	○/●	○/●	Obbligatorio nelle nuove gallerie bidirezionali > 1500 m sprovviste di corsie di emergenza. Nelle gallerie bidirezionali esistenti > 1500 m in funzione dell'analisi della situazione. Per le gallerie nuove ed esistenti, in funzione della larghezza supplementare utilizzabile della galleria.
	Drenaggio di liquidi infiammabili e tossici	§2.6	*	*	*	*	*	Obbligatorio se è autorizzato il trasporto di merci pericolose.
Caratteristiche ignifughe delle strutture	§2.7	●	●	●	●	●	Obbligatorio se un eventuale cedimento locale può avere conseguenze catastrofiche.	

Tabella 2.4: informazioni relative ai requisiti minimi: *misure strutturali*.

**MISURE IMPIANTISTICHE**

SOMMARIO DELLE INFORMAZIONI RELATIVE AI REQUISITI MINIMI		Traffico ≤ 2000 veicoli per corsia		Traffico > 2000 veicoli per corsia			Condizioni complementari per l'attuazione obbligatoria o osservazioni	
		500-1000m	>1000m	500-1000m	1000-3.000m	>3.000 m		
Illuminazione	Illuminazione ordinaria	§2.8.1	●	●	●	●	●	
	Illuminazione di sicurezza	§2.8.2	●	●	●	●	●	
	Illuminazione di evacuazione	§2.8.3	●	●	●	●	●	
Ventilazione	Ventilazione meccanica	§2.9	○	○	○	●	●	
	Disposizioni speciali per la ventilazione (semi) trasversale	§2.9.5	○	○	○	○	●	
Stazioni di emergenza	Almeno ogni 150 m	§2.10	●	●	●	●	Munite di telefono e di 2 estintori. È consentito un intervallo massimo di 250 m nelle gallerie esistenti.	
Erogazione idrica	Almeno ogni 250 m	§2.11	●	●	●	●	Se non è prevista, è obbligatorio assicurare in altro modo una sufficiente erogazione idrica.	
Segnaletica stradale		§2.12	●	●	●	●	Per tutti gli impianti di sicurezza previsti per gli utenti della galleria (cfr. allegato III).	
Centro di controllo		§2.13	○	○	○	○	●	La sorveglianza di diverse gallerie può essere accentrata in un unico centro di controllo.
Impianti di sorveglianza	Telecamere	§2.14	●	●	●	●	●	Obbligatorio se esiste un centro di controllo.
	Rilevamento automatico degli incidenti e/o degli incendi	§2.14	●	●	●	●	●	Almeno uno dei due sistemi è obbligatorio nelle gallerie dove esiste un centro di controllo.
Impianto per chiudere la galleria	Semafori prima degli ingressi	§2.15.1	○	●	○	●	●	Raccomandato se esiste un centro di controllo e se la lunghezza è superiore a 3000 m.
	Semafori all'interno della galleria almeno ogni 1000 m	§2.15.2	○	○	○	○	●	
Sistemi di comunicazione	Ritrasmissioni radio ad uso dei servizi di pronto intervento	§2.16.1	○	○	○	●	●	
	Messaggi di emergenza via radio destinati agli utenti della galleria	§2.16.2	●	●	●	●	●	Obbligatorio se esistono canali di ritrasmissione radio destinati agli utenti della galleria e se esiste un centro di controllo.
	Altoparlanti nei rifugi e presso le uscite	§2.16.3	●	●	●	●	●	Obbligatorio se gli utenti della galleria in fase di evacuazione devono aspettare prima di poter raggiungere l'esterno.
Alimentazione elettrica		§2.17	●	●	●	●	●	Per assicurare il funzionamento dell'impianto di sicurezza indispensabile almeno durante l'evacuazione degli utenti della galleria.
Caratteristiche ignifughe degli impianti		§2.18	●	●	●	●	●	Devono mirare al mantenimento delle necessarie funzioni di sicurezza.

Tabella 2.5: informazioni relative ai requisiti minimi: *misure impiantistiche*.

In caso di anomalie nei parametri di sicurezza o deficit nei requisiti minimi è possibile:

- adottare misure di sicurezza presenti nei gruppi di requisiti minimi aventi indice di ordinalità superiore;
- adottare misure di sicurezza alternative o integrative derivate dalla buona pratica;
- adottare soluzioni progettuali o sistemi di sicurezza innovativi.

### **2.10.1.3 Analisi di rischio**

La metodologia di analisi di rischio considera una galleria con le sue specifiche caratteristiche, localizzata sul territorio ed in interazione con l'ambiente circostante. Deve tenere conto di:

- caratteristiche architettoniche e strutturali della galleria;
- caratteristiche del traffico che incidono sulla sicurezza quali il volume, la composizione, il regime di traffico;
- incidentalità stradale e tassi di accadimento degli eventi critici caratteristici della galleria, rilevati o di progetto;
- caratteristiche prestazionali dei sistemi di sicurezza di cui la galleria è dotata.

I sistemi di sicurezza che determinano la risposta del sistema galleria alle condizioni di emergenza e definiscono le condizioni di pericolo per la popolazione esposta agli eventi critici possibili, sono caratterizzati in termini di affidabilità ed efficienza desumibili dalla buona pratica corrente.

Gli scenari incidentali sono rappresentati mediante modelli che includono come elementi costitutivi l'*albero delle cause*, l'*evento critico* e l'*albero degli eventi*.

L'*evento critico* è caratterizzato in termini di probabilità di accadimento e pericolosità potenziale sulla base di evidenze statistiche per i sistemi galleria in generale, eventualmente integrate da dati disponibili per la singola galleria con riferimento ai tassi di accadimento rilevati ed alle specificità progettuali della stessa.

L'albero degli eventi è caratterizzato in termini di probabilità di accadimento degli eventi critici e di probabilità di evoluzione lungo i singoli specifici rami condizionate dall'azione dei sistemi di sicurezza quantificata in termini di affidabilità ed efficienza ad essi proprie.

I rami dell'albero degli eventi terminano in scenari di fine emergenza, determinati in numero dalle combinazioni mutuamente esclusive delle azioni di condizionamento esercitate dalle misure mitigative previste.

La figura 2.21 mostra un esempio di applicazione della tecnica ad albero degli eventi nella caratterizzazione della sicurezza antincendio di una galleria nella quale si assume siano installati i seguenti sistemi di sicurezza:

- monitoraggio – rilevazione;
- comunicazione;
- ventilazione;
- illuminazione.

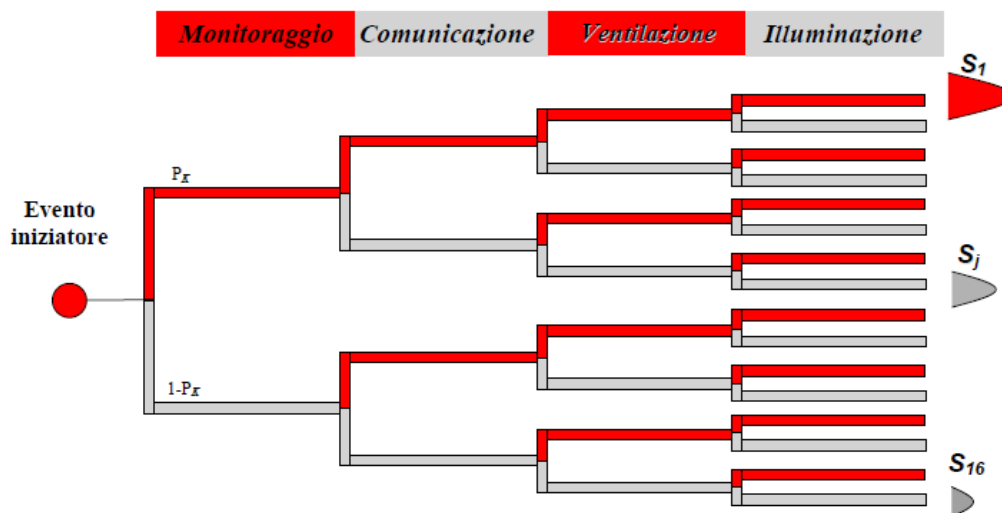


Figura 2.21: esempio di applicazione della tecnica ad albero degli eventi.

La salvabilità degli utenti in una specifica galleria è determinata attraverso la quantificazione e la zonizzazione del flusso del pericolo all'interno della struttura che individua le condizioni nelle quali si realizza il processo di esodo degli utenti dalla galleria.

La caratterizzazione di tale flusso è ottenuta modellando l'evoluzione condizionata dai vincoli posti dalle misure di mitigazione previste dei fenomeni chimici e fisici che si instaurano in conseguenza dell'accadimento di eventi critici.

Pertanto, i risultati della modellazione del flusso del pericolo costituiscono i dati di ingresso per la simulazione del processo di esodo degli utenti dalla struttura. Il numero degli utenti coinvolti in tale processo è determinato attraverso la formulazione e la soluzione di idonei modelli di formazione delle code nella galleria analizzata.

I risultati dell'analisi di rischio sono utilizzati per costruire indicatori quantitativi del rischio. Quello adottato in questo ambito è il Rischio Sociale definito come numero di vittime conseguente all'accadimento di un evento critico su una base temporale fissata.

Il livello di rischio proprio di una generica galleria è determinato tracciando la curva cumulata complementare ad essa corrispondente (C.C.C.). Quest'ultima contiene tutte le informazioni disponibili rispetto alle frequenze di accadimento di un insieme di eventi critici ed alle probabilità delle conseguenze ad essi associate e consente una rappresentazione del rischio nella forma di una completa distribuzione delle potenziali perdite evidenziando gli effetti delle incertezze connesse al malfunzionamento ovvero all'inadeguatezza dei sistemi di sicurezza adottati.

Un indicatore di rischio correntemente utilizzato nella pratica ingegneristica è il valore atteso del danno, coincidente con l'area sottesa dalla curva cumulata complementare tracciata sul diagramma F-N.

Il valore atteso del danno si calcola 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 all'anno.

La porzione dei diagrammi F-N limitata dalle rette di accettabilità e non accettabilità del rischio individua il dominio di applicazione del principio ALARP, già descritto precedentemente.

Pertanto, si richiede che sia identificata la soluzione progettuale che consente la maggiore riduzione del livello di rischio di una determinata galleria e che risulti compatibile con i vincoli tecnici ed economici propri del progetto della struttura.

La figura 2.22 sintetizza il metodo di analisi di rischio adottato nelle Linee Guida.

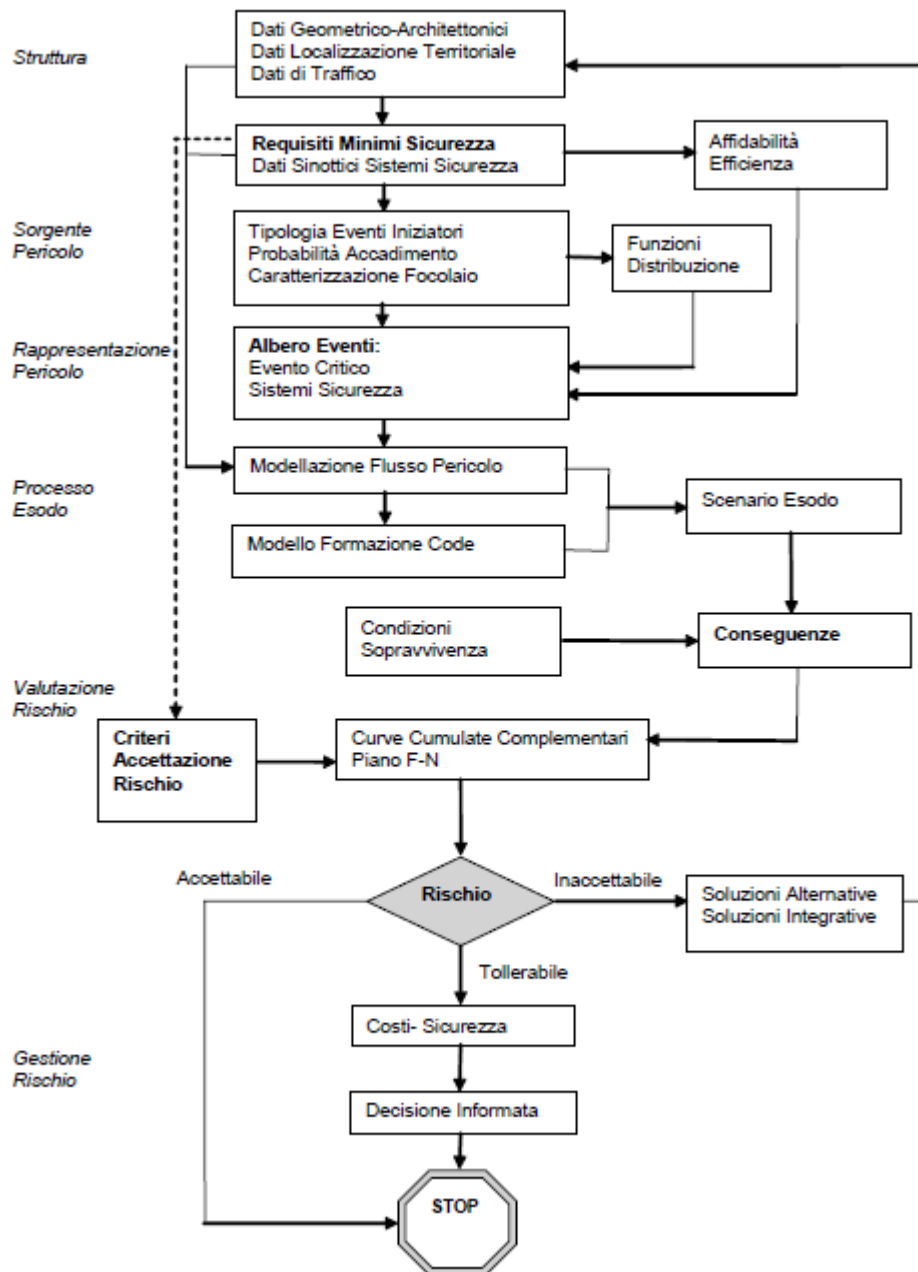


Figura 2.22: analisi di rischio per una galleria stradale.



# Capitolo 3

## Il rischio

### 3.1 Introduzione

L'essere umano è consapevole che durante la propria vita non sarà mai in grado di evitare completamente i rischi, ma potrà soltanto scegliere la soluzione che egli stesso ritiene meno rischiosa. Pertanto la capacità di prendere decisioni razionali richiede un'espressione del rischio chiara e quantitativa, in modo tale che possa essere opportunamente analizzata, insieme a tutti gli altri costi e benefici, nel processo decisionale.

In primo luogo è opportuno effettuare una distinzione tra il concetto di rischio e quello di pericolo. Nel dizionario il pericolo viene definito come “una fonte di insidia”, mentre il rischio è “la possibilità di perdita o danno” ed il “grado di probabilità di tale perdita”. Il pericolo, quindi, è semplicemente inteso come una fonte. Mentre il rischio comprende la probabilità che questo pericolo si concretizzi in un'effettiva perdita o in una qualsiasi forma di danno. A titolo di esempio, l'oceano può essere considerato come un pericolo. Se lo si attraversa con una barca a remi ovviamente si sta sottovalutando un rischio molto grande. Se invece viene utilizzata la *Queen Elizabeth* (imbarcazione della marina militare delle forze armate britanniche), il rischio è modesto. Quindi la *Queen Elizabeth* rappresenta un mezzo che garantisce salvaguardia dal pericolo, e di conseguenza un minor rischio.

Si può esprimere quest'idea, simbolicamente, in forma di equazione:

$$\text{Rischio} = \frac{\text{Pericolo}}{\text{Salvaguardia}}$$

Quest'equazione mette in evidenza in fatto che è possibile ridurre il rischio aumentando la salvaguardia, ma, per una questione di principio, non si potrà mai annullare. Nel termine “salvaguardia” viene inclusa anche l'idea di



“consapevolezza”. La consapevolezza del rischio, quindi, riduce il rischio stesso.

A questo punto è possibile definire il rischio come il danno incerto a cui un dato soggetto si trova esposto in seguito a possibili eventi o concatenazione favorevole degli stessi (S. Canale, 1998). L'incertezza che viene associata alla condizione di danno potenziale ha una duplice origine: da un lato si possono verificare eventi sfavorevoli e temuti con probabilità più o meno grande, ma mai nulla, dall'altro l'entità del danno può variare in relazione alle circostanze esterne (come le condizioni meteorologiche) che, a causa della loro aleatorietà, non possono essere previste in modo certo ed univoco.

Si può affermare che, da un punto di vista analitico, il rischio può essere definito, nello spazio degli attributi misurabili, come la combinazione dei danni, o delle conseguenze negative, e delle probabilità ad esse associate. La ricerca di una situazione con minor rischio, ovvero con maggior grado di sicurezza, significherà pertanto una diminuzione dell'entità delle conseguenze, o della probabilità, oppure di entrambe.

La definizione di rischio, convenzionalmente adottata, si può esprimere come:

$$R = f \cdot M$$

dove “f” indica la frequenza di accadimento dell'evento incidentale, “M” denota la *magnitudo* dei suoi effetti, ovvero la consistenza delle sue conseguenze e la grandezza “R”, che rappresenta il rischio, prende il nome di *indice di rischio* (M. Guarascio e M. Lombardi, 2007).

Questa definizione prende in considerazione in egual maniera sia le conseguenze provocate dall'incidente, sia la probabilità che tale incidente ha di verificarsi.

La quantificazione del rischio viene espressa attraverso i classici parametri epidemiologici, e cioè con valutazioni statistiche di eventi non desiderati (morte, lesioni, danni di varia natura) in relazione alla popolazione effettivamente esposta al fattore di rischio.

Si può, quindi, indicare il *fattore di rischio* (RR), o rischio relativo, come il rapporto tra gli individui esposti e quelli non esposti; ad esempio  $RR = 8$

significa che l'evento indesiderato negli esposti al rischio è 8 volte maggiore rispetto ai non esposti.

Nella procedura di valutazione di un rischio, la fase più critica e difficilmente quantificabile è la stima della probabilità dell'evento, mentre lo studio della magnitudo è meno soggetta a grandi errori. Ne consegue che non è sempre corretto affidare lo stesso peso di affidabilità ai fattori "F" ed "M". In altre parole non è vero che 100 incidenti all'anno, ciascuno con un morto, equivalgono a 10 incidenti all'anno, ciascuno con 10 morti, oppure ad un unico incidente all'anno con 100 morti.

Per la valutazione delle frequenze incidentali esistono delle procedure basate su una dettagliata analisi delle condizioni operative del sistema "candidato" ad essere sede dell'incidente.

Per quanto riguarda la magnitudo, invece, il discorso si complica a causa degli innumerevoli fattori che intervengono e pesano sull'individuazione di un danno di riferimento che sia accettabile per tutti.

Pertanto, una volta che in un processo vengono individuati quegli eventi che contengono una componente di pericolosità, se ne analizzeranno separatamente la probabilità e/o gravità delle conseguenze insite nell'evento stesso. Il prodotto dei due fattori (probabilità e gravità) permetterà quindi di individuare il rischio in un determinato evento, nell'ambito di un certo processo.

Gli eventi possono essere, fondamentalmente, di due tipi:

- *intensivi*, cioè piccoli per estensione, intensi, di breve durata, improvvisi e di scarsa predicibilità;
- *pervasivi*, cioè diffusi per estensione, di lunga durata, di inizio graduale e di più accurata predicibilità.

Un'altra classificazione degli eventi è legata alle cause:

- *eventi naturali*, cioè al di fuori dal campo di azione dell'uomo ed inerenti alla natura (cicloni, terremoti, vento, ecc.);
- *eventi causati dall'uomo*, cioè che avvengono nell'ambito della capacità di governo e controllo della comunità umana; in questo caso si può fare

riferimento ad una sottoclassificazione che prevede le tre seguenti tipologie:

- 1) accidentali, se sono inattesi;
- 2) incidentali, se sono non voluti e non previsti;
- 3) intenzionali, se sono previsti o voluti.

Per quanto riguarda le conseguenze degli eventi, esse possono essere di tipo sanitario, sociale ed ambientale.

Nell'ambito dell'ingegneria civile occorre aggiungere, inoltre, i *danni materiali*, cioè le conseguenze che ricadono ad esempio sulle strutture edilizie, o, nell'ambito di un processo di analisi del rischio in campo stradale, sui veicoli e/o sugli elementi posti nel tracciato (barriere, pali, ecc.) in caso di incidente.

## 3.2 Concetto di probabilità

L'analisi del problema che ci si propone di affrontare richiede senza dubbio la conoscenza di alcune nozioni rientranti in un ambito particolarmente vasto, che è quello delle scienze statistiche e probabilistiche.

Si rende indispensabile, pertanto, esporre una serie di concetti che torneranno utili per la comprensione della trattazione che seguirà (P. Athanasios, 1997).

### 3.2.1 Concetti primitivi probabilistici

Si definisce **esperimento casuale** ogni esperimento soggetto ad incertezza, nel senso che, a parità di premesse, il risultato non è univoco.

La singola realizzazione di un determinato esperimento prende il nome di **prova**; ogni possibile risultato di una prova si definisce **evento** (E).

Se un evento si presenta senza alcuna incertezza viene detto **evento certo**, se non può mai presentarsi è detto **evento impossibile**, se invece può presentarsi oppure no si definisce **evento casuale** o **aleatorio**.

L'insieme di tutti i possibili eventi prende il nome di **spazio campione**.

### 3.2.2 Definizione di probabilità

Il concetto di probabilità ha subito un suo sviluppo storico, che ha portato a quattro definizioni:

- definizione classica (a priori);
- definizione frequentistica o statistica (a posteriori);
- definizione soggettivistica;
- definizione assiomatica.

#### 3.2.2.1 Definizione classica di probabilità

Secondo la definizione classica (Laplace, 1820), la probabilità che si verifichi un dato evento E, che si denota con P(E), viene determinata a priori, senza fare ricorso a prove sperimentali.

Indicando con n il numero di casi favorevoli al manifestarsi dell'evento E, e con N il numero di casi (egualmente) possibili, la probabilità dell'evento E è data dal seguente rapporto:

$$P(E) = \frac{n}{N}$$

#### 3.2.2.2 Definizione frequentistica di probabilità

Tale definizione, che è basata sul concetto di frequenza relativa, è stata introdotta da R. Von Mises nel 1928.

Ripetendo in un esperimento N volte una prova, se l'evento E, in osservazione, si presenta n volte, il rapporto n/N si definisce *frequenza relativa di successo*. Allora la probabilità P(E) dell'evento ripetibile E è il limite a cui tende la frequenza relativa al divergere del numero di prove:

$$P(E) = \lim \frac{n}{N} \quad \text{per } n \rightarrow \infty$$

La definizione frequentistica, o a posteriori, presuppone l'esistenza del limite a secondo membro della formula sopra riportata al divergere di N.

Tale limite, però, è in effetti privo di contenuto sperimentale in quanto, in realtà, il numero di prove risulta sempre finito.

Osserviamo infine che la *frequenza* è un concetto a posteriori, si calcola cioè dopo aver compiuto l'esperimento, mentre la *probabilità* è un concetto a priori, ossia si valuta prima dell'esperimento e senza che sia necessario effettuarlo.

### 3.2.2.3 Definizione soggettivistica di probabilità

La concezione soggettivistica della probabilità si fonda sulla considerazione della probabilità come misura dell'opinione che un evento possa essere vero, oppure no.

In base alle opinioni ed informazioni di un dato individuo "coerente", la probabilità  $P(E)$  di un evento  $E$  è la misura del grado di fiducia che egli attribuisce al presentarsi dell'evento medesimo ( $E$ ).

Si vuole fare notare che i fautori di tale teoria, rovesciando il punto di vista frequentista, negano che abbia senso parlare di eventi ripetibili: ogni evento è a se stante, ed ad esso è associabile una probabilità soggettiva.

### 3.2.2.4 Definizione assiomatica di probabilità

La definizione assiomatica della probabilità  $P(E)$  di un evento, obbedisce ai seguenti postulati (A. N. Kolmogorov, 1931):

- **Assioma 1** (o della negatività)

$$P(E) \geq 0$$

- **Assioma 2** (o della normalità)

La probabilità di un evento certo è pari all'unità.

- **Assioma 3** (o della sommabilità)

Se  $E_1, E_2, \dots, E_n$  è una sequenza (numerabile) di eventi "mutuamente esclusivi" od "incompatibili" nello spazio campione  $W$ , allora:

$$P(E_1 + E_2 + \dots + E_n) = P(E_1) + P(E_2) + \dots + P(E_n)$$

### 3.2.3 Definizione della variabile aleatoria

La variabile aleatoria reale è quella funzione  $X(\omega)$ ,  $\omega \in \Omega$ , a valori numerici reali, che permette di rappresentare lo spazio campionario  $\Omega$  di un esperimento casuale, sopra la linea reale  $\mathbb{R}$ .

Le variabili aleatorie sono convenzionalmente indicate con le lettere maiuscole, ad esempio  $X(\omega)$ , o più semplicemente  $X$ , dando la preferenza alla prima per mostrare il carattere funzionale della variabile stessa.

Esistono due tipi di variabili aleatorie:

- le *variabili aleatorie discrete*, e cioè capaci di assumere solo un numero finito di valori distinti;
- le *variabili aleatorie continue*, cioè capaci di assumere qualunque valore entro uno più intervalli assegnati di  $\mathbb{R}$ .

A questo punto se una variabile  $X$  può assumere un insieme discreto di valori:

$$X_1, X_2, \dots, X_n,$$

rispettivamente con probabilità:

$$p_1, p_2, \dots, p_n \text{ dove } p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1,$$

diciamo che è stata definita per  $X$  una “distribuzione di probabilità discreta”.

La funzione  $P(X)$ , che assume i valori di  $p_1, p_2, \dots, p_n$  rispettivamente in corrispondenza di  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , è detta “funzione di probabilità” di  $X$ .

I precedenti concetti possono essere estesi al caso in cui la variabile  $X$  può assumere un insieme continuo di valori; in questo caso la curva associata a tale distribuzione è una curva continua, la cui equazione è del tipo  $Y = f(X)$ .

L'area totale compresa tra la curva e l'asse delle  $X$  è pari ad 1, e l'area sotto la curva, compresa tra le linee  $X = a$ , ed  $X = b$ , fornisce la probabilità che  $X$  cada tra  $a$  e  $b$ , che può essere indicata con:  $\Pr\{a < X < b\}$ .

Possiamo definire con  $f(X)$  la “funzione densità di probabilità”, e con  $F(X)$  la “funzione distribuzione di probabilità”.

Le funzioni predette non sono indipendenti, infatti:

$$f(X) = \frac{dF(X)}{dX}$$

da quest'ultima si evince che, per qualsiasi coppia di valori  $a$  e  $b$ , con  $b > a$ , si ha:

$$P\{a \leq X \leq b\} = P\{X \leq b\} - P\{X \leq a\}$$

da cui segue che:

$$P\{a \leq X \leq b\} = F(b) - F(a)$$

Ciò evidenzia come la *funzione distribuzione di probabilità* sia tale da definire univocamente la distribuzione della variabile aleatoria  $X$ , e che essa possa essere utilmente impiegata per il calcolo delle probabilità.

### 3.2.4 Funzioni di probabilità Gaussiane e Gaussiane-standardizzate

Uno dei più importanti esempi di funzioni di densità di probabilità continue è dato dalla *funzione densità di probabilità gaussiana* (o normale), definita dalla seguente equazione:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad \text{per } -\infty \leq x \leq +\infty$$

ed avente un andamento del tipo rappresentato in figura 3.1, caratterizzato dalla simmetria rispetto all'asse passante per l'ascissa  $\mu$  (asse mediano).

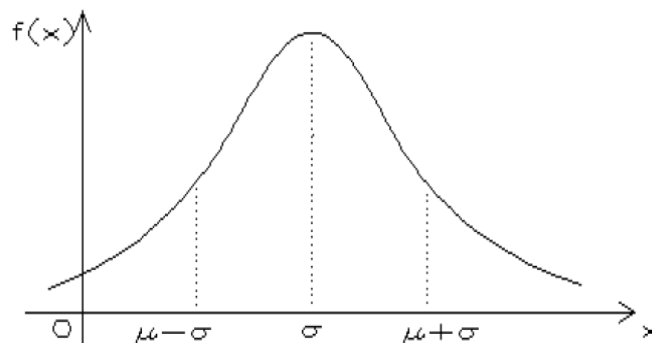


Figura 3.1: funzione densità di probabilità normale (o gaussiana).

Dalla figura 3.1 si evince immediatamente che la funzione densità di probabilità è individuata da due soli parametri,  $\mu$  e  $\sigma > 0$ , che ne esprimono, rispettivamente, la *media*:

$$\mu = \int x \cdot f(x) \cdot dx$$

e la *deviazione standard* (o scarto quadratico medio), che misura la distanza tra l'asse mediano ed i punti di flesso della curva:

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot (x - \mu)^2 \cdot dx}$$

In coerenza con le definizioni date, la funzione distribuzione di probabilità si può valutare mediante il seguente integrale definito:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \cdot dx$$

Quindi è possibile esprimere la variabile aleatoria gaussiana in termini di unità standard; in questo caso si dice che la variabile aleatoria gaussiana assume la forma standardizzata, caratterizzata da media nulla, e deviazione standard unitaria, per cui si otterrà:

$$\mu = 0$$

$$\sigma = 1$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} \quad \text{Funzione densità di probabilità}$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_z^{+\infty} e^{-\frac{\omega^2}{2}} \cdot d\omega \quad \text{Funzione distribuzione di probabilità}$$



### 3.3 Definizione quantitativa del rischio

#### 3.3.1 Espressione del rischio in termini di un “insieme di triple”

Lo scopo dell'analisi del rischio è quello di fornire una visione di ciò che avverrà in futuro, quando si intraprende un certo tipo di azione (ma anche una “non azione”). Pertanto l'analisi del rischio consiste fondamentalmente nella risposta alle seguenti tre domande:

- 1) Che cosa potrebbe accadere?
- 2) Qual è la probabilità che accada?
- 3) Stabilito che accada, quali sono le possibili conseguenze?

Per rispondere a queste domande è necessario fare un elenco degli esiti o “scenari”, come suggerisce la tabella 3.1.

Scenario	Probabilità	Conseguenza
$S_1$	$p_1$	$x_1$
$S_2$	$p_2$	$x_2$
.	.	.
.	.	.
$S_n$	$p_n$	$x_n$

Tabella 3.1: elenco degli scenari

L'i-esima riga della tabella 3.1 può quindi essere pensata come una tripla:

$$\langle s_i, p_i, x_i \rangle$$

dove:

$s_i$  è l'identificazione e descrizione di uno scenario (evento conseguenza);

$p_i$  è la probabilità associata a ciascun scenario;

$x_i$  è la conseguenza di tale scenario, vale a dire la misura del danno.

Quindi se questa tabella contiene tutti gli scenari pensabili e possibili, può essere considerata come la risposta alle tre domande, e, pertanto, rappresenta il rischio (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980). Più formalmente,

utilizzando le parentesi graffe per indicare un “insieme di”, si definisce il rischio come l’insieme delle possibili triple:

$$R = \{\langle S_i, p_i, x_i \rangle\}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

### 3.3.2 Curve di rischio

Si ipotizza che nella tabella 2.1 gli scenari siano stati disposti in ordine crescente di gravità di danno. Vale a dire che i danni  $x_i$  seguono la seguente relazione:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n$$

Aggiungendo alla tabella 1.1 una quarta colonna che indica la *probabilità cumulativa*, che si ottiene sommando dal fondo, si costruisce la tabella 3.2:

Scenario	Probabilità	Conseguenza	Probabilità cumulativa
$S_1$	$p_1$	$x_1$	$p_1 = p_2 + p_1$
$S_2$	$p_2$	$x_2$	$p_2 = p_3 + p_2$
.	.	.	.
.	.	.	.
$S_i$	$p_i$	$x_i$	$p_i = p_{i+1} + p_i$
.	.	.	.
.	.	.	.
$S_{n-1}$	$P_{n-1}$	$x_{n-1}$	$p_{n-1} = p_n + p_{n-1}$
$S_n$	$p_n$	$x_n$	$p_n = p_n$

Tabella 3.2: elenco degli scenari con Probabilità Cumulativa

Plottando poi le coppie di punti  $\langle x_i, p_i \rangle$  si può ottenere una funzione discendente “a scala”. E’ importante notare che quelli che sono stati definiti “scenari”, già a partire dalla tabella 2.1, sono in realtà delle categorie di scenario. Per esempio lo scenario “rottura di una tubatura” comprende un’intera categoria di diversi tipi, e dimensioni, di rotture, che potrebbero essere previste, ciascuna con i danni conseguenti “x” diversi (le categorie di scenario devono, fra l’altro, essere scelte in maniera da escludersi a vicenda, ed in modo che lo stesso evento non venga visualizzato in più di una categoria).

Quindi si può considerare la funzione “a scala” come un'approssimazione discreta di una curva che in realtà è continua. Pertanto, se si traccia una curva  $R(x)$ , che approssima la funzione “a scala”, si può ritenere che questa curva rappresenti il rischio effettivo. Viene così definita “curva di rischio”, ed un esempio è riportato in figura 3.2 (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980).

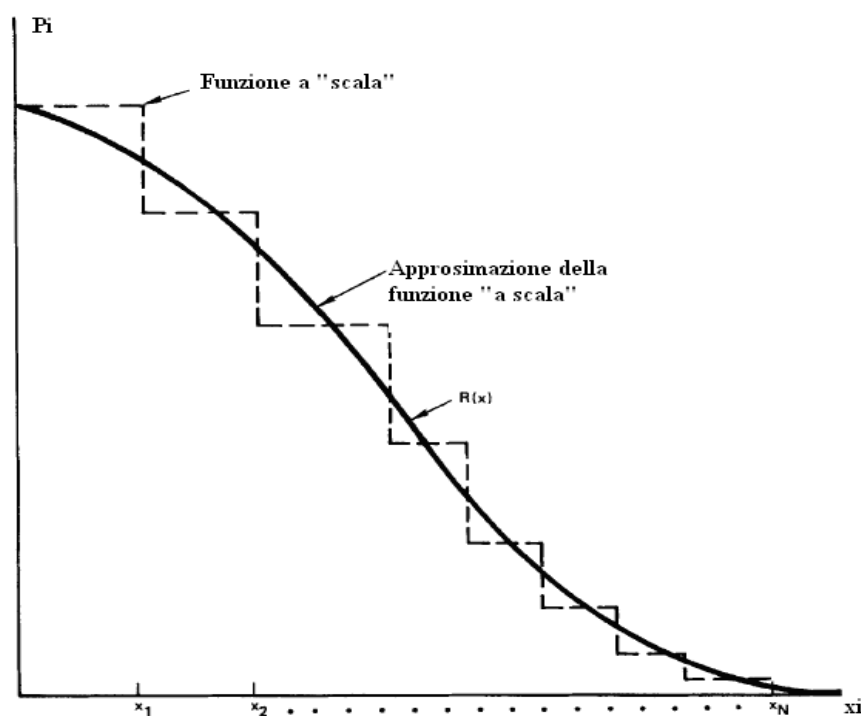


Figura 3.2: Esempio di una curva di rischio.

La curva di rischio esprime, quindi, la probabilità di accadimento di un certo evento, o incidente, che presenta una determinata magnitudo.

E' possibile confrontare curve di rischio diverse, relative ad un generico “sistema”: le curve rappresentano le linee di uguale rischio, ottenuto da diverse probabilità e magnitudo, e sono parametrizzate in funzione di un certo valore di rischio.

La figura 3.3 (S. Canale, 1998) mette in evidenza che se si è valutato di essere in presenza del rischio  $R_A = p_A \cdot x_A$ , si può decidere di ridurre questo rischio al valore  $R_B = p_C \cdot x_C$ , oppure  $R_B = p_O \cdot x_O$ ; in altre parole si può cercare di diminuire la probabilità o la magnitudo, o, possibilmente, entrambi.

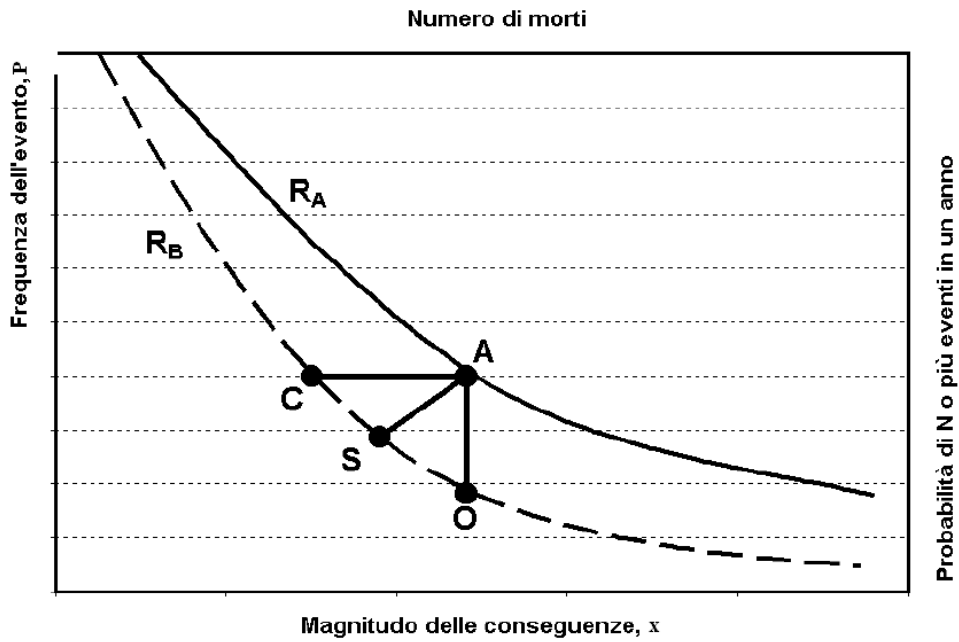


Figura 3.3: curve di rischio relative ad un generico “sistema”.

Per poter assegnare un valore all'indice di rischio correlato ad un determinato incidente è evidente, ancora una volta, che è fondamentale conoscere la frequenza stimata dell'incidente stesso e la magnitudo delle sue conseguenze (nell'esempio viene espressa in termini di vittime).

Le curve di rischio possono essere riportate anche in scala bilogarithmica, la quale determina la caratteristica forma concava verso il basso. In questo caso gli asintoti, come mostrato nella figura 3.4, sono l'interpretazione del “massimo danno possibile” e della “probabilità massima raggiungibile”.

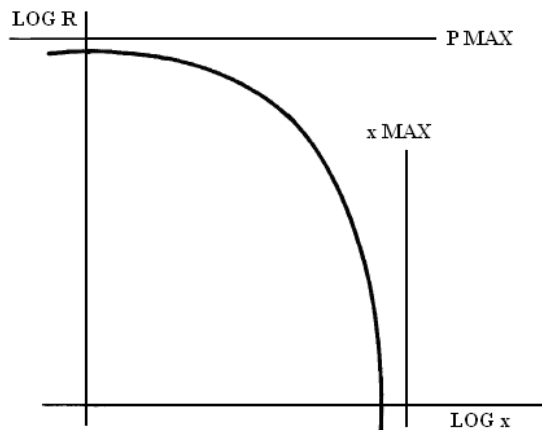


Figura 3.4: curva di rischio in scala bilogarithmica.

### 3.3.2.1 Danni multidimensionali

In molte applicazioni è opportuno identificare diversi tipi di danno, ad esempio, la perdita di vite umane e di beni materiali. In questi casi, il danno,  $x$ , può essere considerato come una quantità vettoriale, o multidimensionale, piuttosto che un singolo numero scalare. La curva di rischio diventa così una superficie di rischio su uno spazio multidimensionale (figura 3.5).

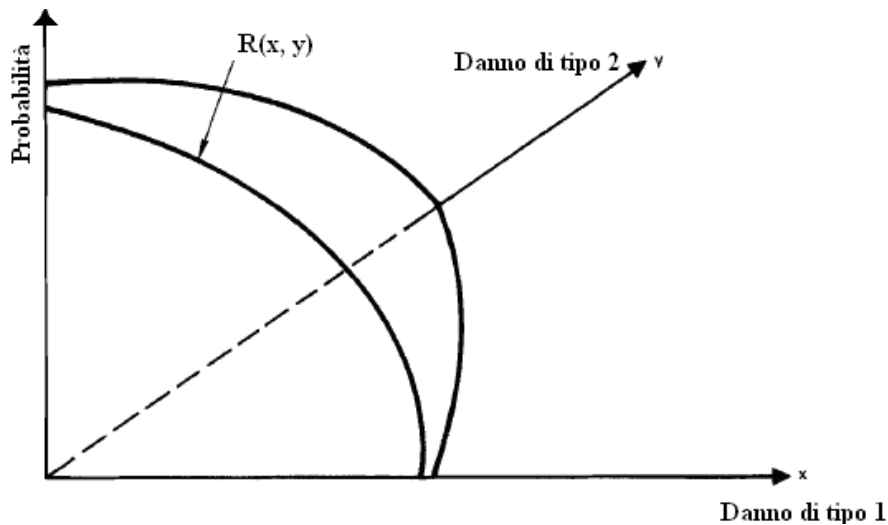


Figura 3.5: Superficie di rischio nel caso di danni multidimensionali.

Un esempio di superficie di rischio, presentato in forma di tabella, è mostrato nella tabella 3.3, presa, a titolo di esempio, da un rapporto sul trasporto, ferroviario, di combustibile nucleare esaurito (B. J. Garrick e S. Kaplan, 1980).

Numero di persone	Dose (mr)						
	N/D	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
1		$1,17 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$	$9,00 \times 10^{-6}$	$4,24 \times 10^{-6}$
10		$1,17 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-5}$	$8,90 \times 10^{-6}$	$4,54 \times 10^{-6}$	$1,79 \times 10^{-6}$
10 <sup>2</sup>		$1,17 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$	$8,65 \times 10^{-6}$	$5,05 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$5,45 \times 10^{-7}$
10 <sup>3</sup>		$1,17 \times 10^{-5}$	$1,14 \times 10^{-5}$	$6,05 \times 10^{-6}$	$2,63 \times 10^{-6}$	$6,95 \times 10^{-7}$	$1,50 \times 10^{-7}$
10 <sup>4</sup>		$1,03 \times 10^{-5}$	$7,40 \times 10^{-6}$	$3,60 \times 10^{-6}$	$1,24 \times 10^{-6}$	$2,96 \times 10^{-7}$	$1,64 \times 10^{-8}$
10 <sup>5</sup>		$8,45 \times 10^{-6}$	$5,95 \times 10^{-6}$	$2,31 \times 10^{-6}$	$6,70 \times 10^{-7}$	$1,14 \times 10^{-7}$	$2,85 \times 10^{-10}$

Tabella 3.3: probabilità di esposizione umana alle radiazioni.

Questa tabella in ogni sua casella elenca le probabilità che le  $N$  o più persone ricevano una dose di  $D$  mg, o più, a causa di una spedizione di combustibile.

### 3.3.3 “Probabilità di frequenza”

Chiamiamo “frequenza” ciò che viene trattato dagli oggettivisti, o frequentisti, mentre chiamiamo “probabilità” ciò che viene trattato dai soggettivisti. Quindi il termine “probabilità” rappresenta una misura numerica di uno stato di conoscenza, un certo grado di convinzione, uno stato di fiducia. “Frequenza”, dall’altro lato, fa riferimento al risultato di qualche tipo di esperimento che prevede ripetute prove.

Detto questo, esistono due modi per descrivere il lancio di alcune monete, che corrispondono a due diverse domande. Infatti in primo luogo, ci si potrebbe chiedere: “Qual è la probabilità di avere testa nel prossimo lancio?”. In alternativa ci si potrebbe chiedere: “Lancerò la moneta 10.000 volte. Qual è la frequenza, e cioè la percentuale, con la quale avrò testa?”.

Nel primo caso dobbiamo semplicemente rispondere con un numero che rappresenta la nostra aspettativa di avere testa nel prossimo lancio, come per esempio il rischio che si prende con una scommessa.

Nel secondo caso invece, ci viene chiesto di prevedere il risultato,  $\Phi$ , di un esperimento che verrà eseguito in futuro. Dal momento che, ovviamente, non conosciamo questo risultato, esprimiamo la nostra previsione sotto forma di una curva di probabilità rispetto alla frequenza, come rappresentato dalla figura 3.6.

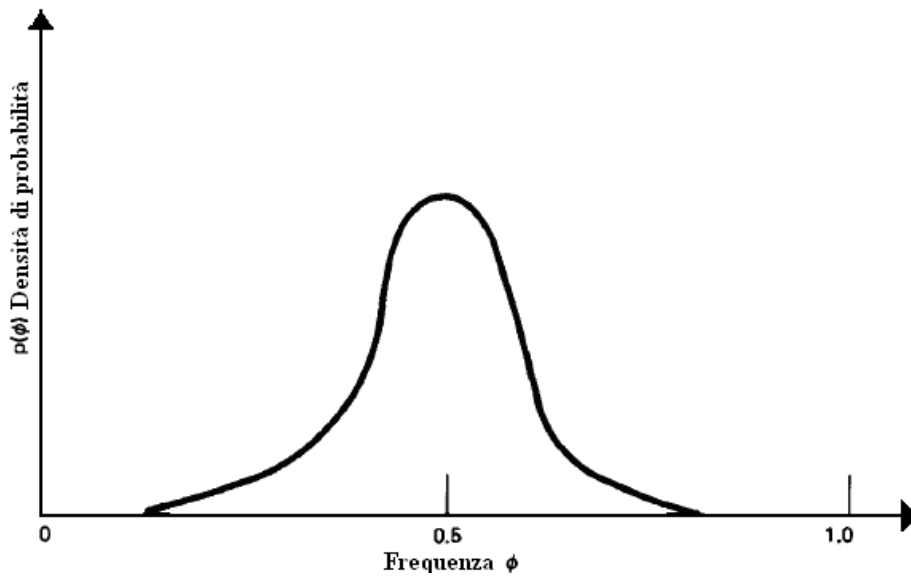


Figura 3.6: curva di probabilità di frequenza.

Pertanto, nel secondo caso, siamo portati alla nozione di curva di probabilità di frequenza, per esprimere il nostro stato di conoscenza (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980).

Tornando al lancio delle monete, si può notare che la risposta alla prima domanda si può ricavare dalla risposta alla seconda. Per cui, dopo aver ottenuto la curva di probabilità di frequenza,  $p(\Phi)$ , è possibile esprimere la probabilità di avere testa al prossimo lancio, attraverso la seguente relazione:

$$p(\text{testa}) = \int_0^1 \phi \cdot p(\phi) \cdot d\phi$$

Quindi è evidente che il secondo caso comprende il primo. D'altra parte non si può dire il contrario, e pertanto, il secondo metodo coinvolge una più ampia e più completa discussione del problema.

### 3.3.4 Curve di rischio in formato di frequenza

Il concetto di “probabilità di frequenza” può essere utilizzato nel modo seguente. Si può immaginare un esperimento in cui si applica, molte volte, una certa linea di azione proposta. Al termine di tale esperimento ci si può

chiedere, per esempio, con quale frequenza si verifica lo scenario  $S_i$ . Questa frequenza è un numero misurato sperimentalmente, e viene indicata con il simbolo  $\phi_i$ .

Una volta eseguito l'esperimento, si avrà, quindi, un insieme di valori  $\phi_i$ , per ogni scenario, ed l'insieme di triple :

$$\{(S_i, \Phi_i, x_i)\}, i = 1, \dots, n + 1.$$

Anche in questo caso è possibile calcolare la frequenza cumulativa:

$$\phi_i = \sum_{x_j \geq x_i} \phi_j$$

Dove la sommatoria è riferita a tutti gli scenari che presentano danni uguali, o maggiori, rispetto a  $x_i$ .

A questo punto, rappresentando graficamente l'andamento di  $\Phi$  rispetto a  $x$ , si ottiene la figura 3.7, che si considera una curva di rischio in formato di frequenza, e che rappresenta il risultato dell'esperimento descritto (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980).

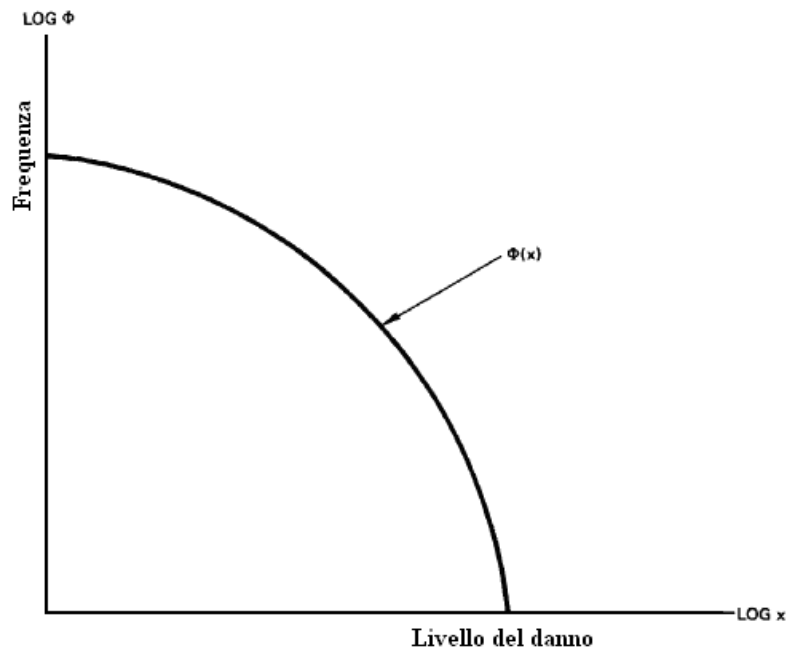


Figura 3.7: curva di rischio in formato di frequenza



### 3.3.5 Inserimento degli elementi di incertezza

Se l'esperimento descritto nel paragrafo precedente non è ancora stato eseguito, ovviamente si avranno delle incertezze sul risultato. Il grado di incertezza dipende dallo stato di conoscenza totale, al di là dell'evidenza dei dati che sono in possesso, e dell'esperienza di eventi simili accaduti in passato. E' necessario, quindi, esprimere questa incertezza utilizzando, naturalmente, il linguaggio della probabilità.

Dato che l'incertezza riguarda una curva,  $\Phi(x)$ , è possibile esprimerla incorporando questa curva all'interno di uno spazio di curve e costruendo una distribuzione di probabilità su questo spazio.

Graficamente, tutto questo è rappresentato da un diagramma mostrato dalla figura 3.8.

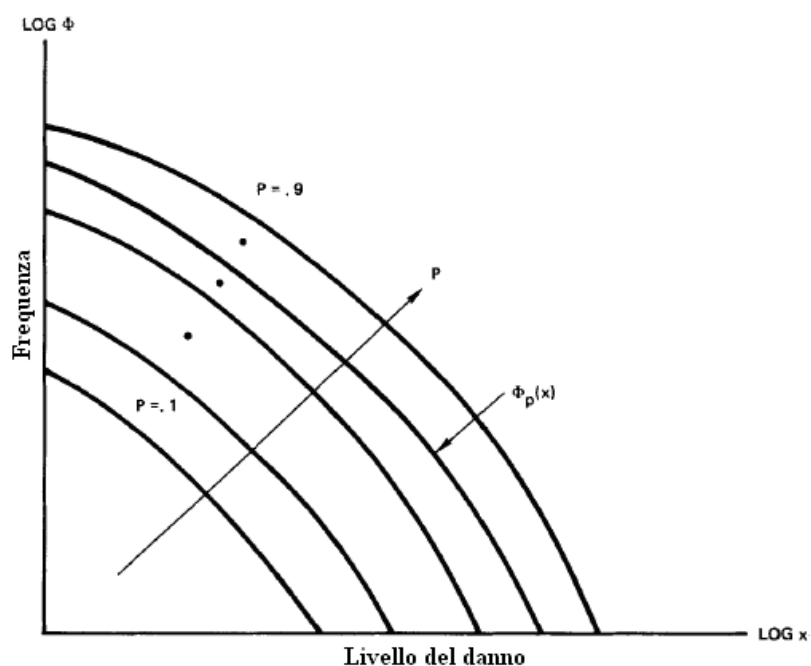


Figura 3.8: curva di rischio in formato di probabilità di frequenza.

Questa figura viene definita “curva di rischio in formato di probabilità di frequenza”. Consiste in una famiglia di curve,  $\Phi(x)$ , il cui parametro è la probabilità cumulativa (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980).

Per utilizzare questo diagramma è necessario entrare, per esempio, con uno specifico valore di  $x$  e scegliere la curva caratterizzata dal valore  $P = 0,90$ . L'ordinata di questa curva,  $\phi_{0,90}(x)$ , rappresenta quindi la frequenza di  $x$  del 90%. Vale a dire che si ha la sicurezza al 90% che la frequenza con la quale si verifica il livello di danno  $x$ , o un livello maggiore, non è superiore di  $\phi_{0,90}(x)$ .

E' evidente quindi che la figura 2.8 rappresenta la forma grafica di una definizione del rischio più completa, poiché prende in considerazione anche gli elementi di incertezza. E' interessante esprimere questa definizione anche in termini di un insieme di triple.

### **3.3.6 Insieme di triple che comprende gli elementi di incertezza**

Nell'elencare un insieme di triple, legato ad un certo corso di azione, si suppone che non si conosca la frequenza con la quale si verifica una certa categoria di scenario  $S_i$ . E' necessario, quindi, esprimere lo stato di conoscenza relativo a questa frequenza con una curva di probabilità,  $p_i(\phi_i)$ , che rappresenta la funzione di densità di probabilità della frequenza  $\phi_i$ , dell'iesimo scenario. Si ottiene così un insieme di triple che può essere espresso nella forma:

$$R = \{ \langle S_i, p_i(\phi_i), x_i \rangle \}$$

E', quindi, possibile affermare che l'insieme di triple appena definito rappresenta il rischio e comprende le incertezze che riguardano la frequenza.

Quindi a partire da quest'insieme è possibile costruire la famiglia di curve di rischio, presentate nel paragrafo precedente (figura 2.8), cumulando le frequenze dal basso.

Analogamente, se è presente incertezza anche nel danno, l'espressione dell'insieme di triple varia nel modo seguente:

$$R = \{ \langle S_i, p_i(\phi_i), \xi_i(x_i) \rangle \}$$

Oppure più in generale:

$$R = \{ \langle S_i, p_i(\phi_i, x_i) \rangle \}$$

Ovviamente utilizzando una distribuzione comune su  $\phi_i$  e  $X_i$ .

Di conseguenza, la figura 2.8, oppure anche queste ultime tre relazioni, costituiscono una definizione del rischio più estesa e completa, poiché tiene conto anche degli elementi di incertezza (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980). Questa definizione comprende anche quella intesa come semplice insieme di triple (senza elementi di incertezza), nel senso che la frequenza prevista,  $\Phi(x)$ , per ogni  $x$ , non è altro che la probabilità  $p(x)$ , cioè  $X$ . Pertanto includendo esplicitamente l'incertezza, nel calcolo del rischio, non è stata persa alcuna informazione.

Questo è particolarmente importante nelle analisi di rischio dove gli scenari vengono identificati utilizzando alberi degli eventi ed alberi delle cause, e dove il dato fondamentale di input, relativo ai tassi di fallimento dei componenti, è incerto.

L'inclusione esplicita dell'incertezza, inoltre, consente di evitare la nozione di "rischio relativo", che è stata introdotta per confrontare il rischio di diversi sistemi, quando è limitata la fiducia negli stessi calcoli dei rischi. In questo senso, è possibile affermare che, comprendendo anche gli elementi di incertezza, si ottiene una definizione del rischio "assoluta" e "oggettiva". Dipende, infatti, da elementi di prova a disposizione, ma non dalla personalità degli utenti che collaborano alla risoluzione del problema. Pertanto, due persone razionali, che hanno a disposizione gli stessi elementi di prova, valuteranno il rischio allo stesso modo, ottenendo lo stesso risultato.

### **3.3.7 Valutazione della frequenza degli scenari – teorema di Bayes**

E' stato messo in evidenza che, in sostanza, il rischio può essere pensato come un elenco di scenari, e che due osservatori razionali, con lo stesso background di informazioni e gli stessi elementi di prova, assegneranno la

stessa frequenza a tali scenari. Più precisamente, assegneranno a questi scenari le stesse curve di probabilità di frequenza,  $p_i(\phi_i)$ .

Si può supporre, a titolo di esempio, che lo scenario considerato sia il verificarsi di un determinato evento, ovvero un guasto di una turbina in un impianto che, per semplicità, chiamiamo “m”. L’obiettivo è determinare la frequenza,  $\phi_m$ , di questo evento (ovvero il tasso medio col quale si verifica l’evento in un anno).

Le informazioni a disposizione, relative a questo problema, possono essere ricondotte a tre categorie:

- 1) Informazioni legate alla progettazione ed alla fabbricazione della turbina che fa funzionare l’impianto;
- 2) Esperienza accumulata con l’impianto specifico che è oggetto di studio;
- 3) Esperienza accumulata con turbine simili a quella che si sta analizzando, montate su impianti analoghi all’impianto “m”.

Nell’impianto specifico, ad esempio, si possono avere  $k_m$  eventi in  $T_m$  anni di funzionamento. La tipologia di dati consisterebbe, quindi, in una serie di doppiette del tipo:

$$\begin{aligned} &\langle k_1, T_1 \rangle \\ &\langle k_2, T_2 \rangle \\ &\quad \cdot \\ &\quad \cdot \\ &\langle k_j, T_j \rangle \end{aligned}$$

che forniscono informazioni relative a tutti gli impianti considerati “simili” all’impianto “m”.

Il punto ora è combinare questi tre tipi di informazioni in una curva di probabilità,  $p(\phi_m/E)$ , che esprime il nostro stato di conoscenza legato a  $\phi_m$ . Lo strumento fondamentale che si adatta bene a questo scopo è il *Teorema di Bayes*, che si formula nel modo seguente:

$$p(\phi_m/E) = p(\phi_m) \cdot \left[ \frac{p(E/\phi_m)}{p(E)} \right]$$

dove  $p(\phi_m/E)$  è la probabilità condizionata che viene assegnata a  $\phi_m$ , date le evidenze E. Viene anche chiamata “probabilità a posteriori”, visto che si ricava, o comunque dipende, dallo specifico valore di E;  $p(\phi_m)$  è la probabilità “a priori” o *probabilità marginale* che si vuole assegnare a  $\phi_m$  prima di conoscere l’evidenze E. “A priori” significa che non tiene conto di nessuna informazione riguardo E;  $p(E/\phi_m)$  è la probabilità condizionata che le evidenze E vengano rispettate se la frequenza è effettivamente  $\Phi_m$ ; infine  $p(E)$  è la probabilità “a priori” delle evidenze E (S. Kaplan, 1997).

Per utilizzare il teorema di Bayes è necessario esprimere le informazioni di tipo (1) e (3) attraverso la funzione  $p(\phi_m)$ , che si potrebbe definire funzione “generica”. Le conoscenze che derivano dall’esperienza fatta con l’impianto studiato, (2), costituiscono l’evidenze E, ed introducono al calcolo attraverso la funzione:

$$p(E/\phi_m) = \left( \frac{(\phi_m \cdot T_m)^{k_m}}{k_m} \right) \cdot e^{-\phi_m \cdot T_m}$$

Il denominatore,  $p(E)$ , rappresenta quindi la sommatoria, o l’integrale, del numeratore:

$$p(E) = \int_0^{\infty} p(\phi_m) \cdot p(E/\phi_m) \cdot d\phi_m$$

E garantisce che la normalizzazione di  $p(\phi_m/E)$  sia corretta.

### 3.4 Tipi di rischio

E’ possibile individuare differenti tipi di rischio:

- rischio percepibile *individualmente*;
- rischio percepibile *collettivamente*;
- rischio *calcolato*;
- rischio *reale*.

Il rischio percepibile è identificabile con la possibilità che avvenimenti avversi accadano (danni ambientali, ferite personali, danni collettivi, ecc.). Il

punto essenziale è chiedersi “chi” percepisce tale rischio, ed il “perché” venga percepito.

In genere “chi” rappresenta tutti coloro che soffriranno le conseguenze dell'accadimento dell'evento, mentre invece il “perché” si riferisce ai motivi per cui il rischio necessita di essere considerato.

La percezione del rischio, associato a particolari situazioni, dipende da fattori diversi e da considerazioni sia soggettive che obbiettive. Alcune di queste sono:

- *volontaria /involontaria natura del rischio;*
- *familiarità con la situazione;*
- *numero delle persone coinvolte;*
- *tipo di evento;*
- *contesto culturale;*
- *contesto personale;*
- *natura della comunicazione;*
- *esposizione a lungo o breve termine;*
- *immediatezza delle conseguenze.*

Per chiarire brevemente il primo punto sulla *volontarietà del rischio* basta fare un esempio: l'utente della strada, da un lato, è portato ad esigere livelli elevati di standard di sicurezza nei trasporti pubblici, dall'altro, invece, alla guida dei mezzi privati, manifesta una spiccata propensione ad assumere rischi elevati. Parte della ragione sta nel credere che, mentre nel caso dei trasporti pubblici il livello di rischio non è condizionato dalla volontà personale, nel caso della guida individuale, il rischio può essere “controllato” dall'abilità del singolo utente.

E' possibile osservare, inoltre, che la *familiarità*, più o meno presunta, tende a ridurre la percezione del rischio; ecco perché molti incidenti nelle officine accadono proprio al personale esperto.

Per quanto riguarda invece il *numero delle persone coinvolte*, il pubblico reagisce più marcatamente di fronte ad un disastro in cui molti perdono la vita (come per esempio un incidente aereo) piuttosto che allo stesso numero di vite perse in più incidenti. Nel caso degli incidenti stradali, per esempio, il tipo di

reazione del pubblico potrebbe essere, almeno parzialmente, un risultato dell'influenza dei media nel riportare le notizie sull'incidente.

Solitamente vi è una diversa reazione, più o meno forte, in relazione ad alcuni tipi di morte piuttosto che altri. La morte per incendio, infatti, è considerata più terrificante rispetto alla morte dovuta ad un incidente stradale.

Il *contesto culturale*, nel quale esiste una situazione di rischio, è legato alla sua percezione. Storicamente, ad esempio, nel West la morte era intesa come un "evento" poco rilevante, contrariamente a quanto accade oggi.

Il rischio percepito è strettamente legato al *contesto personale* o all'importanza dell'obiettivo da raggiungere; differente sarà, infatti, la valenza attribuita ad un rischio proprio o di qualcun altro.

Il modo in cui l'informazione, riguardo al rischio, viene ricevuta, è fortemente legato alla sua percezione. I servizi giornalistici nel *comunicare* un rischio, infatti, cercano di enfatizzare il pericolo e gli inconvenienti soprattutto se il rischio coinvolge in termini emozionali.

L'*esposizione* a lungo termine di un rischio viene considerata più preoccupante rispetto a quella a breve termine; ad esempio, infatti, vivere nei pressi di un impianto nucleare o chimico è ritenuto più allarmante di un viaggio in auto, poiché nel primo caso il rischio è vissuto con continuità, mentre nel secondo è considerato transitorio, e quindi accettabile.

In ultimo vi è il fattore dell'*immediatezza* dei risultati. Ad esempio molti fumatori, pur consapevoli dai danni causati dal fumare, sono disposti ad accettare il rischio perché le conseguenze non sono immediate. In questo caso i problemi futuri vengono sottovalutati rispetto al piacere immediato.

Oltre al rischio percepito individualmente, esiste anche la *percezione collettiva*, che influenza direttamente le decisioni da prendere; è la collettività, infatti, che dovendo fronteggiare la necessità di operare un cambiamento, può orientare le scelte verso soluzioni più o meno rischiose.

Il *rischio calcolato* è, invece, il livello di rischio ottenuto attraverso procedure di valutazione quantitativa del rischio. Si tratta di metodologie finalizzate al calcolo della probabilità di accadimento dell'evento rischioso e delle conseguenze ad esso associate. Consideriamo adesso il concetto di *rischio*

*reale*. La supposizione alla base di tale concetto è che, se tutte le informazioni relative alla probabilità ed alle conseguenze proprie di un incidente fossero conosciute allora il rischio così calcolato sarebbe proprio quello reale; al contrario, nel caso di informazioni imprecise ed incomplete, ciò non sarebbe più possibile. Questo punto di vista si poggia su ulteriori supposizioni: innanzitutto, il sistema deve essere stabile nel tempo, altrimenti le informazioni statistiche non possono essere raccolte, ed inoltre, l'informazione deve essere misurabile e le registrazioni devono essere valide. Infine la scala temporale dell'informazione sull'evento deve essere tale che l'informazione stessa possa essere raccolta. Nel caso dei terremoti, per esempio, l'incidenza dell'evento è rara, e pertanto le informazioni sono necessariamente scarse. D'altra parte, gli incidenti stradali sono sufficientemente frequenti da considerare la possibilità di raccogliere dati utili alla valutazione del rischio reale.

### **3.5 La percezione pubblica del rischio**

La percezione pubblica del rischio è la valutazione, sia razionale che emotiva, che il pubblico ha nei confronti di un dato evento.

L'atteggiamento del pubblico di fronte ai rischi è spesso di tipo emotivo e non ha alcuna relazione con la loro entità. E' tipico l'esempio delle persone che hanno paura di viaggiare in aereo, ma che viaggiano tranquillamente in automobile, mentre dai dati della tabella 3.5, che deriva da un'indagine condotta in Gran Bretagna, risulta che il rischio di morte per incidenti stradali è 50 volte superiore di quello per trasporto aereo.



<b>Causa</b>	<b>Decessi, in un anno, su un milione di persone</b>
Fumo	5000
Attacchi cardiaci	3200
Cancro al polmone	700
Incidenti stradali	150
Cadute accidentali	100
Incendi	20
Annegamenti	10
Trasporto aereo	3
Elettricità	2,5
Fulmini	0,2

Tabella 3.5: Rischi di morte dovuti a differenti cause.

A parità di uno stesso livello di rischio razionale (in termini, ad esempio, di frequenza di morti/esposti) il pubblico si allarma maggiormente, ed è più sensibilizzato da eventi catastrofici (esplosioni, terremoti, ecc.) che possono essere definiti di grande magnitudo con danni del tipo “tutto o niente”, con manifestazione singola ed istantanea piuttosto rara.

Inversamente il pubblico è poco sensibile nei confronti di *eventi cronici*, periodicamente ripetitivi (morti o infortuni sul lavoro, nei trasporti, incidenti domestici, ecc.), ed ancora meno nei confronti di danni non immediatamente visibili, come quelli latenti dell'inquinamento dell'aria e degli alimenti.

Il pubblico accetta più facilmente un evento cronico che provoca 1000 morti distribuiti nell'arco di 50 anni, che non un evento catastrofico che provoca la morte di 500 persone contemporaneamente, con periodicità di una volta ogni 25 anni.

### 3.6 Rischio “accettabile”

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

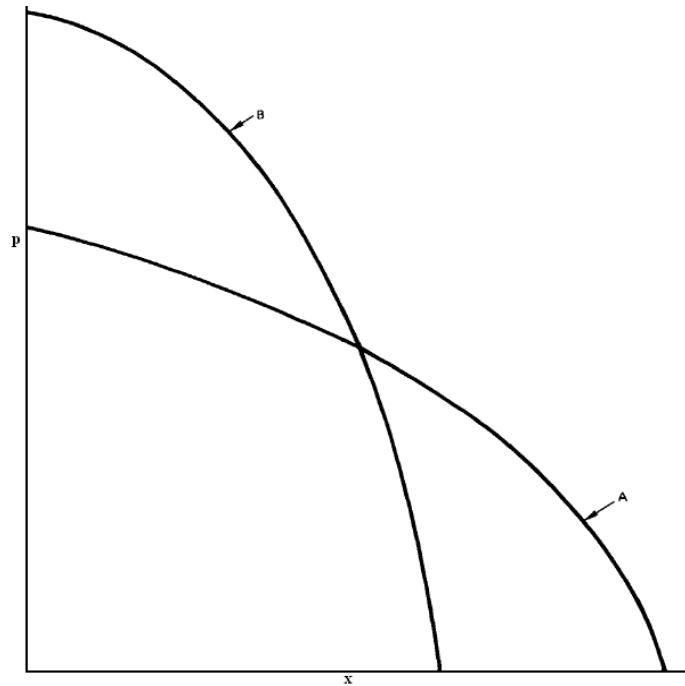


Figura 3.9: curve di rischio a confronto.

In primo luogo la nozione di rischio accettabile implica che il rischio stesso sia confrontabile linearmente. Ciò significa che il rischio di una certa linea di azione “A” è superiore, o inferiore, a quello di “B”. Considerando le curve di rischio, ad esempio nella figura 3.9, è evidente che i rischi sono diversi, ma non è possibile dire facilmente quel’è il più grande. Essi, quindi, non sono linearmente confrontabili.

La situazione è ancora più difficile se si devono confrontare le curve di rischio in formato di probabilità di frequenza, figura 3.10.

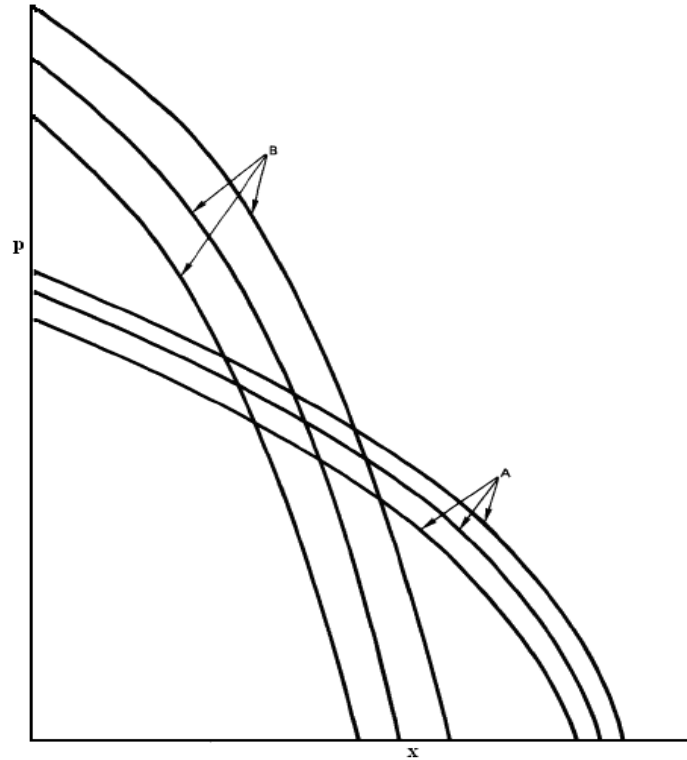


Figura 3.10: curve di rischio in formato di probabilità di frequenza.

Naturalmente è possibile ridurre queste curve di rischio, o famiglie di curve, a singoli numeri, introducendo per esempio la funzione *utilità* rispetto a  $x$ ,  $U(x)$ , e calcolandone il valore atteso. Per semplici curve di rischio, il valore atteso, della funzione utilità, si può esprimere come segue:

$$\bar{U} = -\int_0^{\infty} U(x) \cdot \frac{dp}{dx}(x) \cdot dx$$

Mentre per le curve di rischio in formato di probabilità di frequenza, per ogni curva discreta  $\phi_i$ , si può calcolare il valore atteso come:

$$\bar{U}_i = \int_0^{\infty} U(x) \cdot \frac{d\phi_i(x)}{dx} \cdot dx$$

E quindi:

$$\bar{U} = \sum_i p_i \bar{U}_i$$

Questi sono valori scalari, e quindi linearmente confrontabili, anche se vengono ottenuti con una grande perdita di informazioni nel calcolo del valore atteso (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980).

Supponendo ora che, confrontando questi scalari, si preferisca il rischio “B” rispetto a quello “A”, questo non basta per definire questo rischio come “accettabile”. Cioè un rischio può essere considerato accettabile o meno, se considerato da solo, ma soltanto in combinazione con tutti i costi e benefici a cui è legato.

Quindi la valutazione razionale dell'accettazione di nuovi rischi dovrebbe essere completata sulla base di un'*analisi costi/benefici*, ma in concreto quest'analisi risulta particolarmente complessa qualora si debbano monetizzare i benefici di tipo sociale, politico, estetico, culturale, ecc.. La valutazione, dunque, resta di carattere individuale, e sostanzialmente legata alla percezione pubblica dei benefici.

Inoltre, tale analisi, per essere rigorosamente valida, comporta la piena e completa conoscenza di tutti i possibili effetti positivi e negativi, diretti o indiretti, di un'attività. E' chiaro, quindi, che una simile conoscenza può essere sufficiente per attività già in essere da tempo ed in qualche modo dotate di una storia da analizzare, ma è senza dubbio approssimativa e lacunosa per nuove attività.

L'accettazione di nuovi rischi, e quindi la loro gestione, si attua così attraverso uno schema decisionale di tipo “democratico”, cioè che implica una reale accettazione sociale del rischio, e non una sua imposizione.

Un esempio di schema decisionale, per l'accettazione dei rischi che derivano da ogni nuova attività umana, o già esistente, oppure da prodotti industriali immessi nel mercato, è riportato in figura 3.11.

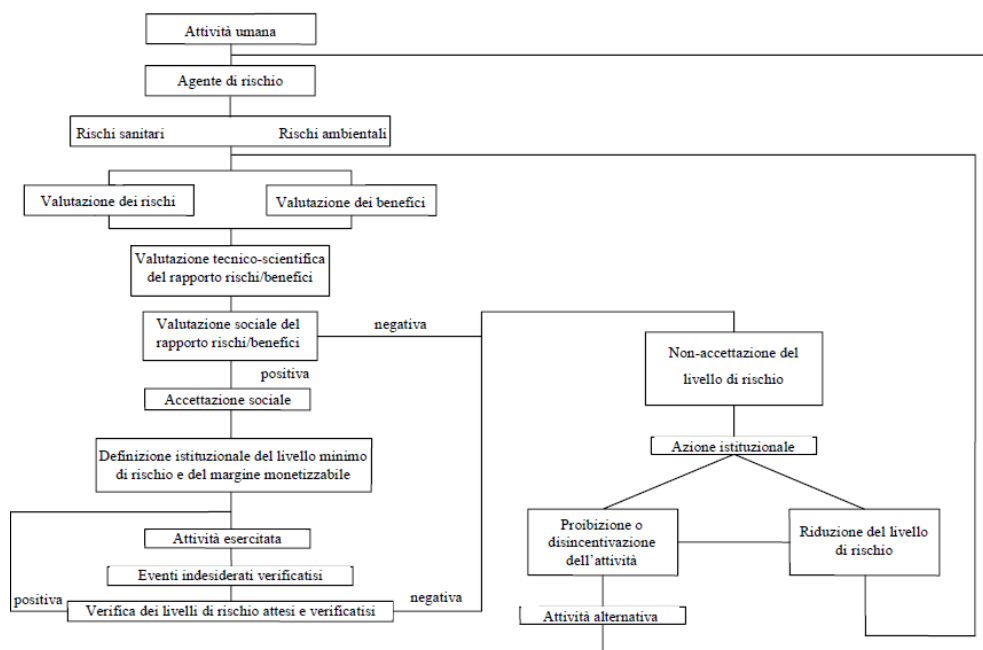


Figura 3.11: schema di gestione dei rischi.

La valutazione tecnico-scientifica del livello di rischio è solo una delle componenti necessarie per la definitiva *valutazione sociale* del rapporto costi/benefici, un tipo di valutazione, come già detto, fondata in larga parte su considerazioni sociali e politiche ed esprimibili come percezione pubblica dei rischi e dei benefici (F. Nuti, 1987).

Se tale valutazione è positiva si giunge all'*accettazione sociale del livello di rischio* e l'attività in questione, o l'agente di rischio, è accettato; viene poi formulata una definizione istituzionale del livello minimo di rischio, nonché dei margini di rischio monetizzabili con indennità ed assicurazioni. Ovviamente è necessaria una continua verifica, sulla base degli eventi negativi verificatisi successivamente, affinché il livello di rischio atteso e verificato sia soddisfacente.

Quando, sia a priori che a posteriori, la valutazione sociale del livello di rischio è negativa, e quindi il livello di rischio non è accettato, le Istituzioni dello Stato sono, nello stesso tempo, giudice e conciliatore tra le parti interessate (ad esempio, l'industria che propone un nuovo prodotto e gli utenti della fabbrica).

Lo schema decisionale illustrato ha il difetto di non tenere in alcun conto, o perlomeno di rendere equivalenti, i benefici apportati da queste nuove

attività. Ciò si traduce in pratica nella sola valutazione comparativa dei rischi, lasciando poi alla componente sociale la valutazione dei benefici in termini di *percezione pubblica del beneficio*.

La valutazione quantitativa dei rischi costituisce l'aspetto più importante dello schema decisionale, in quanto non esistono metodi univoci di stima e confronto, ma diversi approcci che partono da differenti punti di vista.

Il tipo di rischio stesso, inoltre, delinea diversi approcci in termini di maggiore o minore rigore in relazione alle priorità del rischio in questione in, confronto ad altri. In particolare è importante sottolineare che il rischio diventa sempre più prioritario ed urgente di definizione, quanto più è elevato il numero degli esposti, cioè quanto più aumenta il rischio di catastrofe.

### **3.7 Rischio in campo stradale**

Le osservazioni condotte sui dati d'incidentalità, rilevati sulla rete viaria stradale, evidenziano sempre di più i limiti del sistema "trasporto su strada".

Le infrastrutture stradali, infatti, si rivelano spesso inadeguate a dare risposte soddisfacenti, in termini di sicurezza e comfort, alla domanda di trasporto.

Nasce l'esigenza, a questo punto, di ricercare nuove metodologie di progettazione e di riqualificazione dei tracciati viari, finalizzate all'abbattimento del rischio di incidenti, e quindi al conseguimento di più elevati livelli di sicurezza.

L'analisi del rischio, anche in campo stradale, diviene uno strumento importante ed indispensabile, non solo per identificare le cause ed i fattori che stanno alla base dell'evento "incidente", ma soprattutto per fornire le informazioni utili alla sua prevenzione e riduzione.

Nell'ambito delle problematiche connesse all'incidentalità stradale non si può prescindere dal prendere in considerazione il binomio inscindibile costituito dalle caratteristiche dell'infrastruttura e dal comportamento dell'utente; in effetti, tale binomio è il principale "indiziato" come responsabile della sinistrosità stradale. Se si considera poi la convergenza casuale ed

immediata di ulteriori fattori sinergici, nella definizione delle condizioni di rischio in campo stradale, si comprende come sia estremamente difficoltosa, quasi impossibile, un'analisi sistemica e deterministica del problema.

Infatti, studi specifici basati esclusivamente sull'incidentalità osservata sulla rete, pur potendo fornire una risoluzione logica al singolo evento, non possono certamente definire una scala di pericolosità, o condizione di rischio, per le infrastrutture.

L'influenza dei singoli fattori (comportamento umano, condizioni ambientali, caratteristiche del veicolo e dell'infrastruttura, ecc.) può essere rilevata soltanto se si affronta il problema sulla base di un'analisi statistica multivariata, relativa ad un campione abbastanza ampio ed opportunamente disaggregato.

Anche dal punto di vista degli strumenti di progettazione e di gestione delle infrastrutture stradali, risulta evidente come la realtà del sistema viario nazionale dimostra, ormai in maniera inequivocabile, la crisi di un sistema "impositivo" (il progettista stradale doveva dimostrare solo di aver rispettato le norme tecniche), sia per l'aspetto relativo alla sicurezza, sia per quello ambientale. Gli strumenti esistenti si sono dimostrati, infatti, inadeguati alla realtà dinamica della nostra società, ed in particolare, all'evoluzione delle relazioni fra le componenti del sistema "strada - veicolo - uomo - ambiente". Le norme tecniche attuali rappresentano una condizione necessaria, ma non più sufficiente; occorre una visione globale, ma più specifica del problema, che consenta di definire un modello per conoscere in anticipo "il rischio" da fruizione dell'infrastruttura e quindi prevenirlo.

# Capitolo 4

## L'analisi del rischio

### 4.1 Introduzione

Dopo aver dissertato sul concetto di rischio e sulle sue implicazioni nei confronti di gran parte delle attività umane, risulta naturale prendere in esame la metodologia dell'analisi del rischio.

Il mondo finanziario e quello industriale, da tempo, usufruiscono delle procedure di analisi del rischio, le quali, in tempi recenti, stanno trovando incoraggianti consensi anche nell'ambito dell'ingegneria civile.

Nell'analisi del rischio è possibile individuare tre fasi fondamentali (S. Canale, S. Leonardi e C. Fabiano, 1998):

- identificazione degli incidenti che sono ipotizzabili in un dato contesto (strutturale, funzionale, ambientale, ecc.);
- valutazione quantitativa dei fattori che determinano il rischio:
  - stima delle probabilità di accadimento dell'incidente;
  - stima delle conseguenze associate all'ipotesi di incidente;
- valutazione e controllo del rischio inteso come processo di confronto con eventuali obiettivi di sicurezza, al fine di stabilire l'accettabilità e le azioni che possono essere intraprese per intervenire sui fattori che determinano l'evento e cioè per diminuire le frequenze di accadimento dell'incidente e/o le conseguenze ad esso associate.

L'identificazione del rischio comporta principalmente l'accumulo di conoscenze, basate su studi mirati o su esperienze storiche, che possano fornire informazioni su un dato pericolo. L'acquisizione di queste conoscenze, nel caso in cui si voglia effettuare, ad esempio, un'analisi di incidentalità stradale, avviene sulla base delle informazioni raccolte sugli incidenti già avvenuti. Mediante opportune elaborazioni dei dati d'archivio è, infatti, possibile individuare i tratti ed i punti ad elevata incidentalità e quindi collegare il



sinistro alla sua causa. In ogni caso, comunque, la fase di identificazione del rischio può avvenire attraverso l'articolazione di un processo a cascata, che consta di tre fasi:

- *monitoraggio*: è un processo ricorrente di osservazioni che vengono sistematicamente registrate;
- *screening*: è un processo di identificazione dei pericoli in base al quale si applica una procedura standardizzata, mirata a classificare prodotti, processi, fenomeni, ecc., rispetto al loro pericolo potenziale;
- *diagnosi*: è la determinazione del pericolo in termini di conseguenze, in rapporto ad una possibile causa.

La stima del rischio comprende l'analisi delle probabilità dell'evento e della consistenza delle conseguenze ad esso associate.

Si fa uso, in questo caso, di calcoli di tipo statistico, che, sulla base dei dati a disposizione e mediante l'adozione di modelli matematici, consentono di quantificare il rischio connesso ad un determinato evento.

E' possibile valutare la probabilità di un evento relativo ad un processo nuovo, per il quale non esistono "dati storici" a cui ricorrere. Tale valutazione può essere condotta adoperando metodi numerici più o meno complessi; fra questi ricordiamo la procedura dell'*analisi ad albero degli eventi*, cioè un processo logico che consente di scomporre la probabilità dell'evento finale nella sommatoria di una serie di eventi concatenati a cui è possibile assegnare determinate probabilità in base ad un altro tipo di analisi, detta *analisi ad albero delle cause*.

Queste procedure di analisi saranno oggetto di studio nei paragrafi che seguono.

La valutazione del rischio consiste nel valutare la misura del rischio in rapporto ad altri rischi ed in relazione ai benefici associati al rischio stesso; tali benefici, a loro volta, vengono valutati rispetto ai costi, attuali o ipotetici, associati alla prevenzione ed alla riduzione del rischio in esame.

Scopo dell'analisi è anche quello di identificare le condizioni che possono innescare l'evento incidente.

La verifica della sicurezza offre, quindi, attraverso l'indagine, la possibilità di disporre dei risultati qualitativi, ampliando così l'area di accertamento nel campo specifico rispetto ai semplici indici di frequenza e gravità dei sinistri che forniscono soltanto un valore puramente quantitativo del fenomeno dell'incidentalità, senza approfondirne le cause.

## 4.2 Individuazione delle sorgenti di rischio

Si è già avuto modo di osservare come l'analisi dei rischi richieda l'espletamento delle seguenti fasi:

- l'identificazione degli eventi indesiderati, o avversi, che conducono ad un incidente;
- l'analisi dei meccanismi attraverso cui gli eventi non desiderati possono avere luogo;
- la stima dell'estensione, della magnitudo e della probabilità di accadimento di qualunque fenomeno pericoloso.

Teoricamente l'analisi andrebbe applicata soltanto per l'identificazione delle sequenze incidentali credibili, associate ad ogni rischio potenziale. Sfortunatamente, però, gli incidenti poco credibili hanno l'abitudine di accadere nella realtà.

Il primo passo che si deve compiere, affrontando l'analisi dei rischi che interessano una certa area, è quello di individuare tutte quelle situazioni di processo che si candidano a costituire delle possibili sorgenti di incidenti rilevanti.

L'obiettivo di fondo è, dunque, quello di mettere in luce tutte le situazioni di rischio di incidente rilevante che possono esistere nell'ambito di un'area in esame.

I risultati dell'indagine si esplicitano in *mappe di rischio*, *curve di rischio sociale* ed *analisi di sensitività* (S. Canale, S. Leonardi e C. Fabiano, 1998).

### 4.2.1 Mappe di rischio

Per poter descrivere tali mappe, è necessario, come prima cosa, chiarire il concetto di *rischio locale*.

Il *rischio locale* è definito come la frequenza annua di morte di un individuo permanentemente collocato, senza mezzi di protezione e possibilità di fuga, in un certo punto di un'area geografica.

Tale rischio può essere rappresentato su una mappa tramite *curve isorischio*, ovvero curve che uniscono punti aventi lo stesso valore di rischio locale. Un esempio è rappresentato nella figura 4.1.

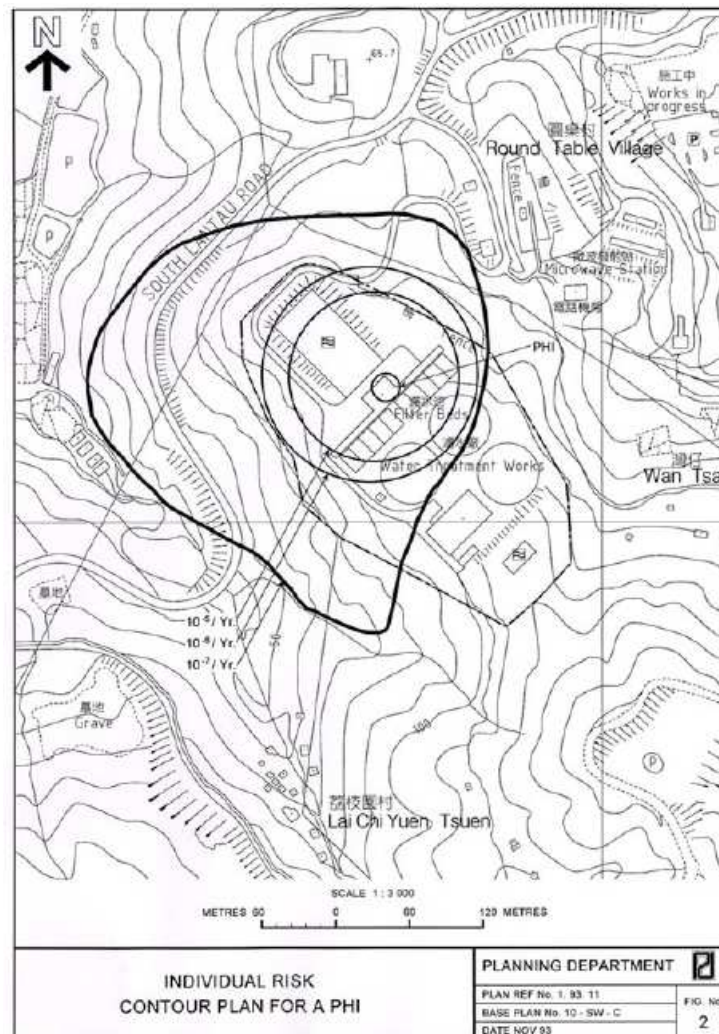


Figura 4.1: esempio di mappa di rischio locale.

Si tratta però di un indice “ideale”, in quanto si riferisce ad una situazione non reale, ovvero un individuo permanentemente presente nel medesimo punto, in assenza di qualsiasi protezione o mitigazione.

Per considerare una situazione reale, è possibile moltiplicare il valore del rischio locale per due fattori:

- probabilità di presenza dell'individuo nel punto dell'area in questione;
- fattore mitigativo, dovuto alla possibilità dell'individuo di proteggersi dagli effetti nocivi dell'incidente, per esempio rifugiandosi all'interno di edifici.

In questo modo si ottiene il *rischio individuale*, definito come la frequenza annua di morte di un individuo collocato in un certo punto di un'area geografica, considerando la probabilità di presenza in quel punto, la possibilità di disporre di mezzi di protezione e la possibilità di fuga.

Per le definizioni sopra riportate, quindi, emerge che il rischio individuale è sempre inferiore, o al massimo uguale, al rischio locale.

A questo punto si possono costruire le *mappe di rischio*, che sono ottenute tracciando le curve di isorischio individuale sulla pianta della zona di impatto, esprimendo così la stima del pericolo che un individuo corre a seconda della sua posizione.

Tali mappe individuano le zone a maggiore o minore pericolosità, e sono utili soprattutto nella fase di pianificazione delle emergenze, dato che permettono di prevedere quali possano essere, per ogni condizione ambientale, gli sviluppi possibili dell'incidente.

Non è difficile prevedere, per le mappe di rischio, anche un ruolo nell'ambito della gestione delle emergenze. Infatti, la crescente disponibilità di risorse di calcolo, permette la messa a punto di strumenti automatici di supporto alle decisioni che, avvalendosi delle misure delle condizioni ambientali e della tempestiva conoscenza delle caratteristiche incidentali, possono fornire, in tempo reale, le informazioni necessarie ad una corretta, pronta e, soprattutto, efficace gestione delle emergenze.

Nelle figure 4.2 e 4.3 sono riportate, sempre a titolo di esempio, le mappe relative al contributo del trasporto stradale e ferroviario al rischio totale

dell'area in esame, ottenuto analizzando i risultati di un'analisi condotta su un'area industriale, dove in primo luogo, si è valutato il rischio globale d'area, cioè quello a cui contribuiscono tutte le sorgenti. Quindi si sono esaminati i contributi parziali offerti dai singoli sistemi.

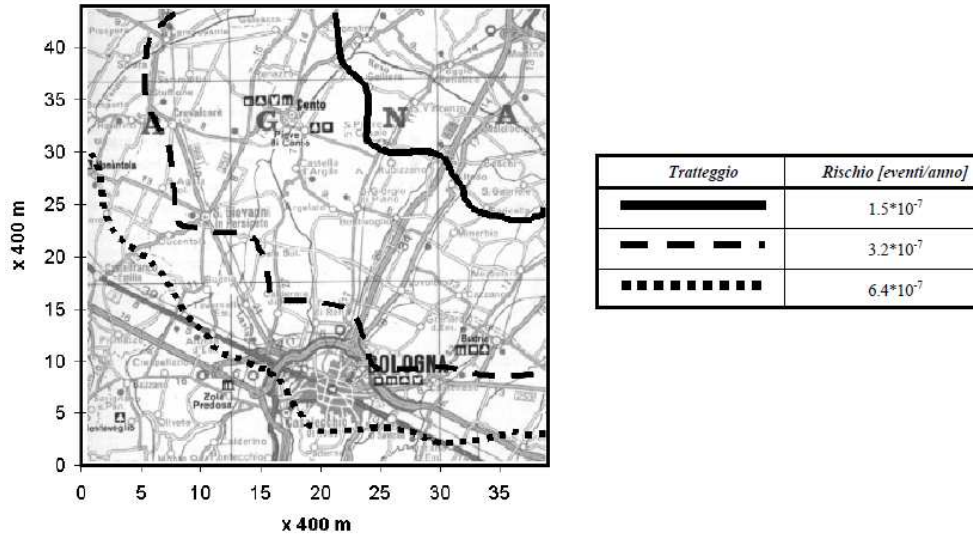


Figura 4.2: contributo del sistema stradale.

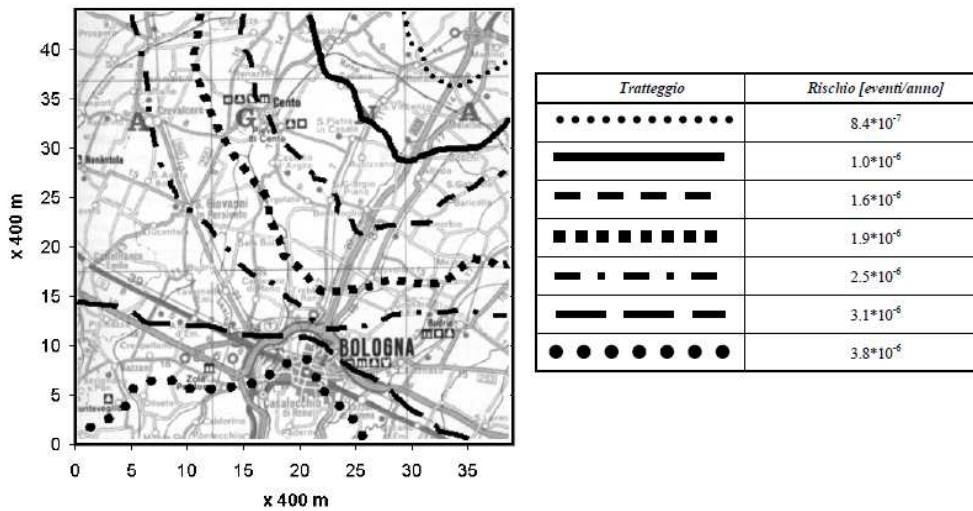


Figura 4.3: contributo della tratta ferroviaria.

## 4.2.2 Curve di rischio sociale

Il rischio sociale esprime l'impatto di un singolo evento su una comunità, in quanto è connesso all'idea che l'opinione pubblica ha del rischio: infatti, un unico evento che provoca un elevato numero di morti (come avviene, ad esempio, in un incidente aereo) ha un impatto psicologico maggiore di un numero elevato di eventi che provocano un morto ciascuno (come avviene, ad esempio, negli incidenti stradali).

E' evidente, quindi, che si tiene conto del numero di persone che possono essere coinvolte dagli effetti di un incidente.

Il rischio sociale è solitamente rappresentato mediante le *curve F-N*, ovvero grafici che riportano in ordinata la frequenza cumulata  $F$  con la quale, a seguito di tutti gli incidenti ipotizzabili a causa di un'attività, si ha nell'area considerata un numero di morti maggiore o uguale a  $N$ , riportato in ascissa. Queste curve permettono di valutare globalmente la situazione reale del rischio in una certa area geografica, svincolandosi dalla dipendenza spaziale della rappresentazione ottenibile con le mappe. In sede di pianificazione delle emergenze danno una misura chiara delle dimensioni della situazione in esame e costituiscono un utile riferimento per la predisposizione delle misure di emergenza, poiché consentono di qualificare la credibilità dei più gravi incidenti individuati nell'analisi.

In figura 4.4 è riportato un esempio di curva F-N.

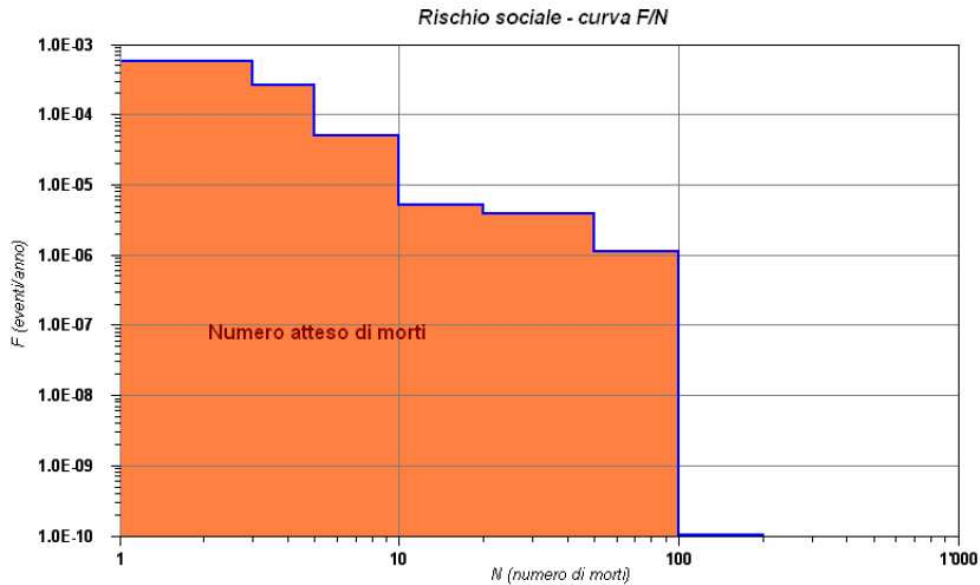


Figura 4.4: esempio di una curva F-N.

Il rischio sociale può anche essere rappresentato attraverso il *numero atteso di morti*, (E), che viene individuato dalla seguente relazione:

$$E = \sum_{N_{\min}}^{N_{\max}} f_i N_i$$

dove  $f_i$  è la frequenza (semplice) con la quale si sono verificati degli eventi con un numero di morti pari a  $N_i$ . Per sua stessa definizione, il numero atteso di morti è rappresentato graficamente, nel diagramma F-N, dall'area sottesa dalla curva.

### 4.2.3 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività consiste nello studio della variazione delle condizioni di rischio al variare di uno o più parametri del problema.

L'utilità di questo studio è notevole soprattutto in sede di pianificazione sia del territorio, che delle attività produttive, in quanto permette di individuare i contributi di ciascuna sorgente di rischio all'indice globale, e quindi di agire, sia nella prevenzione degli incidenti, che nell'adozione di misure volte alla

mitigazione delle conseguenze, nella direzione che consente di ottimizzare la pianificazione.

E', inoltre, uno strumento importante per quanti devono prendere decisioni circa la realizzabilità di opere, sia civili che industriali, e la loro dislocazione sul territorio.

### 4.3 Definizione degli scenari

Nel capitolo precedente il rischio è stato definito, quantitativamente, come un insieme di triple del tipo (S. Kaplan e B. J. Garrick, 1980):

$$R = \{ \langle S_i, p_i(\phi), \xi_i(x_i) \rangle \}$$

E' di fondamentale importanza, ora, chiarire come è possibile trovare gli scenari  $S_i$ , ovvero la prima parte della tripla.

In primo luogo si deve indicare con  $S_0$  il cosiddetto "scenario di successo", che sarà lo scenario di riferimento. A questo punto si deve pensare ad  $S_0$  come una traiettoria nello spazio del sistema, come mostrato dalla figura 4.5 (S. Kaplan, 1997).

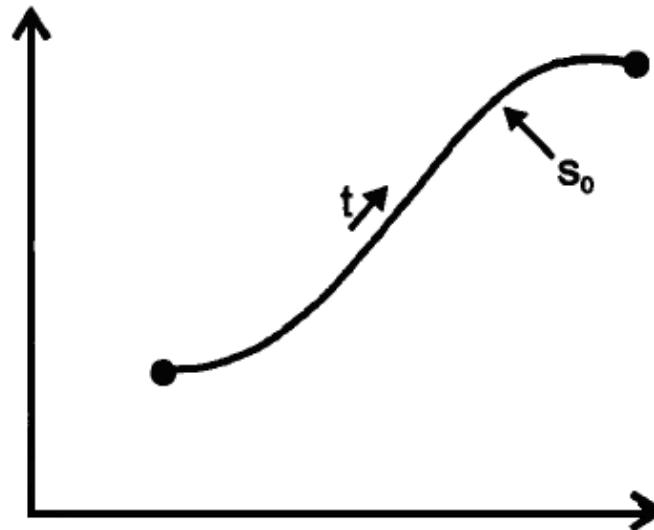


Figura 4.5: scenario  $S_0$  visto come una traiettoria nello spazio del sistema.



Ogni scenario di rischio,  $S_i$ , deve essere, quindi, considerato come una traiettoria che parte da  $S_0$ , e questo è rappresentato dalla figura 4.6.

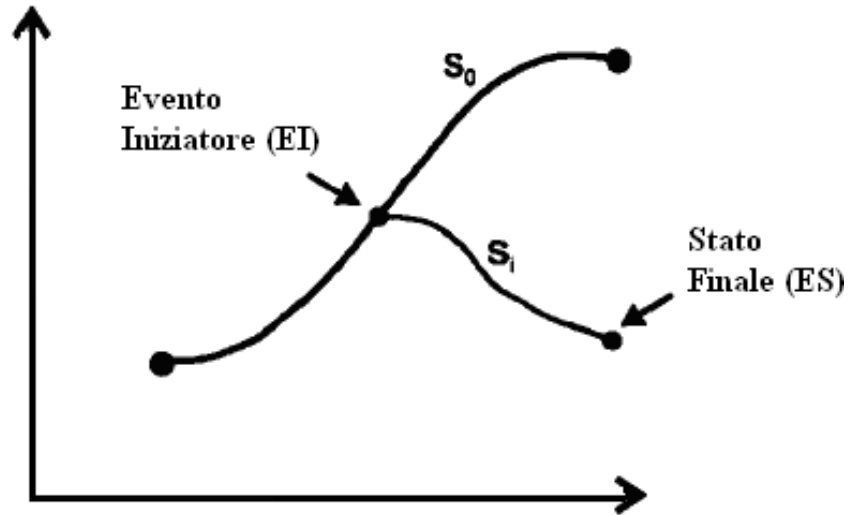


Figura 4.6: scenario di rischio  $S_i$  inteso come deviazione da  $S_0$ .

Pertanto, ci deve essere un punto di partenza in corrispondenza del quale accade il cosiddetto “Evento Iniziatore” (EI), che dà inizio allo scenario  $S_i$ , e continua fino a quando termina in uno “Stato Finale” (ES).

Ora, ciò che si avvicina maggiormente alla realtà è illustrato in figura 4.7, ovvero, da un evento iniziatore emerge un intero “albero” di più scenari, che dipende da quello che succede in seguito. Questo è proprio denominato “albero degli scenari” (S. Kaplan, 1997).

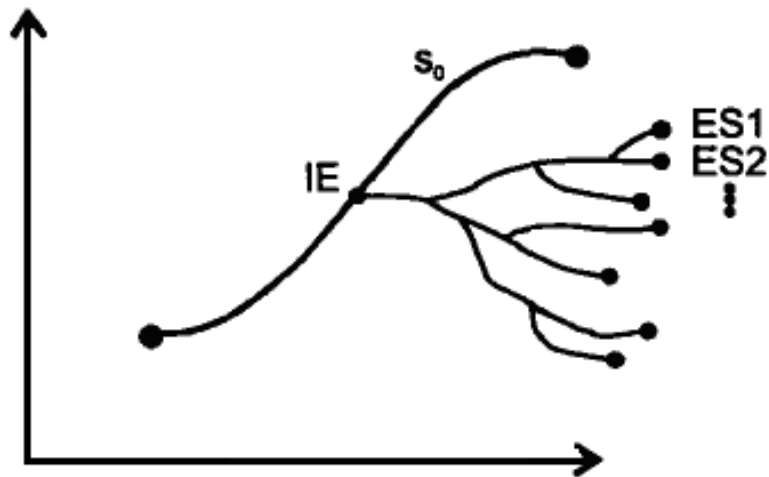


Figura 4.7: albero degli scenari che emerge da un evento iniziatore.

A seconda da come si sviluppano gli eventi, i “rami” di due alberi distinti possono confluire in uno stato finale comune. Graficamente, questo è rappresentato dalla figura 4.8.

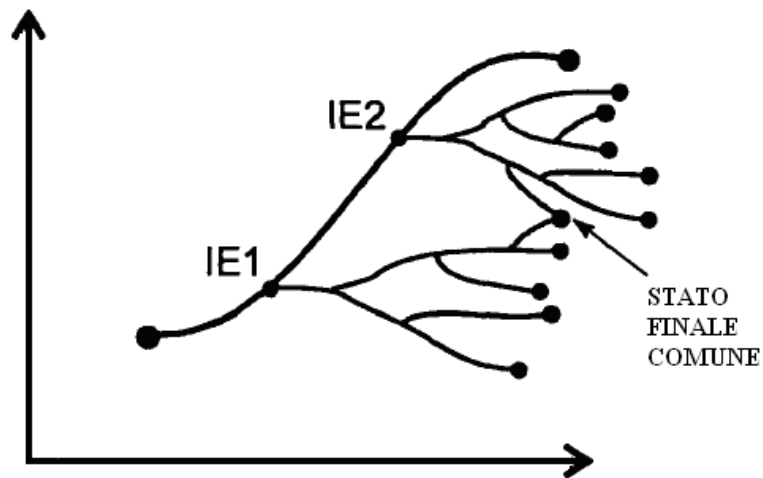


Figura 4.8: rami di diversi alberi possono convergere in uno stato finale comune.

Questo ci suggerisce che è anche possibile disegnare più alberi che terminano in un unico stato finale di interesse, come nella figura 4.9.

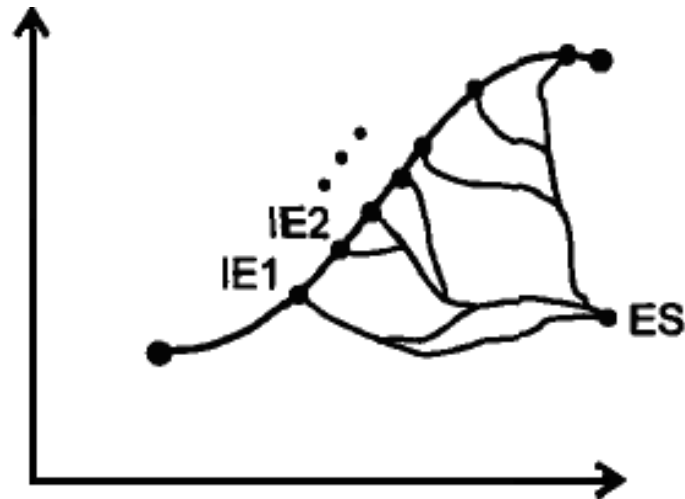


Figura 4.9: albero degli scenari “entrante”.

Questo potrebbe essere definito albero degli scenari “entrante”, noto anche come “albero delle cause”. I cosiddetti alberi “uscenti”, invece, sono conosciuti come “alberi degli eventi”.

Quindi, in definitiva, esistono almeno due metodi per determinare gli scenari finali. Il primo, consiste nel fissare tutti gli eventi iniziatori, e nel disegnare gli alberi “uscenti” da ciascuno di essi. Il secondo, invece, rappresenta esattamente il procedimento opposto, ovvero, consiste nell’individuare tutti gli stati finali di interesse, e nel delineare gli alberi “entranti” di ognuno.

In realtà esistono anche altri metodi per individuare gli tali scenari, uno di questi, per esempio, si sviluppa attraverso l’identificazione dei cosiddetti “stati medi”, a partire dai quali è possibile disegnare sia gli alberi “entranti”, che quelli “uscenti”, ovvero sia gli alberi degli eventi, che quelli delle cause. La figura 4.10 chiarisce questo concetto.

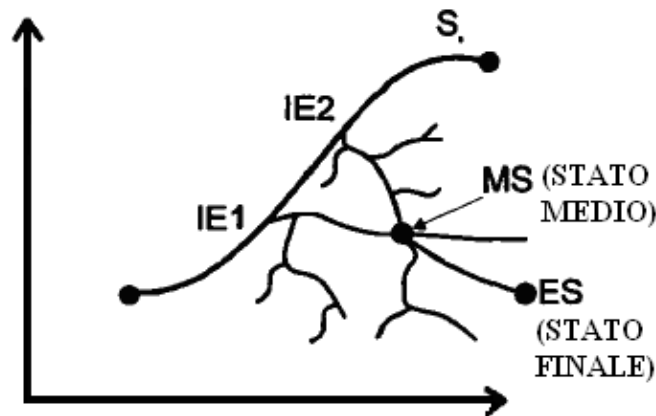


Figura 4.10: alberi “entranti” ed “uscenti” a partire dallo stato medio.

#### 4.4 Metodologie e procedura di analisi

Le informazioni necessarie all’analisi sono molteplici e di diversa natura, e non sempre facili da reperire. Il diagramma a blocchi, riportato in figura 4.11, illustra sinteticamente i passi che si devono seguire nello svolgere l’analisi del rischio in un’area industriale (S. Canale, S. Leonardi e C. Fabiano, 1998).

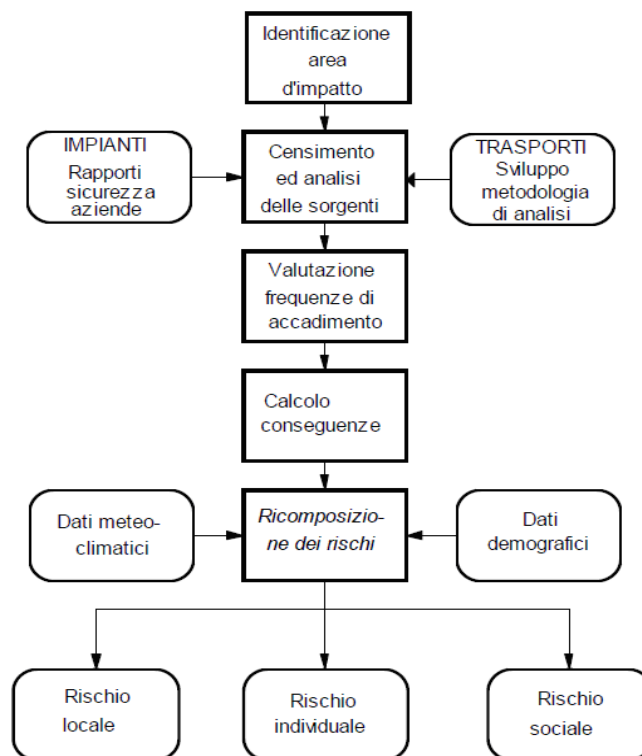


Figura 4.11: procedura di analisi

#### 4.4.1 Censimento delle sorgenti

Quella del censimento delle sorgenti del rischio è forse la fase più importante di tutto il procedimento.

Occorre individuare e caratterizzare le sorgenti di rischio che insistono sulla zona. Naturalmente ciò può avvenire soltanto con la collaborazione delle autorità pubbliche incaricate della protezione civile, controllo del territorio, pubblica salute e pubblica sicurezza.

Un'adeguata conoscenza delle sorgenti di rischio necessita dello studio dei *rapporti di sicurezza*, in cui vengono segnalate le situazioni di rischio più credibili e le frequenze di accadimento associate.

Il risultato di questa fase di censimento delle sorgenti di rischio è, quindi, un elenco di tutti gli eventi, detti *eventi iniziatori*, che sono all'origine di fenomeni incidentali, detti *scenari finali*. Gli scenari che discendono da uno stesso evento iniziatore sono mutuamente esclusivi, e vengono associati ad una probabilità di accadimento condizionata al verificarsi dell'evento iniziatore da cui provengono.

Gli eventi iniziatori identificati sono tra loro statisticamente indipendenti; non sono incompatibili, in quanto il verificarsi di uno di essi può causarne un altro per *effetto domino*. E' importante, quindi, esplicitare gli effetti domino che si sviluppano tra le diverse sorgenti, allo scopo di disporre dell'insieme di incidenti mutuamente esclusivi che possono avere effetto sull'area in esame. In questo modo sarà lecito sommare, punto per punto, il rischio attribuibile ad ogni incidente per ottenere i valori globali per l'intera area.

Ciascun evento iniziatore è caratterizzato dalle coordinate del sito in cui esso può avere luogo, dalle tipologie incidentali cui può dare origine e dalla frequenza di accadimento stimata.

Ogni tipologia accidentale, a sua volta, è contraddistinta dalla probabilità di accadimento e dalla probabilità di generare un effetto domino sugli altri effetti iniziatori.

Pertanto, per ciascuna delle tipologie, occorre determinare quali altri eventi iniziatori cadono all'interno dell'area in cui le conseguenze dell'incidente hanno una probabilità finita di causare l'effetto domino.

#### **4.4.2 Combinazione dell'analisi ad albero degli eventi con quella ad albero delle cause nella valutazione della frequenza di accadimento degli scenari**

Come metodologie di analisi, sia quella ad albero degli eventi ("event tree analysis", ETA), sia quella ad albero delle cause ("fault tree analysis", FTA), vengono utilizzate nella valutazione probabilistica del rischio ("probabilistic risk assesment", PRA), ed in particolare, nell'individuazione delle interrelazioni di sistema dovute ad eventi condivisi.

Nonostante ci siano sostanziali differenze tra esse, l'ETA e l'FTA sono strettamente collegate, al punto che gli alberi delle cause (FT) vengono utilizzati per quantificare gli eventi di sistema che appartengono a sequenze di alberi degli eventi (ET); quindi, le cause dei punti di diramazione degli stessi ET sono determinate utilizzando gli FT (Hong Xu e J. B. Dugan, 2004).

##### **4.4.2.1 Struttura ad albero degli eventi**

L'albero degli eventi è una rappresentazione grafica di eventi attenuanti, oppure aggravanti, che si possono verificare in risposta ad alcuni *eventi iniziatori* (EI), definiti come potenziali circostanze pericolose che danno origine a tutti gli altri eventi. Poiché il numero di questi ultimi aumenta, l'immagine si apre a ventaglio, proprio come i rami di un albero.

Le tecniche ETA vengono, comunemente, utilizzate per identificare le conseguenze che possono risultare dal verificarsi di un evento potenzialmente pericoloso. Sono state applicate, inizialmente, nella valutazione del rischio per l'industria nucleare, ma oggi vengono utilizzate anche in altri settori industriali, come, ad esempio, nei processi chimici, nella produzione di petrolio e gas in mare aperto, e nel settore dei trasporti.

La quantificazione degli alberi definisce la frequenza di ciascuno dei risultati previsti. In uno studio del rischio, le conseguenze degli eventi studiati, espresse generalmente in termini di numero di vittime o di feriti, possono essere combinate insieme alla frequenza con la quale si verifica l'evento stesso, in modo da generare curve F-N, fondamentali nella valutazione dell'accettabilità del rischio.

L'ETA è un'analisi di tipo induttivo, che esamina tutti i possibili effetti di un evento iniziatore, procedendo da sinistra a destra nella struttura logica ad albero. I punti di diramazione rappresentano, in genere, il successo, il fallimento o il parziale fallimento dei sistemi e sottosistemi che possono replicare all'EI.

Un esempio di un albero degli eventi è mostrato in figura 4.12, dove viene anche messa in evidenza l'importanza del teorema di Bayes nella valutazione dei risultati (M. Guarascio, 2008).

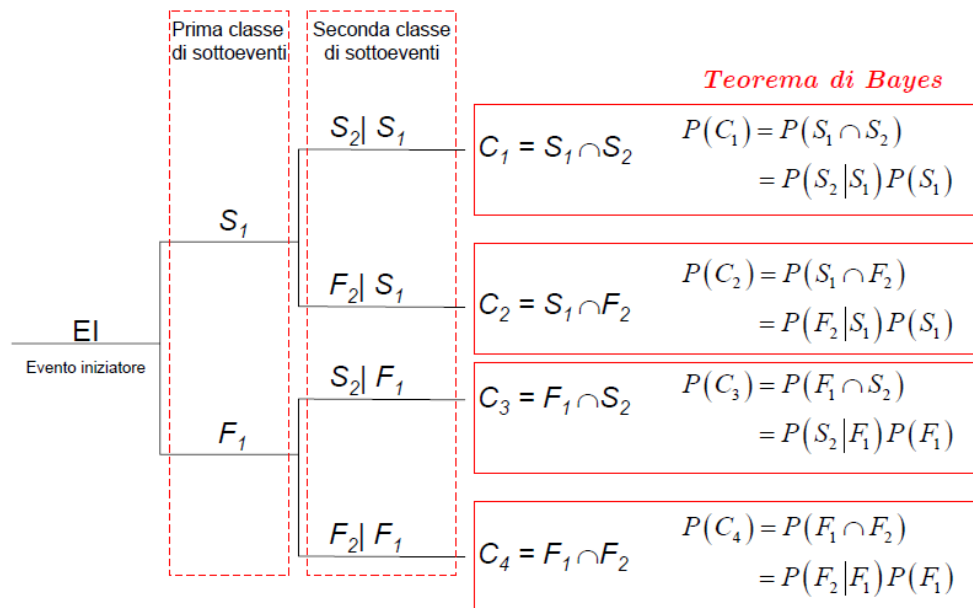


Figura 4.12: esempio di una struttura ad albero degli eventi.

Si può notare che l'evento iniziatore da luogo, in questo esempio, a due classi di sottoeventi, che dipendono dal successo (S) o dal fallimento (F) di due eventuali sottosistemi. Per valutare la probabilità di accadimento degli *eventi*

*conseguenza* (C), che rappresentano i risultati dell'analisi, si fa riferimento al teorema di Bayes:

$$P(A \cap B) = P(A | B) \cdot P(B)$$

Ovvero, la probabilità dell'intersezione di due eventi è uguale al prodotto della probabilità di uno degli eventi, per la probabilità condizionata dell'altro, calcolata a condizione che il primo abbia luogo. I due eventi A e B si dicono, poi, statisticamente indipendenti, se il verificarsi di uno non altera la probabilità di realizzazione dell'altro:

$$P(A | B) = P(A); P(B | A) = P(B)$$

Gli eventi risultanti sono mutuamente disgiunti, dunque, la somma delle loro probabilità di accadimento è pari all'unità, e l'unione delle possibili conseguenze costituisce l'evento certo:

$$P(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4) = 1$$

#### 4.4.2.2 Struttura ad albero delle cause

L'FTA va annoverato tra i metodi di analisi di tipo deduttivo in quanto, partendo da un'analisi "generale" e complessiva del tipo di guasto (o evento indesiderato sul sistema), arriva ad individuare i guasti sui componenti.

Questa metodologia di analisi permette, in modo grafico e logico, di collegare fra loro i guasti dei componenti di un sistema. Lo scopo principale è quello di valutare le cause dei guasti, e, partendo dal fallimento del sistema (*evento indesiderato* o *top event*), consente di metterlo in relazione funzionale con i guasti sui componenti.

Prima di descrivere nel dettaglio questa tecnica, possono risultare utili alcune definizioni (J. D. Andrews e S. J. Dunnnett, 2000):

- *evento indesiderato* o *top event*: rappresenta il guasto relativo al sistema funzionale sotto esame; può essere combinazione di numerose cause, e quindi avrà un numero "n" di eventi (*nodi del sistema*) che lo precedono e lo determinano, ma nessun evento che lo succede;
- *combinazione di cause*: è il presentarsi simultaneo di guasti degli elementi funzionali che portano all'evento indesiderato; la più piccola



combinazione ne contiene, ovviamente, il numero necessario a causare il *top event*;

- *unità esaminata*: è l'oggetto da esaminare, identificato dalle sue caratteristiche funzionali e costruttive;
- *componente*: è l'unità esaminata di livello più basso, alla quale può essere assegnato uno o più elementi funzionali.

I simboli utilizzati nel diagramma logico sono chiamati *logic gates*, e sono simili ai simboli utilizzati dai progettisti di circuiti elettronici digitali: OR ed AND. Graficamente assumono l'aspetto riportato in figura 4.13:



Figura 4.13: rappresentazione grafica dei *gate* OR ed AND.

Un semplice esempio di struttura ad albero delle cause è illustrato nella figura 4.14.

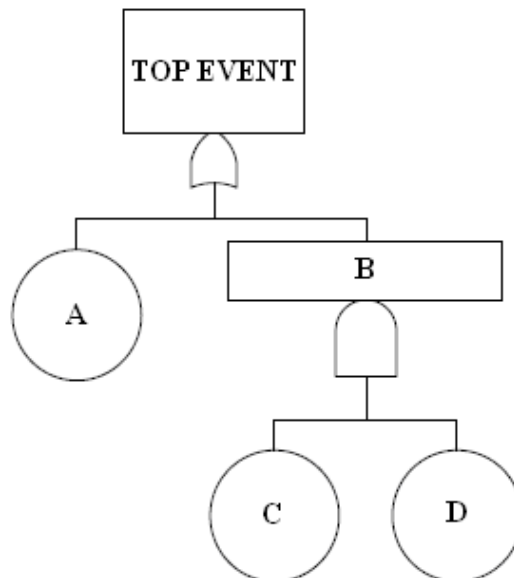


Figura 4.14: struttura ad albero delle cause.

Dalla figura si evince che l'evento indesiderato (il *top event*) può accadere, o se si verifica l'evento di base A, oppure se si verifica B, che, a sua volta, è dato dal verificarsi contemporaneo degli eventi di base C e D.

#### 4.4.2.3 Alberi degli eventi indipendenti

La figura 4.15 mostra un albero degli eventi molto semplice, per un ipotetico sistema di sicurezza.

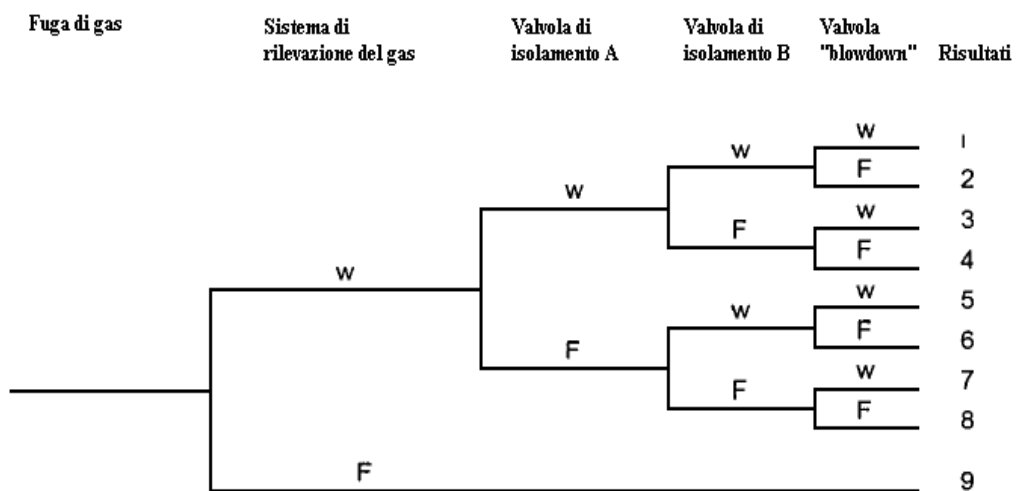


Figura 4.15: albero degli eventi per una ipotetica fuga di gas.

L'evento iniziatore è, in questo caso, una fuga di gas su una piattaforma off-shore. I punti di diramazione prendono, poi, in considerazione il successo (W) ed il fallimento (F) del sistema di rilevazione del gas, dei sottosistemi costituiti dalle valvole di isolamento "A" e "B" e del sottosistema composto dalla valvola "blowdown". I risultati, individuati dal punto finale di ogni ramo, individuano diversi eventi conseguenza che seguono quello iniziatore.

In un secondo momento, possono essere costruiti dei "fault trees", proprio per sviluppare le cause di ogni sottosistema di fallimento. Per un sistema coerente, nel quale, cioè, i punti di diramazione non sono legati gli uni agli altri, e quindi falliscono in maniera indipendente, la quantificazione dell'albero degli eventi consiste nel prodotto tra la probabilità di passaggio

lungo ogni ramo che attraversa il diagramma e la frequenza dell'evento iniziatore (J. D. Andrews e S. J. Dunnett, 2000).

La  $P_f$ , ovvero la probabilità di guasto del sistema, può essere valutata quantificando il relativo albero delle cause; mentre  $1 - P_f$  rappresenta la probabilità di passaggio lungo un ramo di successo del diagramma.

Si hanno "forti" dipendenze quando per un evento dato dal sistema "A" segue un altro evento fornito dal sistema "B", tali che:

$$\Pr\{A|B\} = 1 \text{ oppure } \Pr\{A|B\} = 0$$

Come si può notare dalla figura 4.15, se il sistema di rilevamento del gas non funziona, o comunque non assolve il suo compito, allora nessuno degli altri sottosistemi verrà attivato, pertanto la loro disponibilità sarà irrilevante, poiché la conseguenza di questa sequenza è già stabilita. Quest'ultima è rappresentata dalla linea che parte dal ramo di fallimento del sistema di rilevamento del gas, ed attraversa tutto il diagramma, indicando che il solo verificarsi di questo evento determina già un risultato.

#### 4.4.2.4 Dipendenze negli alberi degli eventi

La procedura per analizzare gli alberi degli eventi, quando sono presenti "deboli" dipendenze, si complica, poiché il sistema non è più coerente. Questa situazione si verifica quando gli eventi di base, che rappresentano i guasti dei componenti in un FT, appaiono in più di un albero delle cause, che determinano i motivi delle diramazioni negli alberi degli eventi.

Si può considerare, per esempio, l'albero illustrato in figura 4.16.

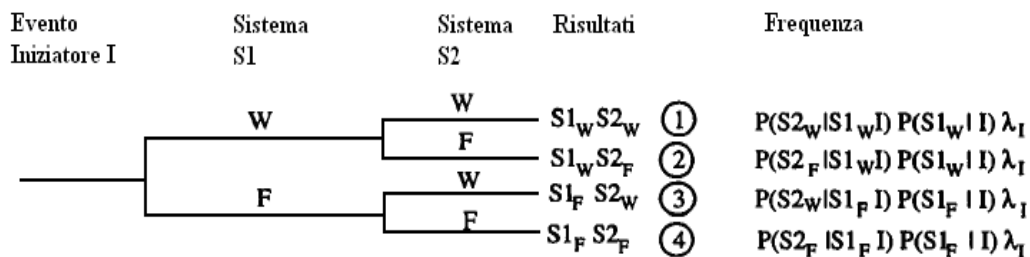


Figura 4.16: struttura di un semplice albero degli eventi.

Sono presenti solo due sottosistemi, "S1" ed "S2", che possono essere attivati in seguito all'evento iniziatore, I, indicando con  $\lambda_1$  proprio la sua frequenza di accadimento.

Gli alberi delle cause, che rappresentano il fallimento di questi sottosistemi sono, rispettivamente, nella figura 4.17 (a) e (b).

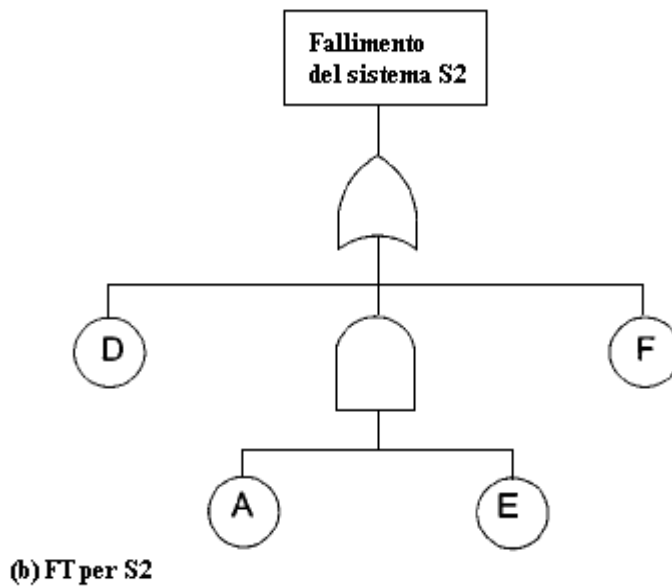
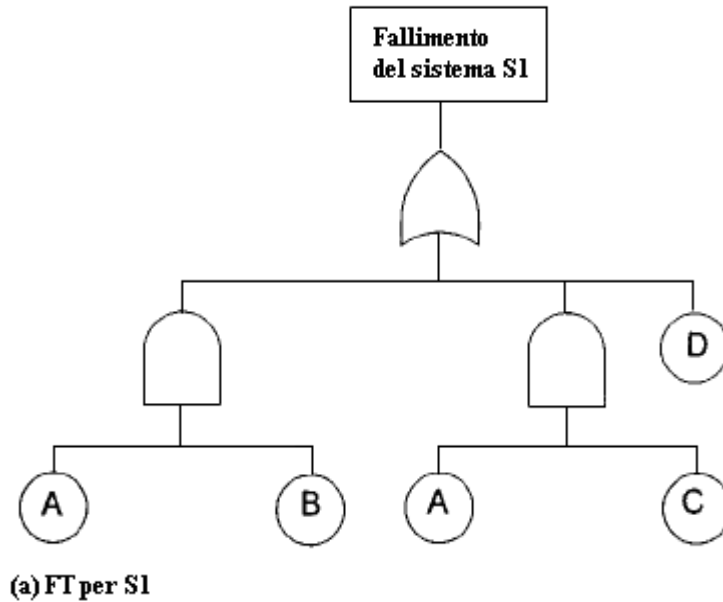


Figura 4.17: alberi dei guasti per il fallimento dei sistemi S1 ed S2.

Poiché gli eventi di base “A” e “D” si verificano in entrambi gli FT, si può evidenziare questa “debole” dipendenza tra gli eventi che si verificano nei sottosistemi di fallimento.

I quattro risultati, che si possono verificare in seguito all'evento iniziatore, si possono rappresentare attraverso la loro espressione booleana, come:

$$T_1 = \bar{T}_{S_1} \cdot \bar{T}_{S_2}, \quad T_2 = \bar{T}_{S_1} \cdot T_{S_2}, \quad T_3 = T_{S_1} \cdot \bar{T}_{S_2}, \quad T_4 = T_{S_1} \cdot T_{S_2}.$$

Dove con il termine  $T_j$  si indica proprio il risultato j-esimo dell'albero degli eventi, mentre  $T_{S_i}$  è l'espressione booleana del *top event* per il sistema  $S_i$ .

Le figure 4.18 (a) e (b) mostrano, invece, la doppia formulazione degli alberi delle cause che rappresentano il funzionamento dei sottosistemi.

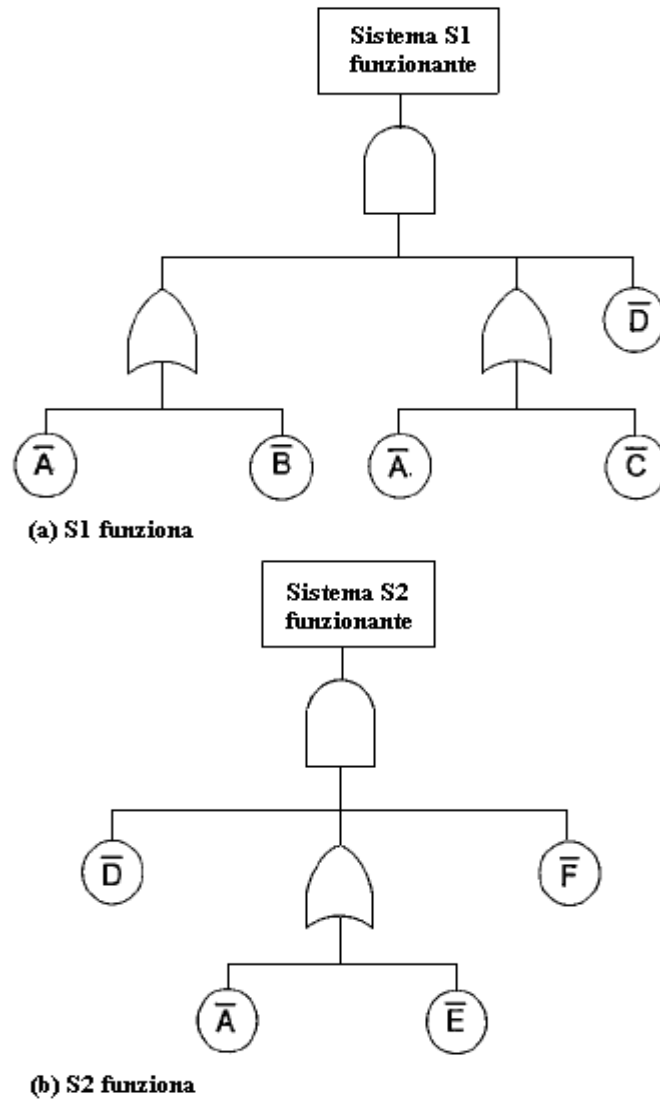


Figura 4.18: alberi delle cause per il funzionamento dei sistemi S1 ed S2.

A partire dagli alberi delle cause che portano al fallimento dei sottosistemi, è possibile ricavare le espressioni booleane che forniscono le combinazioni di guasti che conducono al *top event*:

$$T_{S_1} = A \cdot B + A \cdot C + D \quad (\text{MCS: } AB, AC, D)$$

$$T_{S_2} = D + F + A \cdot E \quad (\text{MCS: } AB, AC, D)$$

Dove con la sigla MCS si indicano i cosiddetti *minimal cut set*, ovvero le combinazioni dei componenti degli eventi di guasto, necessari e sufficienti a generare il *top event*.

D'altra parte, prendendo in considerazione gli alberi delle cause relativi al funzionamento dei sottosistemi, si possono ottenere le seguenti espressioni:

$$\bar{T}_{S_1} = (\bar{A} + \bar{B}) \cdot (\bar{A} + \bar{C}) \cdot \bar{D} = \bar{A} \cdot \bar{D} + \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \quad (\text{PI: } \overline{AD}, \overline{BCD})$$

$$\bar{T}_{S_2} = \bar{D} \cdot \bar{F} \cdot (\bar{A} + \bar{E}) = \bar{A} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} + \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F} \quad (\text{PI: } \overline{ADF}, \overline{DEF})$$

Dove PI sta per *prime implicant*, che rappresenta una combinazione di eventi di base (di successo o di fallimento) necessari e sufficienti per causare il *top event*.

#### 4.4.2.5 FTA quantitativa

Lo scopo dell'analisi è quello di valutare la probabilità di accadimento degli eventi conseguenza che risultano dall'ET studiato. Questa probabilità, in relazione a quanto detto nel paragrafo precedente, può essere definita come la probabilità che si verifichi uno dei quattro risultati "T", ovvero  $P_r\{T\}$ .

Una volta che sono state determinate tutte le "n" cause del *top event*,  $C_i$  con "i" che appunto va da 1 ad "n", cioè i "MCS" o i "PI", si può ottenere la sua probabilità di accadimento attraverso l'approccio *Inclusion-Exclusion Expansion (IEE)*, contenuto nella seguente equazione:

$$P_r\{T\} = \sum_{i=1}^n P_r\{C_i\} - \sum_i \sum_j P_r\{C_i \cap C_j\} + \sum_i \sum_j \sum_k P_r\{C_i \cap C_j \cap C_k\} + \dots + (-1)^{n+1} \cdot P_r\{C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_n\}$$

Chiaramente, se l'albero delle cause è molto grande, per cui presenta un numero elevato di "MCS", la stima della  $P_r\{T\}$  richiederà calcoli estesi per valutare ogni termine dell'espressione scritta sopra (J. D. Andrews e S. J. Dunnett, 2000).

Per questo motivo spesso si rischia di oltrepassare la capacità dei calcolatori, e pertanto è conveniente ridurre i calcoli ad una dimensione pratica utilizzando delle approssimazioni (R. M. Sinnamon e J. D. Andrews, 1997). Una di queste viene espressa, introducendo l'evento raro,  $P_{RE}\{T\}$ , dalla relazione che segue:

$$P_{RE}\{T\} = \sum_{i=1}^n P_r\{C_i\}$$

Tuttavia, un'approssimazione più precisa si ottiene sia utilizzando l'IEE e troncando i termini dopo il primo oppure il secondo, sia utilizzando l'approssimazione detta “MCS upper bound”, ovvero:

$$P_r \{T\} \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_r \{C_i\}]$$

Per gli alberi delle cause coerenti, il troncamento dell'equazione, che si ottiene con l'approccio IEE, è giustificato perché i termini che si considerano, con il verificarsi simultaneo di combinazioni di fallimento di ordine superiore, forniscono un contributo di rapida diminuzione numerica nella probabilità che si verifichi il *top event*.

Se invece l'albero non è coerente, allora tutte queste approssimazioni potrebbero non essere valide; non solo, ma se è anche di grandi dimensioni, e quindi complesso, non si riesce a valutare la  $P_r \{T\}$  in tempi ragionevoli. In questo caso è necessario ridurre i “PI” alle loro “approssimazioni coerenti”, cioè si deve considerare  $P_r \{\text{ sistema funzionante} \} \approx 1$ , prima di poter utilizzare le equazioni (J. D. Andrews e S. J. Dunnett, 2000).

Ovviamente, prima di poter applicare queste relazioni, è necessario individuare le cause di ogni risultato prodotto dall'albero degli eventi, e questo è equivalente alla realizzazione di espressioni booleane, che per l'esempio in questione assumono la forma seguente:

$$\begin{aligned} T_1 &= \bar{T}_{S_1} \cdot \bar{T}_{S_2} \\ &= (\bar{A} \cdot \bar{D} + \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D}) \cdot (\bar{A} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} + \bar{D} \cdot \bar{F} \cdot \bar{E}) \\ &= \bar{A} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} + \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} \cdot \bar{E}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \bar{T}_{S_1} \cdot T_{S_2} \\ &= (\bar{A} \cdot \bar{D} + \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D}) \cdot (D + F + A \cdot E) \\ &= \bar{A} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} + \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot F + A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot E; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3 &= T_{S_1} \cdot \bar{T}_{S_2} \\ &= (A \cdot B + A \cdot C + D) \cdot (\bar{A} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} + \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F}) \\ &= A \cdot B \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F} + A \cdot C \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F}; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 T_4 &= T_{S_1} \cdot T_{S_2} \\
 &= (A \cdot B + A \cdot C + D) \cdot (D + F + A \cdot E) \\
 &= A \cdot B \cdot F + A \cdot B \cdot E + A \cdot C \cdot F + A \cdot C \cdot E + D;
 \end{aligned}$$

#### 4.4.2.6 Quantificazione della frequenza dei risultati

Gli “MCS” ed i “PI”, valutati durante l’analisi, vengono utilizzati insieme alla probabilità di accadimento di ogni evento di base per valutare tutte le frequenze di ogni risultato dell’albero,  $\lambda_i$ . Per ottenere risultati esatti si deve moltiplicare la probabilità relativa ai rispettivi *top event*, per la frequenza con la quale si verifica l’evento iniziatore (J. D. Andrews e S. J. Dunnett, 2000).

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= \lambda_1 \cdot P_r \{T_1\} \\
 &= \lambda_1 \cdot [P_r \{\bar{A} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F}\} + P_r \{\bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} \cdot \bar{E}\} - P_r \{\bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot \bar{F} \cdot \bar{E}\}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_2 &= \lambda_1 \cdot P_r \{T_2\} \\
 &= \lambda_1 \cdot \left[ \begin{aligned} &P_r \{\bar{A} \cdot \bar{D} \cdot F\} + P_r \{\bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot F\} + P_r \{A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot E\} \\ &- P_r \{\bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot F\} + P_r \{A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \cdot E \cdot F\} \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_3 &= \lambda_1 \cdot P_r \{T_3\} \\
 &= \lambda_1 \cdot [P_r \{A \cdot B \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F}\} + P_r \{A \cdot C \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F}\} - P_r \{A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} \cdot \bar{F}\}]
 \end{aligned}$$

In questo caso è possibile eseguire il calcolo esatto perché l’albero dell’esempio in questione è molto semplice e di piccole dimensioni. Quando sono presenti migliaia, o anche centinaia di migliaia, di “MCS” o “PI”, allora questi calcoli non possono essere eseguiti.

Per alberi delle cause coerenti l’espressione che deriva dall’approccio *Inclusion-Exclusion Expansion* converge, ed il troncamento dopo il primo, o il secondo, termine produce, in genere, un risultato di precisione accettabile. In alternativa l’approssimazione detta “*MCS upper bound*” fornisce risultati più precisi.

Per alberi delle cause non coerenti, invece, la convergenza dell’IEE può essere molto lenta e devono essere valutati un numero molto elevato di termini. In questi casi viene utilizzato un metodo alternativo che è quello

dell'“approssimazione coerente”. Considerando il semplice esempio analizzato, si otterrebbe:

$$\lambda_1 = \lambda_1 \cdot P_r \{T_1\} = \lambda_1$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \lambda_1 \cdot P_r \{T_2\} \\ &= \lambda_1 \cdot [P_r \{F\} + P_r \{A \cdot E\} - P_r \{A \cdot E \cdot F\}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \lambda_1 \cdot P_r \{T_3\} \\ &= \lambda_1 \cdot [P_r \{A \cdot B\} + P_r \{A \cdot C \cdot \cdot\} - P_r \{A \cdot B \cdot C \cdot \cdot\}] \end{aligned}$$

Per poter fornire un confronto numerico dei risultati e degli effetti delle approssimazioni, si può considerare, a titolo di esempio:

- probabilità di fallimento di ogni componente = 0,1
- $\lambda_1 = 0,1/\text{anno}$

I risultati sono riassunti nella tabella 4.1.

<b>RISULTATI DELL'ALBERO DEGLI EVENTI</b>	<b>PROBABILITA' ESATTA</b>	<b>APPROSSIMAZIONE COERENTE</b>	<b>ERRORE (%)</b>
1	0,788049	1,0	26,9
2	0,094851	0,109	14,9
3	0,013851	0,019	37,2
4	0,103249	0,103249	0,0

Tabella 4.1: confronto tra la probabilità esatta e l'“approssimazione coerente”.

Si può notare una grande percentuale di errori anche se questo esempio è relativamente semplice.

## 4.5 Strategia di analisi ad albero delle cause attraverso l'utilizzo dei "Binary Decision Diagrams"

Il metodo "binary decision diagram" (BDD), sviluppato da Rauzy nel 1996, è emerso come un'alternativa alle tecniche convenzionali per l'esecuzione dell'analisi sia qualitativa, che quantitativa, degli alberi delle cause. I BDD stanno dimostrando di essere già importanti nella valutazione dell'affidabilità, fornendo uno strumento di analisi più efficace, preciso e senza la necessità delle approssimazioni utilizzate nel tradizionale approccio della teoria cinetica ad albero.

Questo metodo non studia direttamente l'albero delle cause ma lo converte ad un BDD, che rappresenta l'equazione booleana per il *top event*. Tuttavia, la grande difficoltà risiede proprio nella conversione, poiché deve essere scelto un ordinamento delle variabili dell'albero (eventi di base), e questo può avere un effetto determinante sulla dimensione del diagramma conseguente.

### 4.5.1 Semplificazione della struttura ad albero

Vengono applicate due tecniche di pretrattamento all'albero delle cause, con lo scopo di ottenere dei "sottoalberi" più piccoli possibili, in modo tale che il processo di costruzione del BDD risulti semplice ed efficace. La prima fase è la *riduzione di Faunet*, una tecnica che viene utilizzata per ristrutturare l'FT nella sua forma più concisa. Una volta che è stata applicata questa riduzione, tuttavia, è possibile semplificare ulteriormente l'analisi individuando i *moduli*, ovvero dei sottoalberi indipendenti, che possono essere trattati separatamente (K. A. Reay e J. D. Andrews, 2002).

#### 4.5.1.1 Riduzione di Faunet

La riduzione di Faunet è una tecnica che viene sviluppata per ridurre l'albero delle cause alla sua forma minima, senza alterare la logica che sta alla

base. La sua efficacia è stata dimostrata con la sua applicazione ad un ampio insieme di FT, per i quali la dimensione del BDD risultante si è ridotta del 50% circa. Il metodo si articola in tre fasi:

- *contrazione*: i gate successivi dello stesso tipo vengono ridotti in modo tale da formare un unico gate; questo fornisce un albero delle cause, con sequenza alternata di gate OR ed AND;
- *fattorizzazione*: vengono identificate le coppie di eventi che si verificano sempre insieme nello stesso tipo di gate, e vengono unite in modo da formare un unico *evento complesso*; a tutti questi *eventi complessi* è fornita un'etichetta numerica a partire dal valore "2000";
- *estrazione*: si individuano strutture simili a quelle mostrate in figura 4.19, e vengono poi sostituite nell'albero.

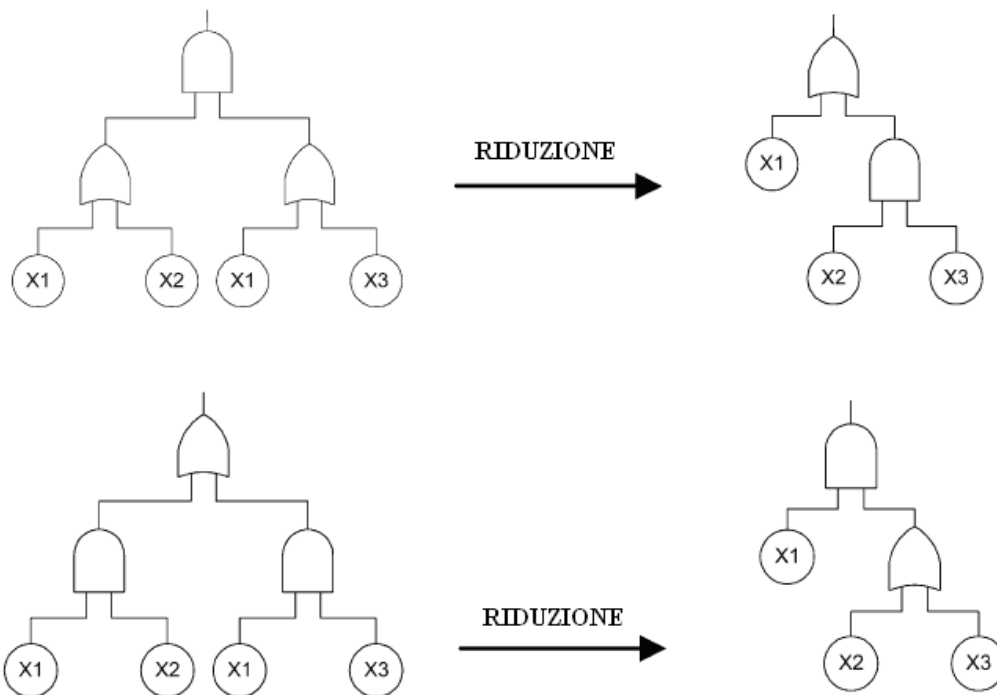


Figura 4.19: procedura di estrazione.

Le suddette tre fasi vengono ripetute fino a quando non sono più possibili ulteriori cambiamenti nell'albero, ottenendo così una rappresentazione del sistema più compatta.

A titolo di esempio si può considerare l'FT presentato in figura 4.20.

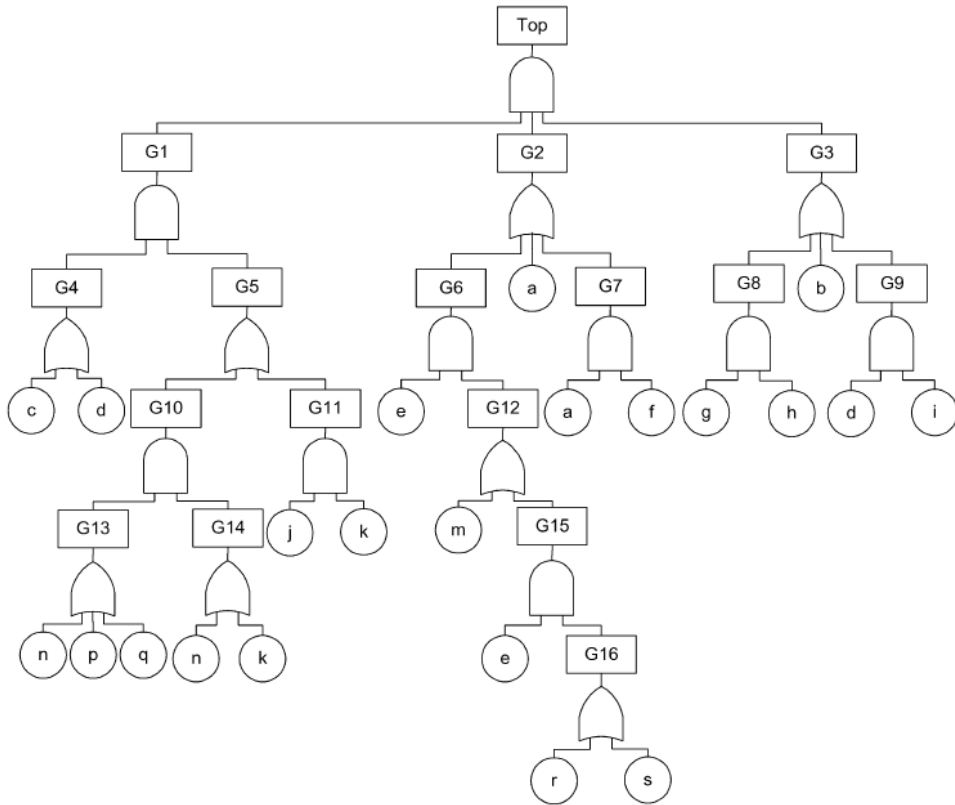


Figura 4.20: esempio di albero delle cause.

Applicando la riduzione di Faunet a questo albero, si ottiene un diagramma di dimensione e complessità nettamente inferiore, e questo viene evidenziato dalla figura 4.21. I dati relativi agli eventi complessi corrispondenti sono riportati nella tabella 4.2.

Evento complesso, $X_c$	Valore del gate	Evento 1	Evento 2
2000	AND	g	h
2001	OR	p	q
2002	OR	r	s
2003	OR	2000	b
2004	OR	j	2001
2005	AND	2004	k
2006	OR	2005	n

Tabella 4.2: dati relativi agli eventi complessi dopo la riduzione di Faunet.

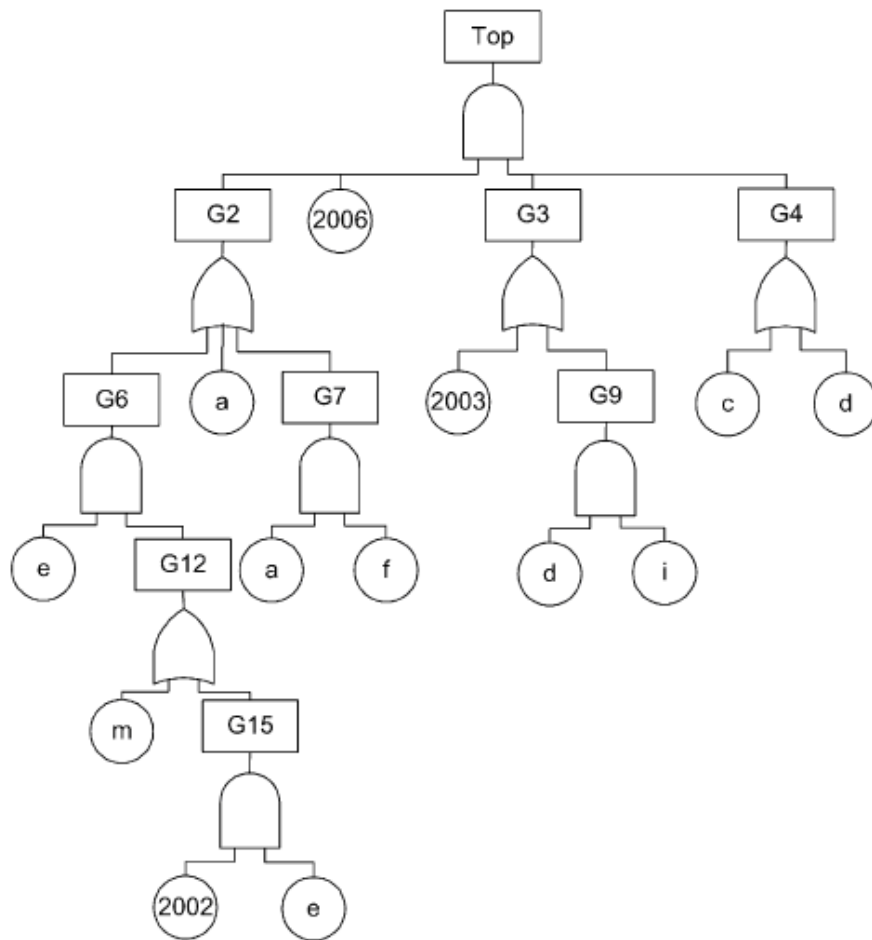


Figura 4.21: albero delle cause risultante dopo l'applicazione della riduzione di Funet.

#### 4.5.1.2 Modularizzazione

La procedura di *modularizzazione* non altera la struttura dell'albero, ma ne rileva i *moduli*. Un modulo è un sottoalbero completamente indipendente, che non contiene gli eventi di base presenti in altre parti del FT. Il vantaggio di identificare questi moduli è che ognuno di essi può essere analizzato separatamente.

Utilizzando un algoritmo lineare nel tempo, i moduli possono essere identificati mediante due attraversamenti “depth-first” dell'albero. Il primo di questi è un attraversamento “step by step”, che registra per ogni gate, e per ogni evento, il valore numerico del primo, del secondo e dell'ultimo passaggio

in tale nodo. Si può fare riferimento all'albero delle cause di figura 4.21: partendo dal *top event* e progredendo attraverso l'albero, i gate e gli eventi vengono visitati nell'ordine indicato nella tabella 4.3.

<b>Numero di passaggio</b>	<b>Nodo</b>	<b>Numero di passaggio</b>	<b>Nodo</b>
1	Top	17	f
2	2006	18	G7
3	G2	19	G2
4	a	20	G3
5	G6	21	2003
6	e	22	G9
7	G12	23	d
8	m	24	i
9	G15	25	G9
10	2002	26	G3
11	e	27	G4
12	G15	28	c
13	G12	29	d
14	G6	30	G4
15	G7	31	Top
16	a		

Tabella 4.3: ordine col quale gate ed eventi vengono visitati nell'attraversamento "depth-first" del FT in figura 4.21.

Ogni gate viene visitato almeno 2 volte, una volta andando verso il basso dell'albero, e di nuovo sulla via del ritorno verso l'alto. I valori numerici dei passaggi attraverso i gate e gli eventi sono evidenziati nelle tabelle 4.4 e 4.5.

Gate	Top	G2	G3	G4	G6	G7	G9	G12	G15
Primo passaggio	1	3	20	27	5	15	22	7	9
Secondo passaggio	31	19	26	30	14	18	25	13	12
Ultimo passaggio	31	19	36	30	14	18	25	13	12
Min	2	4	21	23	6	4	23	6	6
Max	30	18	29	29	13	17	29	12	11

Tabella 4.4: dati relativi ai gate dell'albero delle cause.

Evento	a	c	d	e	f	i	m	2002	2003	2006
Primo passaggio	4	28	23	6	17	24	8	10	21	2
Secondo passaggio	4	28	23	6	17	24	8	10	21	2
Ultimo passaggio	16	28	29	11	17	24	8	10	21	2

Tabella 4.5: dati relativi agli eventi dell'albero delle cause.

Il secondo attraversamento dell'albero identifica il valore massimo (Max) e minimo (Min) dei passaggi ad ogni gate, ed i valori sono elencati nella tabella 4.4. Detto questo, un gate può essere identificato come un modulo se:

- il primo passaggio, attraverso l'evento successivo al gate, avviene dopo il primo passaggio attraverso il gate stesso;
- l'ultimo passaggio ad ogni evento successivo al gate avviene prima del secondo passaggio attraverso il gate.

Pertanto, i seguenti gate possono essere considerati moduli: **Top**, **G2** e **G6**. Il *top event* è incluso per completezza in questo elenco, poiché sarà sempre un modulo dell'albero delle cause.



Quindi questi “sottoalberi”, appena individuati, vengono sostituiti dai singoli *eventi modulari*, che sono chiamati nello stesso modo degli eventi complessi, cioè assumono il valore numerico disponibile, superiore a 2000: **Top-2007, G2-2008, G6-2009**.

Per quanto riguarda l'esempio studiato, l'FT mostrato in figura 4.21 viene sostituito da tre alberi separati, che sono illustrati in figura 4.22.

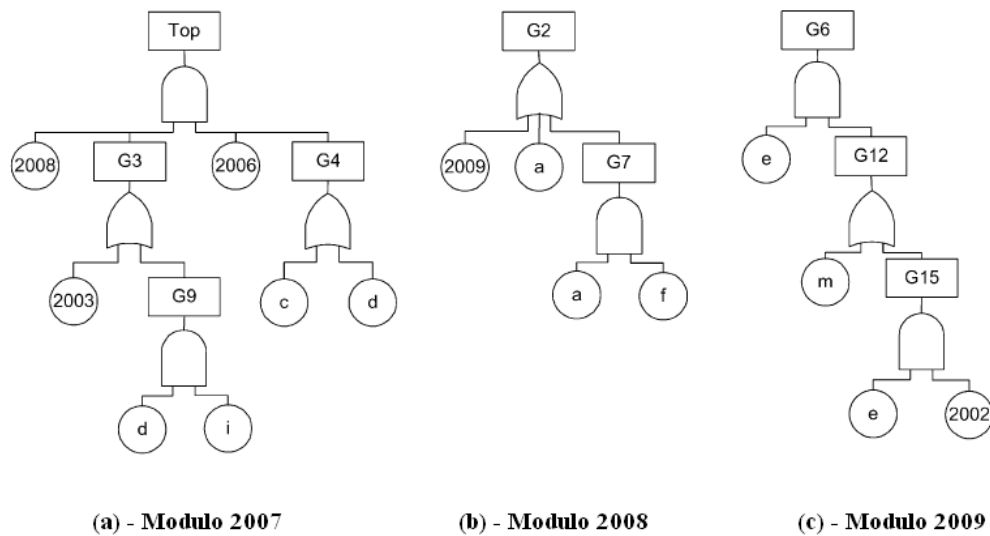


Figura 4.22: moduli ottenuti dall'albero delle cause di figura 3.21.

Dopo aver ridotto l'albero delle cause alla sua forma minima, ed identificati tutti i moduli indipendenti, il prossimo passo è proprio quello di ottenere i BDD associati.

#### 4.5.2 Binary Decision Diagram associato

Per ognuno dei moduli individuati è necessario costruire un BDD associato. Poiché tutti hanno proprietà diverse, utilizzare lo stesso schema di ordinamento delle variabili potrebbe non essere appropriato. Pertanto, per ciascun modulo, è opportuno selezionare uno schema di ordinazione, sulla base delle sue caratteristiche uniche, attraverso l'utilizzo di una *rete neurale*. Quest'ultima seleziona lo schema migliore, a partire da otto possibili alternative, che comprendono sia gli schemi strutturali, che quelli ponderati. Si

ottiene, quindi, il BDD per ogni modulo esaminando l'ordinamento delle variabili determinato dal modello appropriato (K. A. Reay e J. D. Andrews, 2002).

Per il modulo “2007” della figura 2.22, si deve considerare il seguente ordinamento: **2008 < 2006 < d < c < 2003 < i**.

Si ottiene, così, il BDD di figura 4.23, che è noto come BDD “primario”, in quanto rappresenta il *top event* e viene utilizzato per calcolare la probabilità che si verifichi.

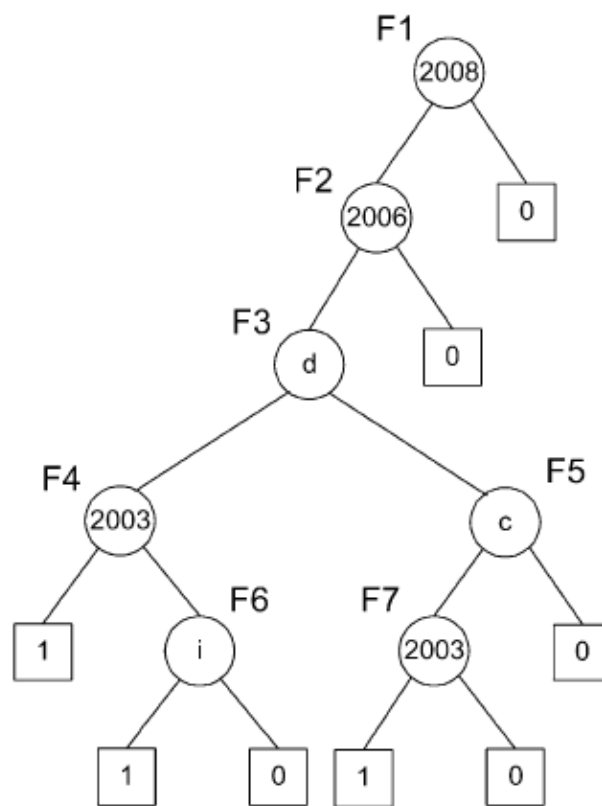


Figura 4.23: BDD “primario” per il modulo “2007”.

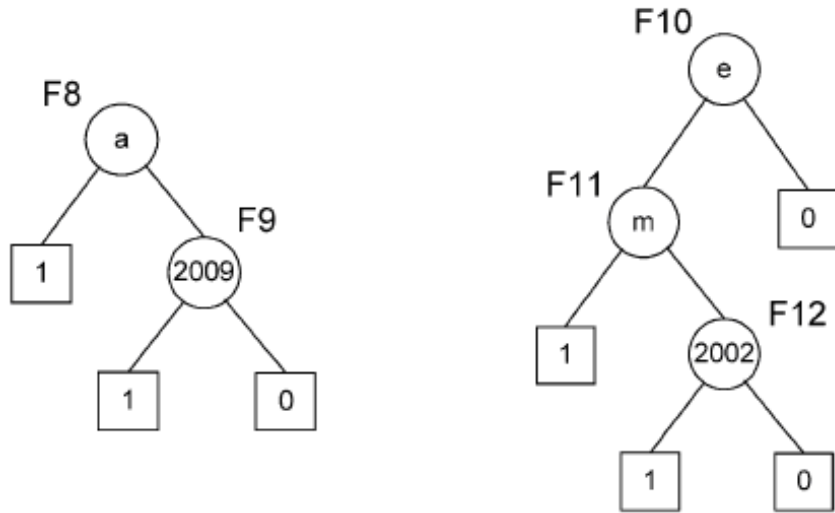
Ogni modulo è stato trattato nella stessa maniera, con i nodi del BDD associato etichettati consecutivamente rispetto a quello costruito precedentemente, in modo da evitare confusione.

Si possono costruire i BDD anche per i moduli restanti, utilizzando i seguenti ordinamenti:

- per il modulo “2008”: **a < 2009 < f**;

- per il modulo “2009”:  $e < m < 2002$ ;

I BDD risultanti sono rappresentati nella figura 4.24.



(a) - BDD per il modulo "2008"

(b) - BDD per il modulo "2009"

Figura 4.24: BDD per i moduli “2008” e “2009”.

Dopo aver costruito tutti i BDD associati ai moduli dell’albero delle cause, è possibile cominciare l’analisi quantitativa.

### 4.5.3 Analisi quantitativa

L’analisi quantitativa viene effettuata direttamente sul BDD, ed è una procedura esatta ed efficace, che permette di determinare molte proprietà del sistema in esame. Fino ad oggi, i metodi sono stati utilizzati solo su BDD composti interamente da eventi di base. Poiché le tecniche di riduzione e modularizzazione producono anche eventi complessi e modulari, è necessario estendere i metodi per prendere in considerazione anche questi fattori.

L’obiettivo principale dell’analisi è quello di ottenere la probabilità del *top event* e l’intensità di guasto incondizionato (K. A. Reay e J. D. Andrews, 2002).

#### 4.5.3.1 “Indisponibilità” di sistema

L'*indisponibilità di sistema*, ovvero la probabilità che si verifichi il *top event*,  $Q_{\text{sys}}$ , viene calcolata sommando le probabilità dei percorsi disgiunti che attraversano il BDD primario. Esiste un algoritmo “depth-first” che può effettuare questo calcolo in modo molto efficiente. Per eseguire questo calcolo è necessario valutare l'*indisponibilità* di ciascun evento codificato. Di conseguenza, a partire dai dati relativi agli eventi di base, si devono stimare le probabilità degli eventi complessi e modulari

Determinare l'*indisponibilità* degli eventi complessi è molto semplice, in quanto sono solo una combinazione di due eventi che lo compongono. Il calcolo dipende dal fatto che gli eventi sono stati raggruppati in un gate AND oppure OR, quindi, per un evento complesso  $x_c$ , costituito dagli eventi  $x_1$  e  $x_2$ , l'*indisponibilità* è data dalle relazioni:

$$\text{Gate AND: } q_c = q_1 \cdot q_2$$

$$\text{Gate OR: } q_c = q_1 + q_2 - q_1 \cdot q_2$$

Il calcolo delle probabilità degli eventi modulari è effettivamente quello di trovare la probabilità che si verifichi il *top event* di ciascuno dei moduli. Viene utilizzato, ancora una volta, un algoritmo “depth-first”, che può essere richiamato più volte. L'algoritmo è riportato in figura 4.25.

```

module_prob(F)
{
  F = ite(xi, J, K)
  Considera il ramo "1":
    if (J = 1) then po1[F] = 1
    else po1[F] = module_prob(J)
  Considera il ramo "0":
    if (K = 0) then po0[F] = 0
    else po0[F] = module_prob(K)
  Calcola e fornisci il valore della probabilità del nodo:
    if (xi is a modular event with unknown probability
    and module root node R) then qi = module_prob(R)
    probability[F] = qi.po1[F] + (1-qi).po0[F]
  return(probability[F])
}

```

Figura 4.25: algoritmo per calcolare la probabilità di un modulo.

Dopo aver ottenuto la probabilità di tutti gli eventi complessi e modulari, è facile ricavare *l'indisponibilità del sistema*.

#### 4.5.3.2 Intensità di guasto incondizionato del sistema

L'intensità di guasto incondizionato del sistema,  $W_{\text{sys}}(t)$ , definita come la probabilità che si verifichi il *top event* al tempo  $t$ , è data dalla relazione:

$$W_{\text{sys}}(t) = \sum_i G_i(q(t))w_i(t)$$

Dove  $G_i(q(t))$  rappresenta la *funzione di criticità* per ogni componente, e  $w_i(t)$  è l'intensità di guasto incondizionato del singolo componente.

La funzione di criticità è definita come la probabilità che il sistema si trovi in uno stato critico per quanto riguarda il componente "i", e che, quindi, il

guasto del componente “i” costringa il sistema a passare da uno stato di lavoro ad uno stato di non funzionamento. Pertanto si può esprimere come:

$$G_i(q(t)) = Q(1_i, q(t)) - Q(0_i, q(t))$$

Dove  $Q(1_i, q(t))$  è la probabilità di guasto del sistema con  $q_i(t) = 1$ , e dove  $Q(0_i, q(t))$  è la probabilità di guasto del sistema con  $q_i(t) = 0$ .

Poiché  $Q_{sys}$  è una funzione lineare in ogni  $q_i$ , allora le  $G_i(q)$ , per ogni evento di base, possono essere fornite dall'equazione sottostante:

$$G_i(q) = \frac{\partial Q_{sys}}{\partial q_i}$$

Un efficace metodo di calcolo della funzione di criticità, a partire dal BDD, è quello di prendere in considerazione le probabilità delle sezioni di percorso del BDD prima e dopo i nodi in questione, ottenendo, così, la seguente espressione:

$$G_i(q(t)) = \sum_n pr_{x_i}(q(t)) \cdot [po_{x_i}^1(q(t)) - po_{x_i}^0(q(t))]$$

Dove  $pr_{x_i}(q(t))$  è la probabilità che si verifichi la sezione di percorso che va dal vertice iniziale fino al nodo  $x_i$ ;  $po_{x_i}^1(q(t))$  è la probabilità legata alla sezione di percorso dal ramo “1” del nodo  $x_i$  fino al nodo terminale “1”;  $po_{x_i}^0(q(t))$  è la probabilità della parte del percorso dal ramo “0” del nodo  $x_i$  fino al nodo terminale “1”; infine “n” denota tutti i nodi per la variabile  $x_i$  nel BDD.

Il calcolo della  $G_i(q)$  richiede, quindi, un passaggio del BDD per calcolare  $pr_{x_i}(q)$ ,  $po_{x_i}^1(q)$  e  $po_{x_i}^0(q)$  per ogni nodo. Grazie a queste informazioni, che si ricavano grazie all'utilizzo di altri algoritmi, è possibile valutare  $G_i(q)$  e di conseguenza anche  $w_{sys}$ .

#### 4.5.4 Misure di “importanza”

Le *misure di importanza* di ogni componente sono informazioni molto utili che si possono ottenere da uno studio di un albero delle cause. L'analisi di importanza viene eseguita al fine di determinare le misure di sensibilità che individuano le aree deboli del sistema. Quest'informazione può essere molto vantaggiosa, soprattutto in fase di progettazione. L'importanza di ogni componente definisce il ruolo che esso stesso svolge nel causare, o nel contribuire, al verificarsi del *top event*. In generale, viene assegnato un valore numerico ad ogni evento di base che permette di classificarlo proprio in base alla misura del suo contributo.

Le misure di importanza probabilistica possono essere classificate in due categorie:

- misure adatte a valutare la disponibilità del sistema (probabilità del *top event*);
- misure legate alla valutazione dell'affidabilità del sistema (valore atteso del numero di volte che si verifica il *top event*).

In questo studio vengono considerate solo le misure dei componenti che fanno parte del primo gruppo (K. A. Reay e J. D. Andrews, 2002).

##### 4.5.4.1 Misura di importanza di Birnbaum

La *misura di importanza di Birnbaum* ( $I_b$ ) è stata introdotto nel 1969. Questa misura è definita come il rapporto tra le variazioni della probabilità di guasto del sistema e le variazioni di probabilità di guasto del componente “i”:

$$I_{bi}(q) = \frac{\partial Q_{sys}}{\partial q_i}$$

E' evidente, quindi, che  $I_{bi}$  è anche la funzione di criticità per il componente “i”,  $G_i(q)$ , definita in precedenza.

La procedura di calcolo di calcolo per valutare la funzione di criticità a partire struttura del BDD è stata già descritta. Quindi, la stima di questa misura

viene eseguita nel calcolo di  $w_{sys}$ , e, pertanto, può essere estratto proprio da quest'ultimo.

#### 4.5.4.2 Misura di importanza di criticità

La *misura di importanza di criticità* ( $I_c$ ) è definita come la probabilità che il sistema, al tempo "t", si trovi in uno stato critico per il componente "i", e che questo componente, condizionato dal guasto del sistema, fallisca il suo funzionamento sempre al tempo t:

$$I_{ci} = \frac{(Q(I_i, q) - Q(O_i, q)) \cdot q_i}{Q(q)} = \frac{G_i(q) \cdot q_i}{Q_{sys}}$$

Tutti i termini di quest'equazione sono stati già valutati nella stima di  $Q_{sys}$  e di  $w_{sys}$ , e sono immediatamente disponibili per determinare questa misura di importanza.

#### 4.5.4.3 Misura di importanza di Fussel - Vesely

Questa misura di importanza del singolo componente,  $I_{FV}$ , è, generalmente, vicina al valore numerico della misura di criticità, ed è definita come la probabilità di unione dei MCS che contengono l'evento "i", diviso la probabilità che si verifichi il *top event*.  $I_{FV}$  fornisce, quindi, la probabilità che il componente "i" contribuisca al guasto del sistema. La valutazione di questa misura viene eseguita in tre fasi:

- 1) Come prima cosa, è necessario registrare il numero di volte che ogni variabile si imbatte in un MCS;
- 2) Per quanto riguarda gli eventi che si verificano più di una volta, viene eseguita una ricerca sui nodi che hanno questa variabile, e per ogni evento di base si ha:

$$I_{FVi} = \frac{\sum_{\text{nodi } xi} q_i \cdot pr_{xi}(q) \cdot po_{xi}^1(q)}{Q_{sys}}$$



- 3) Ovviamente, se una variabile si verifica una sola volta nel MCS,  $c_i$ , allora si avrà:

$$I_{FVi} = \frac{p(c_i)}{Q_{sys}}$$

## Capitolo 5

# Metodi per la valutazione delle conseguenze degli scenari e modelli di esodo nella progettazione delle gallerie stradali

### 5.1 Introduzione

Come descritto nel capitolo precedente, per effettuare un'analisi del rischio completa, è necessario stimare le conseguenze associate all'ipotesi di incidente. Considerando quindi l'insieme di triple, come definizione quantitativa:

$$R = \{ \langle S_i, p_i(\phi_i), \xi_i(x_i) \rangle \}$$

ci occupiamo ora degli effetti  $x_i$  legati ai relativi scenari  $S_i$ , ovvero spieghiamo l'ultima parte della tripla.

Per poter procedere è evidente che risulta doveroso stabilire l'ambito di applicazione dell'analisi che, per lo studio in esame, è la progettazione di gallerie stradali.

Nota la distribuzione sull'area degli effetti fisici di un evento incidentale, è possibile ottenere una stima dei danni prodotti tramite modelli matematici che legano l'intensità dell'effetto fisico provocato alla probabilità del danno. Il modello matematico più utilizzato per effettuare tale correlazione è la “*Probit (Probability Unit) Analysis*”.

L'ordine logico per calcolare gli effetti di un determinato scenario sugli esseri umani, è il seguente:

- in primo luogo vengono valutate le conseguenze fisiche dell'incidente;
- poi, da questi primi risultati, si ricavano i loro effetti sulle persone.

Nella pratica la maggior parte dei software esistenti calcola entrambi i fattori in un'unica esecuzione.

In questo capitolo è stato mantenuto l'ordine logico appena definito. Pertanto, come prima cosa vengono messi in evidenza i principali scenari incidentali che possono avere luogo in una galleria stradale; sono poi definite le relative conseguenze fisiche che si hanno sia all'interno che all'esterno del tunnel, a seguito del sinistro che si verifica nella galleria; ed infine vengono descritte le rispettive equazioni di *probit* utilizzate per ricavare gli effetti sulle persone dei danni provocati.

## **5.2 Principali scenari incidentali che possono avere luogo in una galleria stradale**

L'obbiettivo di questo paragrafo è quello di descrivere questi fenomeni per comprendere con più facilità i modelli utilizzati per valutarne le conseguenze.

Gli scenari incidentali che si possono verificare all'interno di una galleria sono molteplici; noi prendiamo in considerazione quelli elencati nella tabella 5.1 che coincidono con quelli previsti dal manuale del software QRAM.

SCENARI INCIDENTALI	PERICOLI
Incendio di un mezzo pesante, 20 MW (veicolo vuoto o caricato con poco materiale combustibile)	Fuoco e fumo
Incendio di un mezzo pesante, 100 MW (caricato con materiale combustibile)	Fuoco e fumo
<i>BLEVE</i> di GPL, “ <i>cylinder</i> ” (piccolo contenitore) di 50kg	<i>Fireball</i> ed effetti di pressione
<i>Pool fire</i> di benzina, autobotte con capacità di 28 tonnellate	Fuoco e fumo
Esplosione di una nube di vapore (VCE) di benzina, autobotte con capacità di 28 tonnellate	Effetti termici e di pressione
Rilascio di cloro, autobotte con capacità di 20 tonnellate	Gas tossici
<i>BLEVE</i> di GPL, autobotte con capacità di 18 tonnellate	<i>Fireball</i> ed effetti di pressione
VCE di GPL, autobotte con capacità di 18 tonnellate	Effetti termici e di pressione
<i>Torch fire</i> di GPL, autobotte con capacità di 18 tonnellate	<i>Fireball</i> ed effetti di pressione
Rilascio di ammoniaca, autobotte con capacità di 20 tonnellate	Gas tossici
Rilascio di acroleina, autobotte con capacità di 25 tonnellate	Liquidi tossici
Rilascio di acroleina, <i>cylinder</i> con capacità di 100 litri	Liquidi tossici
CO <sub>2</sub> liquefatta (refrigerata), autobotte con capacità di 20 tonnellate	Effetti di pressione

Tabella 5.1: elenco degli scenari incidentali e dei loro effetti

### 5.2.1 BLEVE

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

Originariamente indicava una rottura importante di un'autobotte contenente un liquido ad una temperatura ben superiore rispetto al suo punto di ebollizione a pressione atmosferica. In questo preciso caso si possono verificare tre eventi che precedono la comparsa del fenomeno stesso:

- surriscaldamento della merce pericolosa;
- rapida caduta della pressione nel serbatoio;

- nucleazione spontanea.

Se l'autobotte presenta una grossa rottura, l'improvvisa liberazione alla pressione atmosferica produce una vaporizzazione estremamente veloce (una fiammata) di una frazione del liquido immagazzinato. L'energia proveniente dalla rapida espansione, prodotta dalla fiammata, disperde l'aerosol/liquido, spinge in tutte le direzioni i frammenti del serbatoio e crea un'onda di pressione. A titolo di esempio, l'evaporazione istantanea di acqua moltiplica il suo volume di un fattore pari a 800, mentre quella del propano di un fattore pari a 280.

Inoltre, se il liquido è infiammabile, si crea, quasi immediatamente, una miscela composta da gas anch'esso infiammabile ed aria che può prendere fuoco. In questo caso, le fiamme coprono inizialmente il terreno e poi aumentano formando una "*fireball*" (ovvero l'incendio della miscela creata), che ovviamente genera radiazioni termiche. Questo fenomeno può avere origine in seguito ad un'esplosione di un'autobotte causata dalla rottura meccanica dell'involucro. Tale rottura può essere di tipo fragile, generata ad esempio a causa di una collisione, un impatto, una perforazione o una corrosione.

Tuttavia, gli effetti principali del BLEVE sono dovuti ad una rottura di tipo duttile dell'involucro a seguito di un incendio circostante, le cui principali conseguenze sono le seguenti:

- riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio;
- aumento della temperatura e quindi della pressione all'interno dell'autobotte.

In genere viene utilizzato l'acronimo BLEVE per designare la produzione di una *fireball* quando il prodotto trasportato è infiammabile. Pertanto, gli effetti di questo fenomeno sono principalmente:

- riscaldamento;
- aumento della pressione;
- getto dei frammenti dell'autobotte a seguito dell'esplosione.

Quest'ultimo effetto è un rischio strettamente connesso con tale fenomeno; infatti, nel corso di incidenti accaduti nel passato, i frammenti sono stati spinti a centinaia di metri di distanza rispetto al veicolo.

Tuttavia, per i prodotti infiammabili, tra cui il GPL, l'effetto di riscaldamento viene considerato come il principale.

### **5.2.1.1 Modello degli effetti fisici**

Il modello che può essere utilizzato per valutare gli effetti fisici di un BLEVE prodotto dal propano è quello proposto dal T.R.C. (Centro di Ricerca di Thorton). L'approccio T.R.C. mira a prendere in considerazione la dipendenza dal tempo delle caratteristiche della *fireball*. Si tratta di un approccio fenomenologico che, per quanto riguarda la durata complessiva della *fireball*, prende in considerazione tre fasi:

- 1) fase di accensione della nube e sviluppo della *fireball* per la sua massima estensione. Durante questo stadio il raggio ed il potere emissivo superficiale della *fireball* vengono ipotizzati linearmente dipendenti dal tempo;
- 2) fase di combustione della *fireball*; la sua durata totale dall'accensione fino all'inizio del periodo di estinzione, è considerata pari alla durata di combustione delle gocce generate quando il prodotto viene espulso violentemente in atmosfera. Durante questo periodo si presume che la temperatura della *fireball* diminuisca in modo lineare, a partire dal suo valore massimo, fino al valore corrispondente alla fase di estinzione. La temperatura finale viene considerata maggiore o uguale a 0,88 volte la temperatura massima;
- 3) fase di estinzione, che viene considerata completa quando anche le ultime goccioline infiammate sono consumate. Durante quest'ultimo periodo il diametro della *fireball* diminuisce in maniera lineare in funzione del tempo, mentre il potere emissivo superficiale rimane costante.

### **5.2.2 VCE: esplosione di una nube infiammabile miscelata con aria**

VCE è l'acronimo di "*Vapour Cloud Explosion*", e rappresenta un'esplosione di una nube contenente una miscela infiammabile di gas/vapore ed aria. Se la deflagrazione si verifica in una zona sconfinata, priva di ostacoli, è possibile utilizzare l'abbreviazione UVCE dove "U" indica il termine "Unconfined", ovvero "sconfinato".

Lo sviluppo di un VCE richiede che i vapori dei prodotti infiammabili si mescolino con l'aria in modo da formare una miscela compresa tra il L.F.L. (Limite Infiammabile Inferiore) e il U.F.L. (Limite Infiammabile Superiore) in un volume significativo.

Gli effetti del VCE sono principalmente:

- effetti meccanici: risultano dalle onde di pressione prodotte dalle esplosioni;
- effetti di riscaldamento: prodotti dalle fiamme che derivano sempre dalle esplosioni.

Questi ultimi, in genere, non sono molto importanti nel caso di un VCE, in quanto la fiamma è molto breve e solo alcuni materiali subiscono tale effetto essendo direttamente a contatto con i gas dell'esplosione.

Al contrario, alcuni effetti meccanici possono essere osservati anche a grande distanza dal luogo dell'incidente. Tali effetti si ottengono dal lavoro delle forze di compressione. Questo lavoro è omogeneo all'energia connessa con quella chimica rilasciata dalle fiamme dell'esplosione. Quest'ultima energia sarà tanto più elevata quanto maggiore sarà la quantità di prodotto infiammabile coinvolto nell'incidente. Risulta evidente, quindi, che gli effetti meccanici di un VCE, fissati tutti gli altri parametri, rappresentano una funzione crescente del volume  $V$  (o della massa  $M$ ) del prodotto.

#### **5.2.2.1 Modello del "TNT equivalente"**

Il principio di questo modello consiste nel confrontare la massa ( $M$ ) dei gas infiammabili in esame, presumibilmente rilasciata in maniera tale da far

verificare un VCE, con la massa ( $M'$ ) di TNT (trinitrotoluene), la cui esplosione produrrebbe gli stessi effetti.

Per quanto concerne le esplosioni, il fenomeno che porta alla detonazione di esplosivi è infatti ben noto:

- genera nell'aria un'onda d'urto che è caratterizzata da un fronte positivo di sovrappressione, seguita da una più lenta riduzione che porta ad una pressione inferiore rispetto a quella atmosferica ed infine un ritorno alla normalità;
- la legge di attenuazione di quest'onda di pressione è chiaramente stabilita;
- gli effetti meccanici di un'onda d'urto sulle persone e sulle strutture sono ben noti.

Per i 23 VCE segnalati in tutto il mondo, a partire dal 1948, che hanno coinvolto quantità note di idrocarburo o altro, il professor Andre Lannoy, nella relazione chiamata "*Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre*", ha analizzato l'ammontare del danno prodotto ed ha assegnato ad esso un equivalente di TNT cioè una massa di TNT la cui detonazione avrebbe prodotto un danno equivalente.

Conoscendo la legge di attenuazione della sovrappressione nell'aria in relazione con la distanza dal centro dell'esplosione e con una stima dei danni prevedibili in relazione al valore di questa sovrappressione, è quindi possibile valutare in modo molto semplice il danno prodotto da un VCE in un determinato punto conoscendo solamente la massa del prodotto che esplose. Esiste anche la possibilità, se necessario, di effettuare il calcolo inverso.

Tuttavia, i limiti di questo modello sono molteplici:

- la modalità di esplosione di un VCE, generalmente, non è la detonazione;
- la detonazione di una miscela di gas è diversa da quella di un esplosivo e questo è dovuto alla differenza di densità tra questi due sistemi. Infatti, considerando la medesima energia la miscela di gas occupa un volume molto più grande rispetto all'esplosivo e la propagazione della fiamma dura più a lungo;



- per un esplosivo l'attenuazione di un'onda d'urto nell'aria si ottiene da una riduzione del picco e dell'allungamento della fase positiva di sovrappressione. L'onda di pressione prodotta da una detonazione di gas può essere considerata simile a quella prodotta da un esplosivo solo al di là di una certa distanza dal centro dell'esplosione.

Queste differenze si ottengono introducendo i concetti di “*near field*” e “*far field*”. Rispetto al caso di una detonazione di esplosivo, in ogni punto del cosiddetto “*near field*” (vicino al centro di esplosione del gas) è possibile registrare un segnale di pressione caratterizzato da una sovrappressione con un picco relativamente limitato ed una durata relativamente lunga della fase positiva.

In questo quadro è difficile definire il limite tra i due campi: il “*near field*” corrisponde almeno a tutte le zone in cui la miscela infiammabile era inizialmente presente ed a tutte quelle in cui si troveranno i gas bruciati a conclusione del fenomeno.

In ogni caso questo modello può essere considerato come un possibile strumento per la valutazione degli effetti di un VCE solo nel “*far field*”. Tuttavia, presenta comunque un grande svantaggio: il suo utilizzo presuppone che la miscela esploda violentemente producendo un'onda d'urto simile a quella prodotta da una detonazione di esplosivo; il problema consiste nel fatto che è stato dimostrato che una miscela può esplodere molto poco e produrre un'onda di pressione con picco molto limitato.

#### **5.2.2.2 Modello “Multy - Energy”**

I modelli in grado di valutare con maggiore precisione gli effetti di un VCE devono descrivere il fenomeno della propagazione della fiamma in una miscela di gas, ovvero il fenomeno della deflagrazione.

Il modello definito “*Multy-energy*” è stato elaborato da Van Den Berg. Si basa sull'idea che, contrariamente alla detonazione del TNT, la velocità di propagazione della fiamma di un VCE e quindi il livello di pressione raggiunto, dipende dal livello di ostruzione e contenimento in ogni zona della miscela infiammabile.

Ogni zona è quindi caratterizzata da un'onda di pressione a cui viene associato un certo grado di violenza da “1” a “10” che rappresenta una funzione:

- della reattività del gas in questione;
- del livello di contenimento o di ostruzione della zona in questione;
- della configurazione della miscela.

Pertanto, il metodo consiste nel valutare la sovrappressione prodotta in ogni zona, a partire da abachi, che vengono scelti in base al grado di violenza dell'esplosione. Quest'ultima viene definita attraverso il modello di deflagrazione a velocità costante.

Un vantaggio di questo metodo sta nel fatto che è utilizzabile sia nel “*near field*” che nel “*far field*”. D'altra parte il modello si ottiene valutando il livello di pressione raggiunto a seconda dello stato di contenimento o di ostruzione della miscela e questo rappresenta il suo svantaggio principale.

La procedura di valutazione degli effetti delle esplosioni viene svolta in due fasi.

La prima consiste nel modellare la dispersione dei prodotti derivanti dalla rottura, in modo da stimare:

- la massa del prodotto corrispondente ad una concentrazione compresa tra i limiti di infiammabilità (LFL e UFL);
- la distanza a cui la nube si trova considerando una concentrazione pari a LFL ed un rilascio sotto vento.

La seconda consiste nel valutare gli effetti della pressione generata dalla deflagrazione di tali quantitativi.

### **5.2.3 Torch fire**

Durante il rilascio in atmosfera di gas liquefatti infiammabili, inizialmente contenuti in un'autobotte che è stata perforata, è possibile osservare un getto libero di gas. Ovviamente se questo flusso viene acceso si genera un fiamma chiamata, appunto, *torch fire*.

Gli effetti di questa fiamma, la sua forma (lunghezza e larghezza) ed il suo potere emissivo superficiale ( $\text{kW/m}^2$ ) vengono valutati attraverso delle correlazioni empiriche.

Il modello utilizzato per valutare le caratteristiche della fiamma è quello impiegato dal software “Phast 4.2” che permette di calcolare:

- dimensioni e massa del getto utilizzando un semplice modello a flusso turbolento (Hoftijzer, 1979);
- forma della fiamma. In particolare viene calcolata la sua lunghezza usando la seguente equazione:

$$L_b = L_j \cdot \left( \frac{2300}{T_a \cdot A_t} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{C_L}{C_t}$$

Dove:

$L_j$  è la lunghezza del getto non infiammato;

$T_a$  è la temperatura ambiente;

$A_t, C_t$  sono le proprietà di combustione;

$C_L$  è la concentrazione LFL per il materiale selezionato;

- livello di radiazioni provenienti da una sorgente ad una distanza  $R_0$  da essa utilizzando la seguente relazione (Hajek e Ludwig, 1960):

$$I = \frac{F_{\text{rad}} \cdot M \cdot Q_{\text{comb}}}{4 \cdot \pi \cdot R_0^2}$$

Dove:

$M$  è il tasso di massa rilasciata;

$Q_{\text{comb}}$  è il calore di combustione dei materiali selezionati;

$F_{\text{rad}}$  è la frazione di calore totale risultante dalla fiamma emessa sottoforma di radiazione.

Per eseguire tali operazioni è necessario prendere in considerazione il *fattore di vista* che rappresenta in qualche modo la geometria del sistema

trasmittente rispetto a quella del sistema ricevente, come illustrato di seguito dal diagramma della figura 5.1.

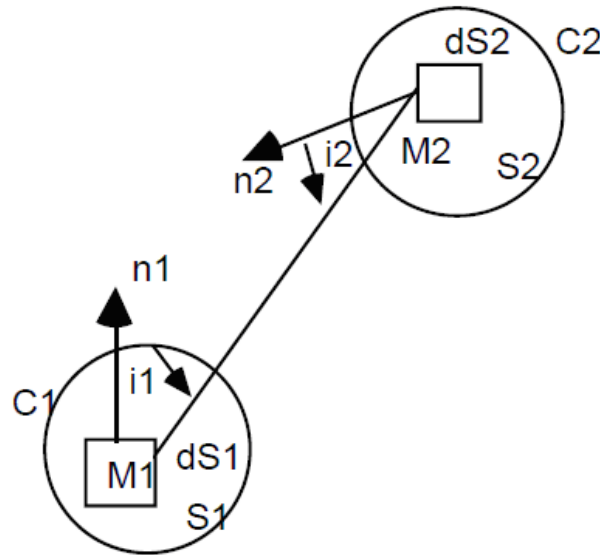


Figura 5.1: calcolo del *fattore di vista*.

Il *fattore di vista*, “F”, è dato dalla seguente formula generale:

$$S_1 \cdot f = \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \int S_1 \cdot \int S_2 \cdot \left( \frac{1}{r^2} \right) \cdot (dS_1 \cdot \cos i_1 \cdot dS_2 \cdot \cos i_2)$$

Questo fattore consente di tener conto di alcuni parametri come la presenza di ostacoli, pendenze, ecc, che possono esistere tra i due sistemi.

### 5.2.4 Pool fire

Generalmente, le fiamme prodotte da un incendio vengono distinte nel modo seguente:

- in base al loro comportamento dinamico sono definite come laminari o turbolente;
- in base al tipo di combustione vengono definite come “di premiscelazione” o “di diffusione”.

Nel caso di *pool fire*, ovvero incendi di pozze liquide, si hanno fiamme di diffusione che in genere corrispondono alle zone di miscela turbolenta.

Il metodo proposto per quantificare il flusso di calore ricevuto da un bersaglio sottoposto alla radiazione emessa da un incendio di idrocarburi si basa sul fatto che tale valore dipende dalla posizione del bersaglio stesso, in relazione al volume occupato dalle fiamme. Infatti, se si trova fuori da questo volume si ammette che lo scambio di calore avviene principalmente per irraggiamento. D'altra parte se il bersaglio si trova all'interno lo scambio di calore avviene sia per irraggiamento che per convezione.

La metodologia adottata per determinare il flusso ricevuto da un osservatore può essere suddivisa in due fasi:

**1) Calcolo del volume occupato dalle fiamme.**

Per fare questo è necessario considerare i seguenti parametri:

- superficie alla base delle fiamme caratterizzata da un diametro equivalente;
- altezza delle fiamme che dipende dal tasso di massa dei prodotti che partecipano alla combustione e dal diametro equivalente della pozza;
- effetto del vento.

**2) Calcolo della portata incidentale pervenuta ad una determinata distanza dalle fiamme.**

Per eseguire tale calcolo vengono utilizzati i seguenti parametri:

- distanza tra bersaglio e fiamma (generalmente nota);
- altezza delle fiamme (determinata nella prima fase);
- flusso irradiato dalle fiamme che dipende dalla temperatura della fiamme, dal coefficiente di emissione e dal diametro della pozza;
- *fattore di vista*;
- *fattore di attenuazione atmosferica*.

In base alla posizione occupata dal bersaglio ed in relazione al volume coperto dalle fiamme si devono considerare i diversi tipi di flussi che sono illustrati in figura 5.2.

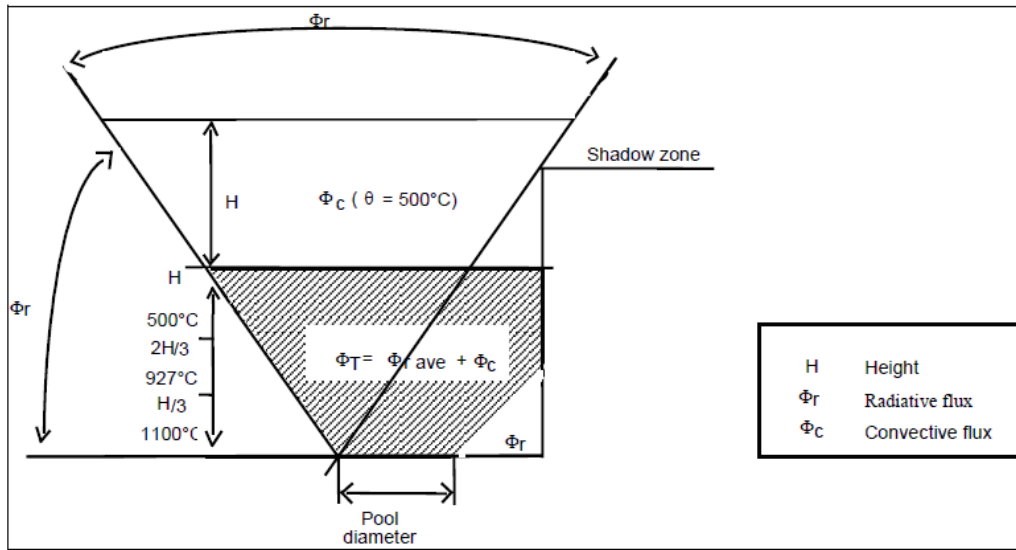


Figura 5.2: tipi di flussi da considerare in relazione alla posizione di un corpo esposto al fuoco.

### 5.3 Parametri da considerare per le gallerie

Le gallerie variano enormemente per quanto riguarda le loro lunghezze, pendenze, sistemi di ventilazione e drenaggio, sistemi di controllo del traffico ed in molte altre proprietà. Pertanto è difficile sviluppare una metodologia per valutare le conseguenze degli incidenti che sia completa ed idonea per poter affrontare questa vasta gamma di caratteristiche di progettazione. Per questo motivo è necessario selezionare un insieme ridotto di parametri per modellare le conseguenze.

La sezione trasversale della galleria viene assunta di forma rettangolare. Per quelle che sono di forma circolare vengono considerate delle sezioni rettangolari equivalenti. Si ipotizza che la larghezza e l'altezza siano uniformi per tutta la lunghezza del tunnel.

Con l'obiettivo di esaminare gli effetti della pendenza e dei diversi sistemi di ventilazione si presume che le gallerie comprendano un certo numero di segmenti. Le loro lunghezze vengono scelte per rappresentare in modo ideale il tunnel.

La pendenza può avere una forte influenza sui movimenti di fumo e gas che possono essere più leggeri o pesanti dell'aria. Viene considerata uniforme

all'interno di ciascuno dei segmenti, ma passando da un componente all'altro si possono utilizzare dei valori diversi. Questo viene messo in evidenza dalla figura 5.3.

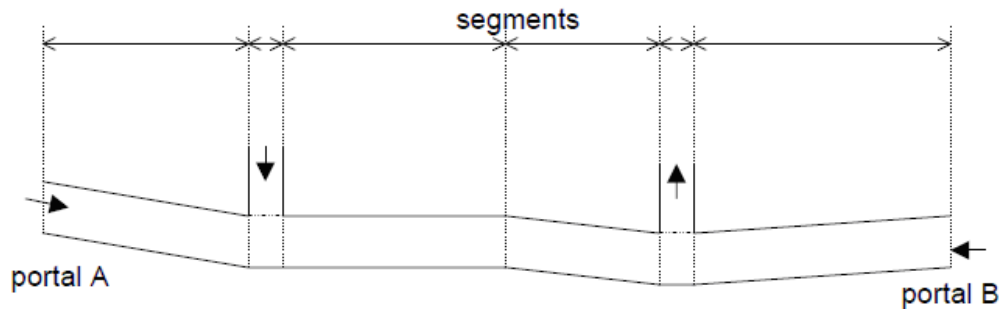


Figura 5.3: segmenti, con diverse pendenze, in una galleria.

Per quanto riguarda invece i sistemi di ventilazione di interesse è doveroso ricordare che includono:

- ventilazione naturale che coinvolge poco o nulla i flussi longitudinali lungo la galleria;
- ventilazione longitudinale che interessa un flusso uniforme di ventilazione lungo il tunnel;
- ventilazione semitrasversale in cui il flusso varia linearmente con l'altezza della sezione;
- ventilazione trasversale che comprende sistemi di erogazione ed estrazione dei flussi attraverso la galleria;
- sistemi di erogazione ed estrazione in determinati punti come ad esempio i sistemi "Push-Pull".

Per soddisfare una così ampia gamma di apparati è possibile considerare simultaneamente i seguenti parametri:

- flusso lungo il tunnel in ogni nodo ( $m^3/s$ );
- flusso estratto da ogni segmento ( $m^3/s$ ).

Tutto questo è illustrato nella figura 5.4.

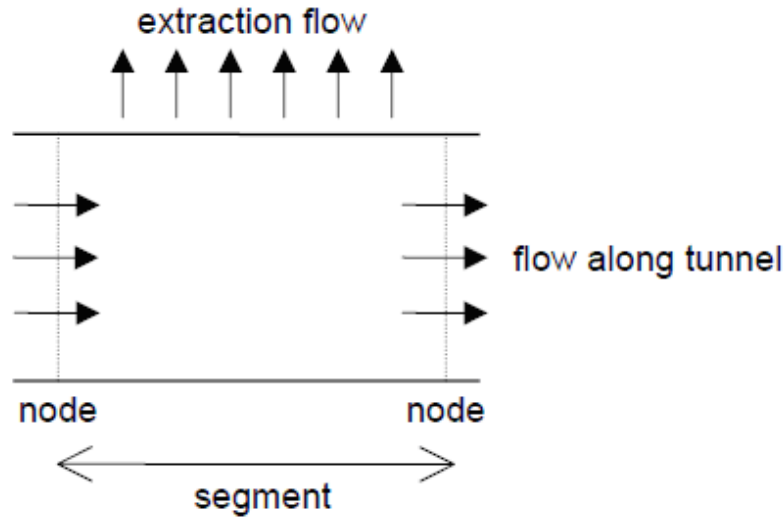


Figura 5.4: tassi dei flussi di ventilazione.

Il sistema di drenaggio, invece, ha un impatto importante sulle dimensioni delle pozze liquide che possono generarsi. Sono costituiti da fessure continue sul ciglio della strada oppure da aperture discrete distribuite lungo tutta la lunghezza della galleria.

I risultati vengono calcolati nella serie di nodi presenti lungo il tunnel. In certi casi però può essere opportuno utilizzare dei segmenti più corti e quindi nodi più fitti per ottenere una migliore risoluzione degli effetti fisici nel caso, per esempio, che si consideri un BLEVE di GPL trasportato in un “*cylinder*”: in questo caso gli effetti dell’esplosione tendono ad essere confinati in un corto raggio.

## 5.4 Valutazione delle conseguenze: risultati numerici

L’obiettivo di questo paragrafo è quello di fornire un ordine di grandezza relativo agli effetti degli scenari incidentali selezionati in precedenza.

Tuttavia è importante notare che non viene ancora presa in considerazione la possibilità, per quanto riguarda gli utenti della strada, di trovare un rifugio oppure di fuggire dal luogo in cui è avvenuto l’incidente.



## 5.4.1 Incendi che coinvolgono veicoli pesanti e fuoriuscita di benzina dal serbatoio

### 5.4.1.1 Dimensioni dell'incendio

In questa sezione vengono considerate le conseguenze di tre diversi scenari di incendio. Due di questi riguardano veicoli pesanti (HVG):

- un incendio di 20 MW che coinvolge un HVG vuoto o caricato con poco materiale infiammabile;
- un incendio di 100 MW che interessa un veicolo pesante ben caricato con materiale combustibile.

In entrambi i casi viene effettivamente specificata la dimensione dell'incendio. Si assume che il fuoco occupi uno spazio di area pari a  $2,5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  e che bruci per un periodo di un'ora.

Il terzo scenario prevede la fuoriuscita di benzina da un serbatoio. Si ipotizza che l'incendio si verifichi in seguito al rilascio completo del contenuto del serbatoio. Il calore prodotto dipende dall'area della pozza che, a sua volta, dipende dal diametro del foro, dalla pressione prodotta ed anche dal sistema di drenaggio della galleria.

La dimensione dell'incendio, che riguarda lo scenario legato alla fuoriuscita di benzina, si può calcolare tenendo conto che il flusso di massa,  $\dot{m}(\text{kg/s})$ , che proviene dal serbatoio, è dato dalla seguente relazione:

$$\dot{m} = C_D \cdot A_h \cdot \rho_f \cdot (2 \cdot g \cdot h)^{\frac{1}{2}}$$

Dove:

$C_D$  è il coefficiente di portata, o di fuoriuscita (= 0,6);

$A_h$  è l'area del foro ( $\text{m}^2$ );

$\rho_f$  è la densità del carburante ( $\text{kg/m}^3$ );

$g$  è l'accelerazione di gravità ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );

$h$  è l'altezza del liquido nel serbatoio (considerata pari a 2m).

L'area della pozza liquida che viene così a generarsi si può ricavare dall'equazione:

$$\dot{m} = m'' \cdot A_p + m_d$$

Dove:

$m''$  è il tasso di combustione ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ );

$A_p$  è l'area della pozza ( $\text{m}^2$ );

$m_d$  è l'effettivo flusso di massa attraverso il foro ( $\text{kg}/\text{s}$ ).

L'espansione della pozza viene calcolata supponendo che esistano due zone. La prima dipende fortemente dalle condizioni di rilascio, dalla pendenza longitudinale (“*gradient*”) e trasversale (“*camber*”) della superficie stradale. Al variare della natura del sistema di drenaggio alcuni, o tutti i liquidi, possono quindi scorrere per una certa distanza lungo lo scolo prima di essere eliminati.

La dimensione della pozza liquida nella fase iniziale di espansione viene valutata utilizzando il metodo descritto da Ingason (1994). In relazione ad una serie di test su piccola scala Ingason ha constatato che la larghezza  $B$  della pozza è data dalla relazione:

$$B = 2 \cdot V^{0,46}$$

Dove “ $V$ ” è il tasso di fuoriuscita del liquido (litri/s).

L'orientamento “ $\theta$ ” della pozza rispetto alla galleria e la sua lunghezza “ $L$ ” in tale direzione, dipendono dall'entità della pendenza longitudinale e trasversale della strada. L'area della zona bagnata inizialmente dal carburante può essere stimata moltiplicando la larghezza “ $B$ ” con la lunghezza “ $L$ ”:

$$A = B \cdot L$$

Tutto questo viene messo in evidenza nella figura 5.5.

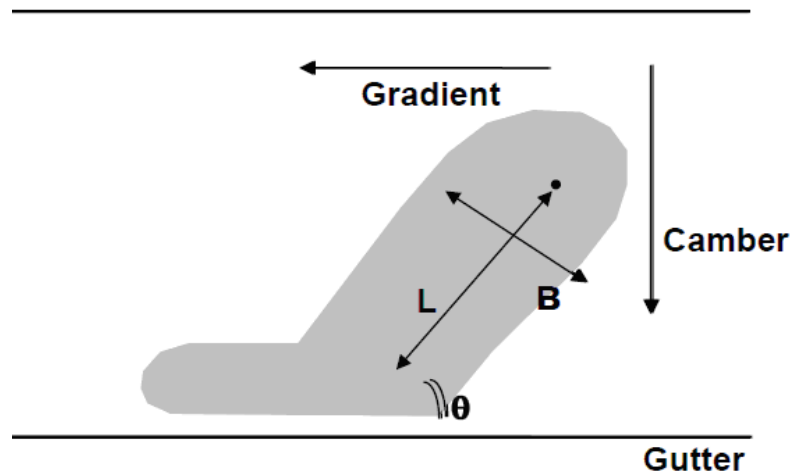


Figura 5.5: estensione della pozza liquida.

La lunghezza del rigagnolo corrispondente alla zona di iniziale fuoriuscita è data da  $L/\sin\theta$ . A partire dal tasso di combustione e dalla capacità di drenaggio lungo la strada può essere valutato il flusso residuo lungo il rigagnolo. La larghezza media di quest'ultimo è considerata proporzionale al rapporto:  $(V_g / \text{pendenza trasversale})$ . Analogamente possono essere calcolate anche la lunghezza del rigagnolo e l'area per la seconda zona e di conseguenza si può valutare l'area totale bagnata.

Questi calcoli sono stati eseguiti utilizzando i risultati di prove su scala reale effettuate dal CETU (*“Centre d'Etudes des Tunnels”*) nel 1994 in una serie di gallerie stradali francesi. Tali test comprendevano rilasci continui ed “istantanei”. L'espressione di Ingason per la larghezza della pozza liquida è stata leggermente modificata proprio alla luce di questi risultati, al fine di raggiungere un fattore di scala pari, al massimo, a 2 tra le aree previste e quelle osservate in tutti i casi studiati dal CETU. L'equazione è così diventata la seguente:

$$B = 2,4 \cdot V^{0,46}$$

Si ipotizza che la posizione del rilascio è situata a metà della larghezza stradale. La capacità di drenaggio sia per i sistemi continui che per quelli discreti dipende dall'area delle aperture di scarico lungo il bordo della strada.

Nelle prove del CETU in tre gallerie erano presenti sistemi di drenaggio continui con aperture di larghezza pari a 0,06 m, vale a dire un'area di  $0,06 \text{ m}^2/\text{m}$ ; mentre altri tre tunnel presentavano aperture discrete distanziate tra loro lungo la strada. Per questi le aree equivalenti, che si ottengono dividendo l'area di apertura delle grate discrete per la distanza tra le grate stesse, erano comprese tra  $0,0045 \text{ m}^2/\text{m}$  e  $0,0082 \text{ m}^2/\text{m}$ . La capacità di drenaggio per qualsiasi tipo di sistema è pari al prodotto dell'area con una costante che si ottiene dalle prove.

Una volta che è stata determinata l'area della pozza liquida si può valutare la produzione di calore "Q (MW)" attraverso la relazione:

$$Q = \dot{m} \cdot A_p \cdot H_{\text{comb}}$$

Dove " $H_{\text{comb}}$ " è il calore di combustione della benzina (MJ/kg). In questo caso è stata considerata una velocità di combustione pari a  $0,055 \text{ kg/s/m}^2$  corrispondente al valore tipico per le prove di *pool fire*.

La durata dell'incendio " $t_F$ " viene calcolata, semplicemente, dalla quantità di benzina rilasciata "M" e dal tasso di portata in massa " $\dot{m}$ ":

$$t_F = \frac{M}{\dot{m}}$$

La figura 5.6 illustra i tassi di rilascio di calore indicativi per gli incendi di auto, autobus e mezzi pesanti.

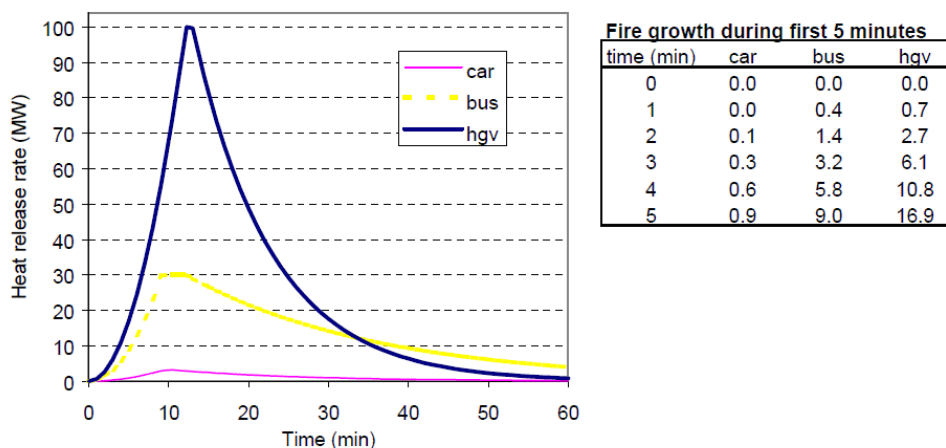


Figura 5.6: crescita nel tempo del tasso do rilascio di calore.

Le curve di incendio per auto ed autobus corrispondono a quelle definite da Ingason (1995) e presentano un picco rispettivamente in corrispondenza di 40 MW e 30 MW. L'incendio di 100 MW assume una crescita molto veloce raggiungendo il massimo dopo circa 10 minuti. Sia per quest'ultimo che per quello di 30 MW la dimensione del fuoco durante i primi minuti è relativamente piccola ed è improbabile, quindi, che causi decessi.

Per semplificare i calcoli è, pertanto, possibile fare l'ipotesi di "incendio istantaneo" considerando costante il tasso di rilascio del calore piuttosto che variabile nel tempo. In questo modo è possibile determinare per una determinata dimensione dell'incendio il momento in cui il fumo arriva in ogni punto della galleria.

Per compensare l'ipotesi di "incendio istantaneo" vengono trascurati i primi 3 minuti delle dosi di radiazioni termiche e tossiche ricevute dalle persone. Passato questo breve periodo tali quantità sono calcolate sulle base degli effetti dell'incendio completamente sviluppato e questo è illustrato qualitativamente in figura 5.7.

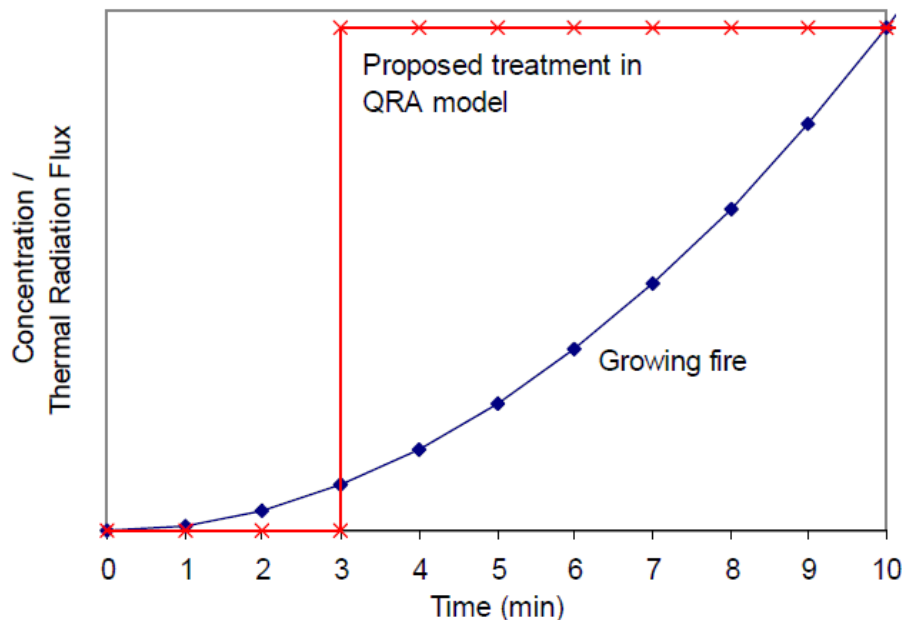


Figura 5.7: compensazione dell'ipotesi di "incendio istantaneo".

### 5.4.1.2 Produzione di fumo

Per quanto riguarda le nubi di fumo che derivano da incendi di grandi dimensioni, il tasso di portata dei prodotti di combustione “ $\dot{M}$  (kg/s)” è fornito dall'equazione che segue, valida per incendi fino a 30 MW (Morgan, 1999):

$$\dot{M} = 0,05 \cdot P_f \cdot (H - D)^{\frac{3}{2}} \cdot \rho \cdot g^{\frac{1}{2}}$$

Dove:

$P_f$  è il perimetro dell'incendio (m);

$H$  è l'altezza della galleria (m);

$D$  è la profondità dello strato di fumo (m);

$\rho$  è la densità dell'aria alla temperatura ambiente ( $\text{kg/m}^3$ ).

Assumendo una perdita di radiazione dalla fiamma, pari al 25%, l'aumento medio della temperatura dei gas all'interno della galleria, è dato dalla relazione:

$$\Delta T = \frac{Q_c}{\dot{M} \cdot C_p}$$

Dove:

$Q_c$  è il tasso di rilascio di calore convettivo (kW) (= 0,75Q);

$C_p$  è il calore specifico dell'aria ( $\text{kW/kg} \cdot \text{K}$ );

$\Delta T$  è l'aumento medio della temperatura del fumo nello strato sopra il fuoco (K).

Per quanto riguarda grandi incendi la temperatura media nello strato al di sopra del fuoco viene considerata, generalmente, pari a 1000°C. Utilizzando questo valore e riordinando l'espressione definita sopra è possibile ottenere il tasso di portata dei prodotti di combustione.

### 5.4.1.3 Movimento del fumo

Riuscire a prevedere il movimento del fumo all'interno di una galleria può risultare estremamente complesso a causa degli effetti di stratificazione e del modo in cui il fumo stesso viene influenzato dalle particolari caratteristiche della geometria del tunnel e del sistema di ventilazione. Pertanto, si può semplificare l'approccio al problema, calcolare la variazione della velocità e la profondità dello strato di fumo considerando una ventilazione naturale. Per i sistemi di ventilazione longitudinale e semitrasversale il regime del fumo, cioè il flusso stratificato in una o in entrambe le direzioni, dipenderà dalla geometria della galleria e dal tasso di portata di ventilazione.

L'entità e la direzione della velocità prodotta dai sistemi diversi può avere effetti differenti sulla circolazione del fumo. Si possono considerare, infatti, tre probabili situazioni. La galleria può essere totalmente sgombra di fumo, può contenere strati di fumo sovrapposti in entrambe le direzioni, oppure, infine, questi possono essere completamente mescolati su tutta l'altezza del tunnel. I due regimi che interessano i fumi sono illustrati in figura 5.8.

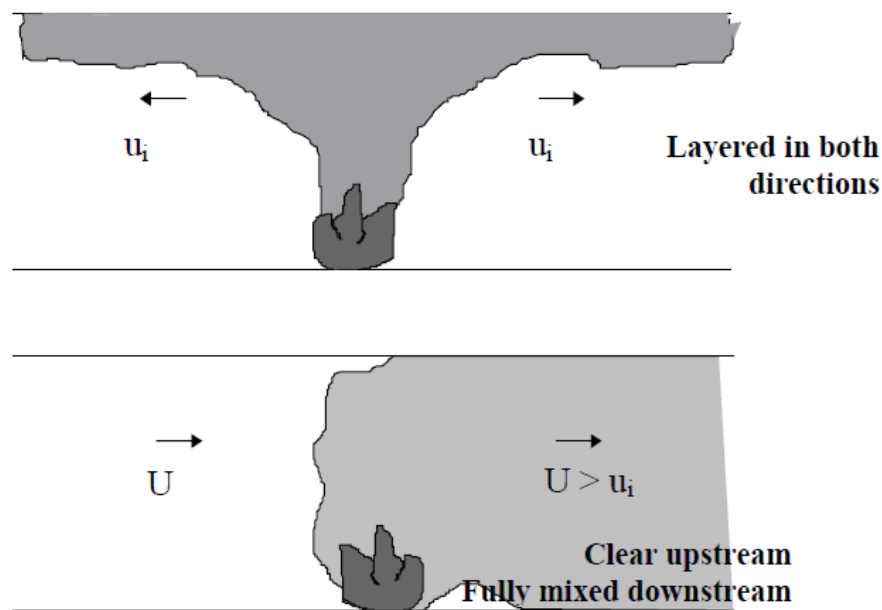


Figura 5.8: possibili regimi di fumo.

Per poter determinare questi regimi è necessario considerare la velocità critica che viene calcolata utilizzando la relazione seguente (Kennedy, 1996):

$$V_c = K_1 \cdot K_g \cdot \left( \frac{g \cdot H \cdot Q_c}{\rho \cdot C_p \cdot A \cdot T_f} \right)$$

Dove:

- |   |  |
|---|--|
| $K_g = 1$                                     | per una pendenza $\geq 0$ ;  |
| $K_g = 1 + 0,0374 \cdot (\text{grade})^{0,8}$ | per una pendenza $< 0$ ;   |
| “grade”                                       | è la percentuale di pendenza discendente;                                |
| $V_c$   | è la velocità critica (m/s);   |
| $K_1 = 0,61$                                  |  |
| $T_f$   | è la temperatura media dei gas in<br>prossimità dell'incendio (K);       |
| H   | è l'altezza della galleria (m);  |
| $\rho$  | è la densità dell'aria alla temperatura<br>ambiente ( $\text{kg/m}^3$ ); |
| $C_p$   | è il calore specifico dell'aria ( $\text{kW/kg} \cdot \text{K}$ );       |
| A   | è l'area dell'incendio ( $\text{m}^2$ );                                 |
| $Q_c$   | è il tasso di rilascio del calore convettivo<br>(kW) (= 0,75Q).          |

I valori della velocità di ventilazione e di quella critica vengono utilizzati per determinare i regimi di fumo:

- se  $U < V_c$ , la ventilazione naturale e la stratificazione sono uguali in entrambe le direzioni;
- se  $U > V_c$ , i fumi sono completamente miscelati a valle dell'incendio.

La velocità iniziale “ $u_i$ ” e la profondità “ $d_i$ ” del fronte del fumo al di sopra dell'incendio, vengono calcolate secondo l'approccio di Heselden (1976):



$$u_i = 0,8 \cdot \left( \frac{g \cdot Q_c \cdot T_i}{C_p \cdot \rho \cdot T_a^2 \cdot W} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d_i = \frac{\dot{M}'}{\rho \cdot W \cdot u_i}$$

Dove:

$T_a$  è la temperatura ambiente (K);

$T_i$  è la temperature media dei gas nello strato sopra l'incendio (K)  
(=  $T_a + \Delta T$ );

$W$  è la larghezza della galleria;

$\dot{M}'$  è il tasso di portata dei prodotti della combustione nello strato di fumo (kg/s).

Si considera “ $\dot{M}'$ ” pari alla metà del valore del tasso di portata in massa totale “ $\dot{M}$ ” di una galleria con ventilazione naturale in cui i flussi dello strato di fumo sono uguali in entrambe le direzioni. Inoltre, per convenzione, si assume positiva la velocità diretta in direzione del portale “B” e negativa quella verso il portale “A”.

Il movimento del fronte di fumo lungo la galleria viene valutato utilizzando una semplice procedura *time-stepping* (Deal, 1994) che si basa sulla variazione, rispetto allo stato stazionario, della velocità e della temperatura del fumo:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \int_t^{t+\Delta t} \bar{u} \cdot dt$$

$$u(x) = u_m \left[ \frac{T_o}{T_i} \cdot e^{-3 \cdot K \cdot x} + \frac{T_i - T_o}{T_i} \cdot e^{-6 \cdot K \cdot x} \right]$$

$$T(x) = T_o + (T_i - T_o) \cdot e^{-3 \cdot K \cdot x}$$

Dove:

$$K = \frac{h_{\text{eff}} \cdot W}{3 \cdot \dot{M}' \cdot C_p}$$

- x è la posizione del fronte del fumo (m);  
 $\bar{u}$  è la velocità media del fumo (m/s);  
 $T_i$  è la temperatura iniziale (K);  
 $h_{\text{eff}}$  è il coefficiente di scambio termico efficace (W/m<sup>2</sup> · K).

La profondità dello strato di fumo è fornita dalla seguente relazione:

$$d(x) = \frac{\dot{M}'}{\rho \cdot W \cdot u(x)}$$

Quando tale profondità cresce fino a raggiungere un valore pari a 2 m dalla pavimentazione della galleria, allora si presume che il fumo sia completamente miscelato per tutta l'altezza del tunnel. Il suo movimento viene quindi valutato sulla base della continuità.

Il calcolo illustrato sopra è strettamente necessario solo per le gallerie con ventilazione naturale. Un flusso d'aria longitudinale, infatti, potrebbe causare qualche effetto sugli strati di fumo, come ad esempio la riduzione della portata di *backlayering* (fenomeno di risalita dei fumi in controcorrente). L'approccio adottato è stato quello di aggiungere le velocità del flusso d'aria nel tunnel e del fumo riducendo il fenomeno di *backlayering* sul lato a monte dell'incidente ed i tempi di arrivo nel portale a valle.

Il movimento del fumo quando si è completamente miscelato per tutta l'altezza della galleria viene stimato garantendo la conservazione della massa.

Deve essere preso in considerazione il fenomeno di estrazione dei gas da particolari sezioni del tunnel. Si ipotizza, però, che non si verifichino gli effetti "plug hole", cioè viene estratto solo fumo.

Il momento in cui quest'ultimo giunge in una determinata posizione lungo la galleria viene calcolato utilizzando la velocità del fronte descritta precedentemente. La conseguente durata delle condizioni di fumo in tale punto

dipende dall'estensione temporale dell'incendio e dagli effetti dovuti al cambiamento di ventilazione dalla modalità normale a quella di emergenza.

#### 5.4.1.4 Effetti tossici

Si presume che la concentrazione dei prodotti derivanti dalla combustione sia uniforme su tutta la profondità dello strato di fumo, nel caso di regime stratificato, e su tutta l'altezza della galleria, nel caso di regime completamente miscelato. Al di sotto dello strato di gas la concentrazione è nulla. Pertanto, i suoi effetti sono significativi solo quando il fumo si è completamente mescolato lungo tutta l'altezza del tunnel.

La concentrazione di monossido di carbonio " $C_{CO}$ " nello strato di fumo è data dalla relazione che segue (BSI, 1997):

$$C_{CO} = \frac{Y_{CO} \cdot F_R}{V_S}$$

Dove:

$V_S$  è il tasso di portata in volume dello strato di fumo ( $m^3/s$ );

$Y_{CO}$  è il tasso di conversione di massa del  $C_{CO}$  (kg/kg);

$F_R$  è il tasso di combustione (kg/s).

Il valore del tasso di conversione di massa del monossido di carbonio " $Y_{CO}$ " può essere considerato pari a 0,013 kg/kg per un incendio ben ventilato, oppure 0,25 kg/kg in condizioni meno ventilate. Il tasso di combustione può essere ottenuto dal rapporto tra il tasso di rilascio di calore " $Q$ " ed il potere calorifico " $H_c$ " del carico incendiabile.

Per illustrare un esempio di calcolo della  $C_{CO}$  si consideri un incendio di 100 MW che interessa un veicolo pesante ed un valore rappresentativo del potere calorifico pari a 25 MJ / kg. Il tasso di combustione è dato da:

$$F_R = \frac{100 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 4 \text{ kg/s}$$

Assumendo una velocità dei gas pari a 2 m/s ed un'area della sezione trasversale della galleria pari a 60 m<sup>2</sup>, il tasso di portata in volume del fumo è pari a  $V_s = 2 \cdot 60 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La concentrazione di CO che si ottiene è pari a:

$$C_{\text{CO}} = \frac{0,25 \cdot 4}{120} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

L'entità della dose tossica “L<sub>c</sub>” per un periodo di esposizione pari a “t” (minuti) è data dall'espressione:

$$L_c = C_{\text{CO}} \cdot t$$

Il numero di vittime viene determinato utilizzando una funzione di *probit* che descriviamo nei paragrafi che seguono.

#### 5.4.1.5 Visibilità

Si ipotizza che al di sotto dello strato di fumo la visibilità sia perfetta. Pertanto, gli effetti causati dalla presenza di gas sono significativi solo quando i fumi sono completamente miscelati su tutta l'altezza della galleria.

La visibilità espressa in metri attraverso lo strato di gas è fornita dalla relazione seguente (BSI, 1997):

$$S = \frac{1}{\text{OD}}$$

Dove OD è la densità ottica del fumo (1 / m), ed si ottiene utilizzando l'espressione:

$$\text{OD} = \frac{D_m F_R}{V_s}$$

Dove:

$V_s$  è il tasso di portata in volume del fumo (m<sup>3</sup>/s);

$F_R$  è il tasso di combustione (kg/s);

$D_m$  è la densità della massa ottica (m<sup>2</sup>/s).

#### 5.4.1.6 Effetti dovuti alla radiazione termica

Il 25% delle emissioni totali di calore viene irradiato su tutta la superficie della sezione trasversale della galleria in entrambe le direzioni. Il potere emissivo superficiale “ $I_r$  (kW/m<sup>2</sup>)” è dato dall'espressione che segue:

$$I_r = \frac{Q_r}{2 \cdot H \cdot W}$$

Dove:

H è l'altezza della galleria (m);

W è la larghezza della galleria (m);

$Q_r$  è la radiazione di calore in uscita (kW) (= 0,25Q).

Il flusso di radiazione incidente “ $I$  (kW/m<sup>2</sup>)” è dato da:

$$I = v_f \cdot T_r \cdot I_r$$

Dove “ $v_f$ ” è il fattore di vista definito in precedenza, calcolato ipotizzando che la radiazione colpisca un bersaglio posizionato lungo la mezzeria della galleria e “ $T_r$ ” è un valore costante che rappresenta la trasmissività atmosferica.

Saranno presenti, inoltre, effetti aggiuntivi dovuti al calore irradiato, dallo strato di fumo verso le persone che stanno evacuando nella zona in cui l'aria è pulita.

Si ottiene quindi la seguente relazione:

$$I_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_a^4)$$

Dove:

$\varepsilon$  è l'emissività del fumo (-);

$\sigma$  è la costante di Stefan Boltzmann (W/m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>);

T è la temperatura del fumo (K);

$T_a$  è la temperatura ambiente(K).

Il flusso di radiazione dallo strato di fumo verso una persona posta al di sotto di esso viene calcolato assumendo la radiazione del corpo nero, cioè emissività  $\varepsilon = 1$ . Il flusso incidente può essere valutato in modo analogo a quello definito sopra.

La dose di radiazione termica “ $L_T$  ( $[W/m^2]^{4/3} \cdot s$ )” ricevuta durante un tempo di esposizione pari a “ $t$  (secondi)” è fornita dall’espressione:

$$L_T = l^{\frac{4}{3}} \cdot t$$

Verrà poi utilizzata una funzione di *probit* per determinare le percentuali di decessi.

## 5.4.2 Nubi di vapore tossico generate da Cloro, Ammoniaca o Acroleina

Per valutare le conseguenze di queste nubi si ipotizza che:

- cloro ed ammoniaca vengono conservati a temperatura ambiente come un liquido sotto pressione e fuoriescono da un foro di 50 mm di diametro;
- l’acroleina viene mantenuta, anch’essa a temperatura ambiente, ma fuoriesce da un foro di 100 mm di diametro.

### 5.4.2.1 Sorgenti del vapore

Per quanto riguarda un liquido che ha un rilascio a getto verso il basso, il tasso di portata in massa liquida è dato dall’equazione:

$$\dot{m} = C_D \cdot A_h \cdot \rho \cdot u$$

Dove:

$$\frac{u^2}{2} = g \cdot h + \frac{\Delta P}{\rho}$$

$C_D$  è il coefficiente di portata (= 0,6);

$A_h$  è l’area del foro ( $m^2$ );

$\rho$	è la densità del liquido ( $\text{kg/m}^3$ );
$h$	è la profondità del liquido nel serbatoio (si considera pari a 2m);
$\Delta P$	$= 7 \cdot 10^{-5}$

Quando il liquido in pressione viene rilasciato una quota si infiamma (questa è quasi nulla per l'acroleina). La frazione restante può evaporare nell'ambiente oppure formare una pozza. Ai fini del nostro problema l'obiettivo è quello di definire una fonte di vapore. Tale sorgente viene calcolata in due fasi. In primo luogo si ottiene la frazione di massa "f" che infiamma il vapore nel momento del rilascio:

$$f = \frac{C_{pl} \cdot (T_s - T_b)}{H_{vap}}$$

Dove:

$C_{pl}$	è il calore specifico per i liquidi a pressione costante ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ );
$T_s$	è la temperatura di conservazione del liquido nel serbatoio ( $\text{K}$ );
$T_b$	è il punto di ebollizione del liquido ( $\text{K}$ );
$H_{vap}$	è il calore latente di vaporizzazione ( $\text{J/kg}$ ).

La quantità di aria necessaria a vaporizzare la frazione restante di liquido può essere calcolata attraverso il seguente bilancio di entalpia ipotizzando che la miscela di aria e vapore si mantenga al punto di ebollizione:

$$\dot{m}_a \cdot C_p \cdot (T_a - T_b) = (1 - f) \cdot \dot{m} \cdot H_{vap}$$

Dove  $C_p$  rappresenta il calore specifico dell'aria ( $\text{kW/kg} \cdot \text{K}$ ).

Nel caso di bassa ventilazione potrebbe non essere presente aria sufficiente per vaporizzare immediatamente tutto il liquido. Pertanto si assume che la quota vaporizzata dopo la fiammata sia almeno uguale a quella che inizialmente fuoriesce. Ad esempio, se la frazione iniziale è pari a 0,18, allora il valore totale vaporizzato vicino alla sorgente sarà di almeno 0,36 e potrà essere maggiore se vi è un flusso di ventilazione sufficiente.

#### 5.4.2.2 Effetti tossici

Gli effetti fisiologici di cloro, ammoniaca ed acroleina possono essere determinati attraverso la valutazione del carico tossico. Questo viene calcolato nel modo seguente:

$$L_C = C^n \cdot t$$

Dove:

- C è la concentrazione del prodotto (ppmv);
- t è il tempo di esposizione (minuti);
- n è il numero indice;
- $L_C$  è il carico tossico ( $[\text{ppmv}]^n \cdot \text{min}$ ).

Anche in questo caso vengono utilizzate delle funzioni di *probit* per determinare la percentuale di decessi.

#### 5.4.3 BLEVE che coinvolge GPL

In questo paragrafo si valutano le conseguenze di un incidente che comporta il verificarsi di un BLEVE all'interno di una galleria nel caso in cui venga trasportato GPL. Vengono considerati due scenari che corrispondono ad altrettanti mezzi di contenimento differenti: un "cylinder" di 50 kg ed un'autobotte di 18 tonnellate. Il GPL viene immagazzinato come un liquido a temperatura ambiente (288 K). Il BLEVE può verificarsi quando il mezzo di contenimento è avvolto nel fuoco: le sollecitazioni termiche potrebbero causare la rottura del recipiente e l'alta infiammabilità del prodotto porterebbe al generarsi di una "fireball".

##### 5.4.3.1 Dimensioni della "fireball"

Il modello utilizzato è tratto dall'analisi di Kinsmann (1991). L'attuale conoscenza relativa allo sviluppo di una "fireball" in galleria è limitata. In particolare è piuttosto incerto l'effetto della modesta disponibilità di ossigeno



sulla maturazione di tale scenario. Pertanto si ipotizza che il volume totale della “*fireball*” in galleria assume lo stesso valore di quello che si ottiene in una sezione aperta, Considine (1989). Ed inoltre si presume che questa “*fireball*” prodotta da un BLRVE in una sezione aperta sia sferica.

Le equazioni che seguono vengono utilizzate per determinare il diametro e la durata del fenomeno per una vasta gamma di combustibili:

$$D = 5,8 \cdot M^{\frac{1}{3}}$$

Dove:

D è il diametro della “*fireball*” (m);

M è la massa di carburante (kg).

La durata di tale scenario “t” (secondi) può essere calcolata utilizzando:

$$t = 0,45 \cdot M^{\frac{1}{3}} \quad \text{se } M < 37 \text{ tonnellate}$$

$$t = 8,6 \cdot M^{\frac{1}{6}} \quad \text{se } M \geq 37 \text{ tonnellate}$$

La corrispondente lunghezza della galleria colpita dal fenomeno può essere valutata uguagliando il volume di un tunnel con sezione cilindrica con quello della “*fireball*”. Se quest’ultimo è maggiore, allora il volume in eccesso può essere emesso da uno o entrambi i portali.

Lo scenario caratterizzato da un “*cylinder*” di 50 kg produrrebbe una “*fireball*” di 21,4 metri di diametro, all’aperto, con una durata di circa 2 secondi generando un volume di 5130 m<sup>3</sup>. Considerando una galleria di 8 metri di larghezza e 6 metri di altezza, la “*fireball*” andrebbe a riempire una lunghezza del tunnel di 107 m. Per un’autobotte di 18 t le equazioni definite sopra forniscono un diametro di 152 m ed una durata di circa 12 secondi. Il volume della “*fireball*” è equivalente ad una lunghezza della galleria di oltre 38km, quindi il problema della disponibilità di ossigeno è chiaramente molto importante in questo caso.

### 5.4.3.2 Effetti dati dalla radiazione termica

Si presume che moriranno tutte le persone inglobate nella “*fireball*”. Il potere emissivo superficiale, nel caso in cui il prodotto trasportato sia GPL, è pari a 270 kW/m<sup>2</sup> per un rilascio inferiore a 125 tonnellate (Kinsmann, 1991). Gli effetti generati dalla radiazione termica di una “*fireball*”, in galleria, vengono calcolati nello stesso modo descritto per gli incendi di veicoli pesanti e fuoriuscite di benzina.

### 5.4.3.3 Effetti generati dalla pressione

Il confinamento parziale delle esplosioni nelle gallerie porta ad avere sovrappressioni elevate anche a notevole distanza dalla sorgente. L'utilizzo di una massa equivalente di TNT fornisce informazioni utili relative alla pressione di picco per tutta la lunghezza di un tunnel.

Considine (1989) presenta correlazioni di base empirica riguardanti la pressione e l'impulso di picco in funzione della distanza “*l*”, dell'area “*A*” della sezione trasversale e delle dimensioni “*m*” della sorgente. Questi parametri possono essere utilizzati per produrre una scala quantitativa della distanza “*z*” e del carico “*c*” dove:

$$z = l \cdot m^{\frac{1}{3}}$$
$$c = m^{\frac{1}{3}} \cdot A^{\frac{1}{2}}$$

La correlazione per la sovrappressione è mostrata in figura 5.9.

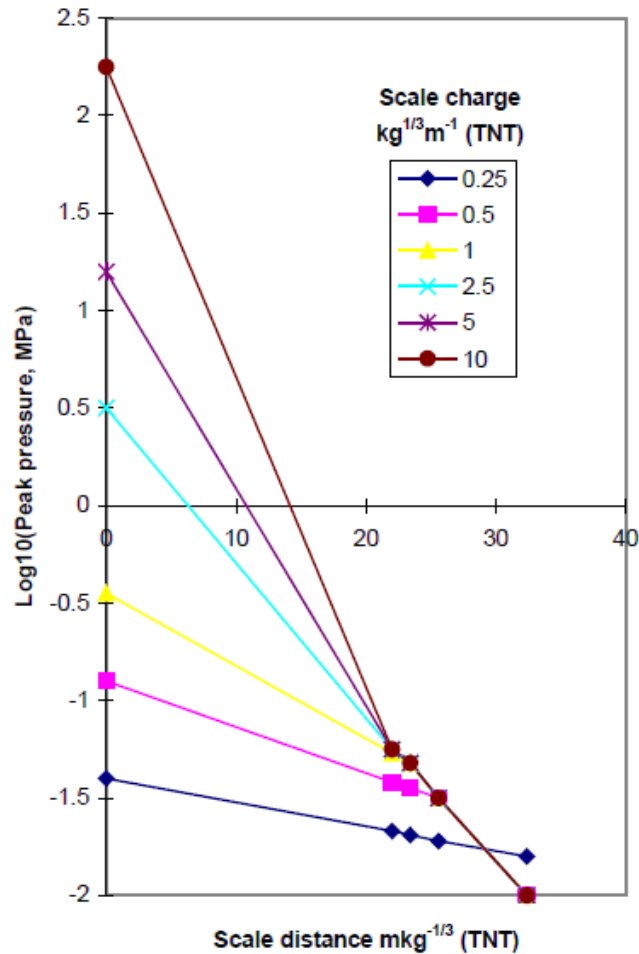


Figura 5.9: correlazione sperimentale della pressione di picco in una galleria dovuta alla detonazione di TNT.

La massa del carico equivalente di TNT può essere calcolata nel modo seguente:

$$M_{\text{TNT}} = \alpha_e \cdot \frac{M_f \cdot H_f}{H_{\text{TNT}}}$$

Dove:

$M_{\text{TNT}}$  è la massa equivalente di TNT (kg);

$M_f$  è la massa del combustibile nella nube (kg);

$H_f$  è il calore di combustione del combustibile (MJ/kg);

$H_{\text{TNT}}$  è il calore di combustione del TNT = 4,68 (MJ/kg);

$\alpha_e$  è il coefficiente di equivalenza con il TNT = 0,03.

### 5.4.4 Esplosione di una nube di vapore (VCE) generata da GPL e benzina

In questo paragrafo vengono valutate le conseguenze di un VCE a seguito di un rilascio di vapori infiammabili all'interno di una galleria. Anche in tale caso si considerano due diversi mezzi di contenimento che corrispondono ad altrettanti scenari: un'autobotte di 18 tonnellate che trasporta benzina ed un'altra che trasporta GPL. La benzina viene mantenuta a temperatura e pressione ambiente ed i suoi limiti di infiammabilità sono rispettivamente 1,4% e 7,4%. Il GPL invece viene conservato a temperatura ambiente ed una pressione di 8 bar ed i limiti di infiammabilità sono rispettivamente il 2% e il 9,5% circa.

#### 5.4.4.1 Sorgenti del vapore e sviluppo della nube

I tassi di portata in massa di liquido vengono calcolati per il propano e la benzina nello stesso modo descritto in precedenza per gli scenari relativi a cloro ed ammoniaca. Se si considera il GPL la portata di vapore è stimata considerando la fiammata iniziale e la conseguente evaporazione delle goccioline trasportate dall'aria.

Per quanto riguarda la benzina, invece, l'evaporazione del liquido da una pozza rappresenta il meccanismo principale per il rilascio di vapore. In questo caso il tasso si ottiene utilizzando l'equazione che segue:

$$\dot{m}_E = 1,2 \cdot 10^{-10} \cdot \left( \frac{M \cdot p^o}{T} \right) \cdot u^{0,78} \cdot x^{0,89} \cdot y$$

Dove:

- $\dot{m}_E$  è il tasso di evaporazione (g/s);
- M è il peso molecolare;
- $p^o$  è la pressione di vapore del liquido (dyn/cm<sup>2</sup>);
- T è la temperatura assoluta del liquido (K);
- u è la velocità media del vento (cm/s);
- x, y sono le dimensioni della pozza (cm).

L'espressione appena descritta è valida per una pozza di forma rettangolare, perpendicolare al flusso d'aria ambiente (Lees, 1980).

La concentrazione ed il movimento della nube vengono calcolati supponendo che il gas infiammabile sia distribuito uniformemente su tutta la sezione trasversale della galleria e che si muova con la stessa velocità del flusso d'aria.

Si presume che la nuvola di vapore si infiammi quando il fronte della nube stessa raggiunge un portale o quando il serbatoio si svuota oppure dopo 10 minuti se i fenomeni appena descritti accadrebbero dopo questo tempo.

#### **5.4.4.2 Sovrappressioni nella galleria**

La geometria della zona in cui avviene il rilascio dei gas svolge un ruolo importante nella produzione di sovrappressioni di picco generate dall'esplosione della nube.

Nel caso in cui tale esplosione sia confinata, l'aumento di volume fornirà una rapida crescita della pressione ed i portali rappresenteranno un importante sfogo. Anche se la galleria è solo parzialmente colma di fumi infiammabili, i prodotti della combustione in espansione spingeranno i gas incombusti davanti a se riempiendo il tunnel con il loro avanzamento. Le sovrappressioni prodotte in tali situazioni possono essere più elevate di quelle che si ottengono nel caso in cui la galleria è completamente satura di vapore.

Si distinguono i casi in cui il gas espanso riempie una porzione significativa del tunnel e quelli in cui la dimensione della nube è relativamente piccola. La soglia fissata è quella che si ha quando il volume del gas è pari al 25% di quello della galleria.

Al di sotto di tale valore le sovrappressioni vengono stimate utilizzando l'approccio del TNT equivalente descritto nei paragrafi precedenti.

Sopra la soglia, invece, il metodo utilizzato si basa su un adattamento degli studi di Cabbage e Simmonds (1995). Questa rielaborazione è stata sviluppata per valutare l'esplosione in spazi ristretti ed è rappresentata dalla relazione:

$$\Delta p = 58 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \beta \cdot S_o \cdot \frac{\left( \frac{n_x}{100} \cdot V \right)^{\frac{2}{3}}}{A_x}$$

Dove:

- $\Delta p$  è la sovrappressione media (mbar);
- $k_1$  è la costante di composizione del gas;
- $k_2$  è la costante di lunghezza del percorso della fiamma;
- $k_3$  è la costante del “rapporto di bloccaggio”;
- $\beta$  è il fattore di turbolenza = 12;
- $S_o$  è la velocità di combustione laminare (= 0,52 m/s per il propano, 0,4 m/s per la benzina);
- $n_x$  è la percentuale di gas attraverso lo sfiato x;
- $A_x$  è l'area dello sfogo, per esempio della sezione trasversale (m<sup>2</sup>);
- $V$  è il volume libero della galleria (m<sup>3</sup>).

Si possono fare alcune osservazioni relative a questi parametri:

- $k_1$  è un fattore che dipende dal combustibile: vale 1,2 per il propano ed 1 per la benzina;
- $k_2$  riflette la distanza disponibile per l'accelerazione di fiamma ed è definito come il percorso interposto tra la sorgente di accensione e la presa d'aria dominante;
- $k_3$  dipende dal “rapporto di bloccaggio” della sezione definito come il rapporto tra la zona libera, disponibile per l'accelerazione di fiamma, e l'area totale della sezione trasversale della galleria. La maggior parte del blocco in un tunnel è dovuto ai veicoli fermi; la tabella 5.2 riporta i valori di  $k_3$  per un serie di “rapporti di bloccaggio”.

<b>RAPPORTO DI BLOCCAGGIO (%)</b>	<b>K<sub>3</sub></b>
5	0,5
20	1,0
30	2,0

Tabella 5.2: valori di  $k_3$  in funzione del “rapporto di bloccaggio”.

- Si ipotizza che ci siano due aperture nella galleria. Se il volume della nube dopo la combustione è inferiore a quello del tunnel, allora si presume che tali aperture siano in corrispondenza dei due fronti della nube altrimenti coincidono con i portali. Il gas viene emesso in egual quantità attraverso entrambe le estremità:  $n_x = 50\%$  ;
- Il volume libero “V” rappresenta il volume occupato dalla nube di gas al netto di quello occupato dai veicoli.

#### 5.4.4.3 Effetti generati dall'esplosione

Gli effetti delle radiazioni termiche sono calcolati come quelli generati da un BLEVE. Vengono poi utilizzate equazioni di *probit* per valutare la percentuale di decessi. Tuttavia, per le esplosioni all'interno della galleria in cui le persone nei veicoli generalmente indossano le cinture di sicurezza è più appropriato considerare decessi dovuti a cause come le emorragie polmonari piuttosto che effetti connessi con l'impatto del corpo.

### 5.5 Equazioni di probit per la valutazione delle vittime

Questo paragrafo mira a presentare i metodi sviluppati per valutare le conseguenze degli effetti letali sugli essere umani nei diversi scenari. Per

quest'analisi vengono utilizzate le cosiddette funzioni di *probit*, la cui forma elementare è la seguente:

$$Pr = a + b \cdot \ln(L)$$

Dove “a” e “b” rappresentano delle costanti mentre “L” è il carico relativo all'effetto studiato.

### 5.5.1 Rilasci tossici di Cloro

Gli effetti fisiologici si possono ricavare dalla conoscenza delle caratteristiche fisiche della nube e dall'applicazione di un'equazione di *probit* relativa all'effetto cercato. Per cloro ed ammoniaca l'equazioni utilizzate si ricavano da quelle raccomandate dal ministero francese responsabile dell'ambiente. Considerando il cloro si ottiene:

$$Pr = 0,5 \cdot \ln(C^{2,75} \cdot t) - 5$$

Dove “t” è il tempo di esposizione (minuti) alla concentrazione “C” (ppmv, parte per milione in volume), che si ipotizza costante.

Attraverso quest'espressione vengono quindi calcolate le concentrazioni corrispondenti all'1%, 10% e 50% di letalità in funzione del tempo di esposizione, come mostrato dalla tabella 5.3.

<b>LETALITA'</b> (%)	<b>PROBIT</b>	<b>C</b> <b>Per t = 10</b>	<b>C</b> <b>Per t = 20</b>	<b>C</b> <b>Per t = 30</b>
1	2,67	117	91	79
10	3,72	251	195	169
50	5	638	496	428

Tabella 5.3: concentrazioni di cloro per valori di letalità differenti corrispondenti a diversi tempi di esposizione.

### 5.5.2 Rilasci tossici di Ammoniaca

Come per il cloro viene utilizzata un'equazione di *probit* per valutare gli effetti fisiologici delle emissioni di ammoniaca:



$$\text{Pr} = 1,85 \cdot \ln(C^2 \cdot t) - 35,95$$

Dove “t” è sempre il tempo di esposizione (minuti) alla concentrazione “C” (ppmv) che si ipotizza ancora costante.

### **5.5.3 Rilasci tossici di Acroleina**

Per i rilasci di acroleina viene utilizzata un'altra equazione di *probit* per stimare gli effetti fisiologici in galleria:

$$\text{Pr} = 1 \cdot \ln(C \cdot t) - 3,18$$

Indicando con “t” il periodo di esposizione (minuti) alla concentrazione “C” (ppmv) costante.

### **5.5.4 Esplosione di una nube di vapore: VCE**

Per quanto riguarda gli effetti di un VCE nelle gallerie è stato sviluppato un modello che conduce al calcolo del livello di sovrappressione generato dalla combustione della nube infiammabile. Tuttavia non viene valutata la durata delle onde di pressione e pertanto si utilizza un'equazione di *probit* relativamente semplice, fornita da Lees:

$$\text{Pr} = -77,1 + 69,91 \cdot \ln(p^\circ)$$

Questa relazione viene applicata anche per valutare gli effetti che si hanno all'esterno della galleria di un'esplosione avvenuta all'interno.

### **5.5.5 Pool fire**

In primo luogo è fondamentale valutare i movimenti del fumo generato dall'incendio per poi calcolare le distanze a cui si risentono gli effetti tossici e termici delle radiazioni che nascono dal fumo stesso.

Per quanto riguarda gli effetti letali dovuti al monossido di carbonio viene utilizzata la seguente espressione:

$$\text{Pr} = -37,98 + 3,7 \cdot \ln(C \cdot t)$$

Dove “C” è la concentrazione del prodotto espressa in ppmv e “t” è il tempo di esposizione espresso in minuti.

Per stimare gli effetti letali dovuti all'irraggiamento di calore si considera l'equazione di Eisenberg:

$$Pr = 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t) - 14,9$$

Dove “q” indica l'intensità di radiazione termica (kW/m<sup>2</sup>) e “t” la durata dell'esposizione (s).

### 5.5.6 Torch fire e BLEVE

Nelle gallerie si presume che i “torch fire” si trasformino in BLEVE, pertanto in questo paragrafo ci dedichiamo a descrivere solamente il secondo dei due fenomeni.

Un BLEVE si scompone in due fasi:

- un'espansione fisica che si verifica quando si rompe il contenimento favorendo effetti “missile” dei frammenti del serbatoio proiettati ad elevata velocità ed effetti dati dalla sovrappressione;
- una reazione chimica che si verifica se il prodotto trasportato è infiammabile.

Nelle gallerie il calcolo degli effetti fisici è stato eseguito ipotizzando che il volume della “*fireball*” è lo stesso di quello che si ha nelle sezioni aperte. Quindi per valutare quelli termici, una volta che è stata calcolata la durata della “*fireball*”, si utilizza l'equazione di *probit* di Eisenberg descritta nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda, invece, gli effetti dovuti alla pressione è stato fissato un limite in corrispondenza del quale si ha la comparsa dei decessi ed il suo valore è pari a 140 mbar.

## 5.6 Equazioni di probit per la valutazione dei feriti

### 5.6.1 Incendi ed effetti termici

Un incendio di grandi dimensioni può causare, oltre ai decessi, anche gravi ustioni. In questa sezione viene pertanto presentata la metodologia per stimare l'entità delle ferite a carico degli utenti della strada.

Il “*Green Book*” del TNO (1992) utilizza le funzioni di *probit* anche per caratterizzare la natura delle lesioni generate dalla radiazione termica. L'equazioni che vengono applicate per le ustioni di primo e secondo grado sono rispettivamente:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(V)$$

$$Pr = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln(V)$$

Dove:

V è la dose termica “ $l^{4/3} \cdot t \cdot ((W/m^2)^{4/3} \cdot s)$ ”;

l è il flusso di radiazione ( $W/m^2$ );

t è il tempo di esposizione (s).

### 5.6.2 Incendi ed effetti dovuti al fumo

Il più importante prodotto tossico che deriva da un incendio è il monossido di carbonio “CO”. L'espressione riportata sotto è stata tratta dal manuale SFPE (1990) e fornisce la frazione di dose invalidante per una persona di 70 kg impegnata in un'attività leggera su un periodo massimo di un'ora:

$$t = \frac{D}{K \cdot CO^{1,036}}$$

Dove:

t rappresenta il tempo di esposizione (min);

D è la percentuale di concentrazione di CO corrispondente alla dose invalidante (30% per un'attività poco impegnativa);

- K vale  $8,2925 \cdot 10^{-4}$  per attività leggere (volume di aria inspirata pari a 25 L/m);
- CO concentrazione di CO (ppmv).

Quest'equazione prevede, quindi, che un essere umano di 70 kg occupato in un esercizio poco impegnativo impiegherà un tempo di circa 5,3 minuti per perdere le sue capacità se la concentrazione di monossido di carbonio è di 5000 ppmv.

### 5.6.3 Esplosioni

Un'esplosione di elevata entità può causare gravi lesioni alle persone attraverso i seguenti effetti:

- 1) radiazioni termiche generate dal calore;
- 2) spostamento d'aria;
- 3) prodotti della combustione.

Le prime sono state presentate nel paragrafo precedente mentre le ferite dovute allo spostamento d'aria possono essere dirette o indirette e vengono associate a tre fenomeni: sovrappressione sviluppata a seguito dell'esplosione, effetti "missili" cioè frammenti del serbatoio proiettati a grande velocità, e spostamento dell'intero corpo della persona.

Le funzioni di *probit* per i differenti tipi di lesioni sono riportate sotto.

Per la rottura del timpano:

$$\text{Pr} = -15,6 + 1,93 \cdot \ln(p^\circ)$$

Per le ferite causate dall'effetto "missile":

$$\text{Pr} = -27,1 + 4,26 \cdot \ln(J)$$

Infine per le lesioni generate dallo spostamento del corpo della persona:

$$\text{Pr} = -39,1 + 4,45 \cdot \ln(J)$$

Indicando con:

- Pr la funzione di *probit*;
- $p^\circ$  il picco di sovrappressione (N/m<sup>2</sup>);

J l'impulso ( $N \cdot s/m^2$ ).

### 5.6.4 Rilascio tossico di Cloro, Ammoniaca ed Acroleina

L'equazioni di *probit* utilizzate per valutare le lesioni non letali causate dal cloro, dall'ammoniaca e dall'acroleina, sono quelle indicate dal Ministero dell'Ambiente francese e riportate rispettivamente qui di seguito:

$$Pr = -10,085 + 4,45 \cdot \ln(C^{2,75} \cdot t)$$

$$Pr = -21,43 + \ln(C^{3,33} \cdot t)$$

$$Pr = -2,34 + \ln(C \cdot t)$$

Nelle quali indichiamo con:

- Pr la funzione di *probit*;
- C la concentrazione del prodotto (ppmv);
- t il tempo di esposizione (minuti).

## 5.7 Confronto tra i modelli per la valutazione delle vittime e quelli per la valutazione dei feriti

### 5.7.1 Scenari che prevedono incendi

#### 5.7.1.1 Effetti termici

Il grafico seguente (figura 5.10) propone un confronto tra le equazioni di *probit* utilizzate in questi scenari:

- per la valutazione del numero di morti si applica l'equazione di Eisenberg (rappresentata in blu nella figura 5.10) definita precedentemente:

$$Pr = 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t) - 14,9$$

- per la valutazione del numero di feriti si hanno due relazioni in base al grado di ustione; per le ustioni di primo grado (rappresentate in rosso

nella figura 5.10) e per quelle di secondo grado (rappresentate in rosa) si utilizzano rispettivamente le seguenti espressioni già descritte:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(V)$$

$$Pr = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln(V)$$

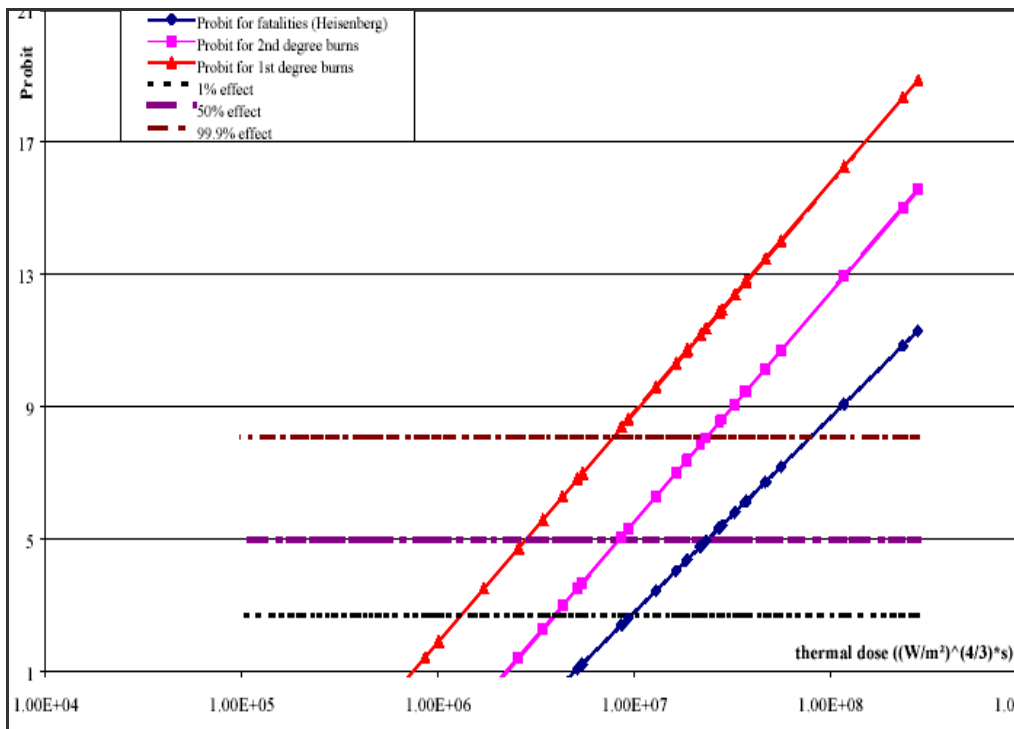


Figura 5.10: confronto tra l'equazioni di *probit* per valutare decessi e feriti considerando gli effetti termici.

### 5.7.1.2 Effetti causati dalla presenza del fumo

Il raffronto delle equazioni proposte per la stima delle fatalità e delle lesioni (effetto invalidante) viene illustrato nella figura 5.11.

In ascissa è riportato il tempo di esposizione al fumo espresso in minuti, mentre in ordinate si ha la concentrazione (in ppmv) che corrisponde ad un determinato effetto.

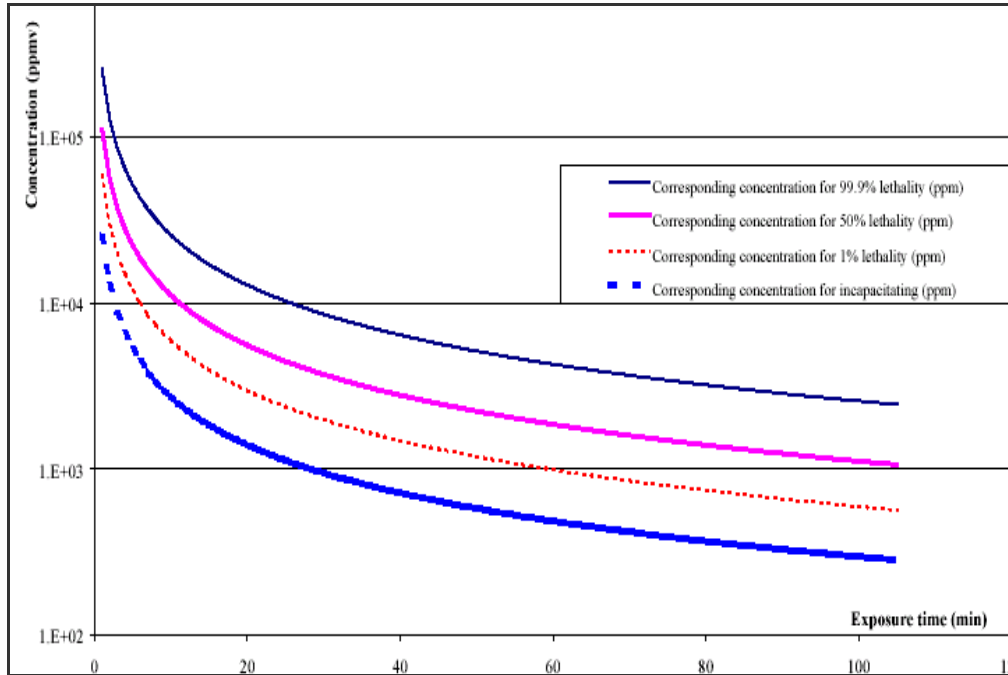


Figura 5.11: confronto tra equazioni di probit nella stima di decessi e feriti a seguito degli effetti di fumo dovuti ad un incendio.

### 5.7.2 Scenari che prevedono esplosioni

In galleria l'equazione considerata per le fatalità si riferisce a danni ai polmoni prendendo in considerazione solamente la sovrappressione e non l'impulso:

$$Pr = -77,1 + 69,91 \cdot \ln(p^\circ)$$

Tale relazione, rappresentata in blu nella figura 5.12, viene confrontata con quella equivalente per la stima delle lesioni che è l'equazione di rottura del timpano (rappresentata con un tratteggio rosa):

$$Pr = -15,6 + 1,93 \cdot \ln(p^\circ)$$

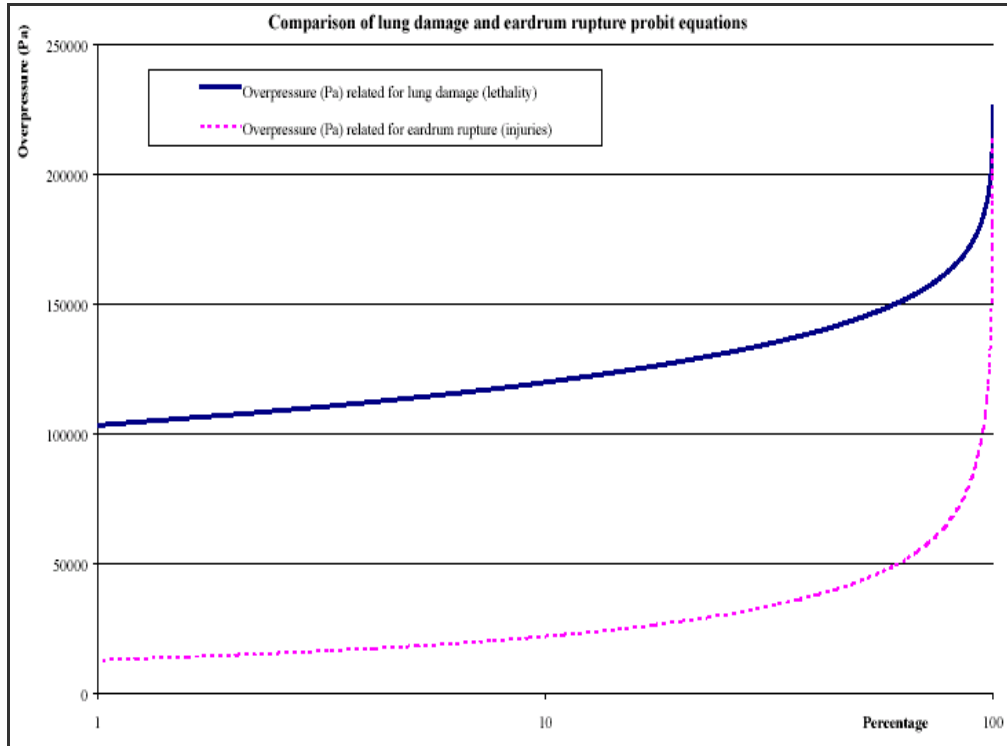


Figura 5.12: confronto tra equazioni di *probit* per fatalità e feriti in caso di esplosione.

### 5.7.3 Rilasci tossici di Cloro, Ammoniaca ed Acroleina

Nel caso in cui si abbia un incidente che provochi un rilascio tossico di cloro le equazioni di *probit* fornite per valutare morti e feriti sono state messe a confronto (vedi figura 5.13) come segue: la concentrazione necessaria per ottenere una determinata percentuale di mortalità, nel caso di un'esposizione di 5, 10, 20 e 30 minuti, viene comparata con quella necessaria per ottenere una certa percentuale di feriti.



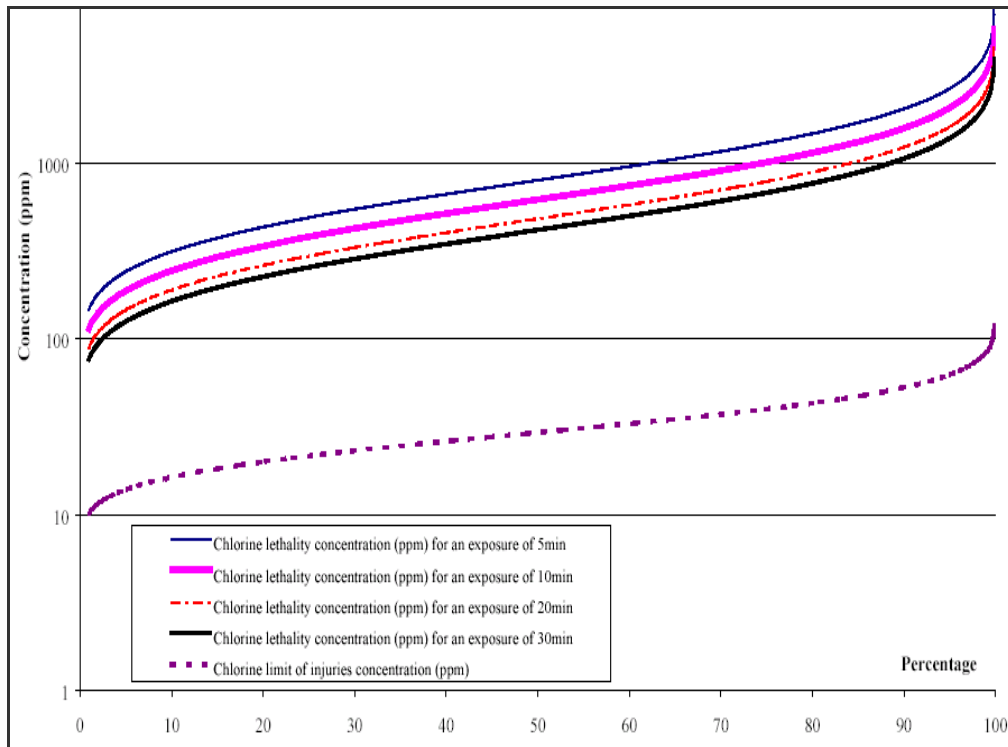


Figura 5.13: confronto tra equazioni di *probit* per fatalità e feriti in caso di rilascio di cloro.

Un procedimento analogo è stato applicato per:

- rilasci tossici di ammoniaca (figura 5.14);
- rilasci tossici di acroleina (figura 5.15).

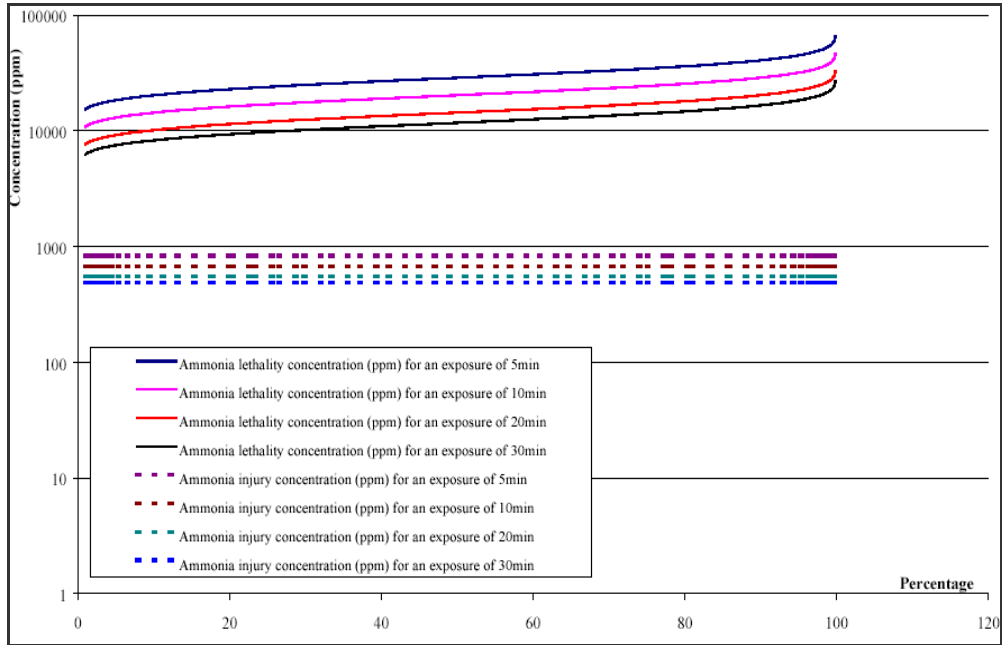


Figura 5.14: confronto tra equazioni di *probit* per fatalità e feriti in caso di rilascio di ammoniacca.

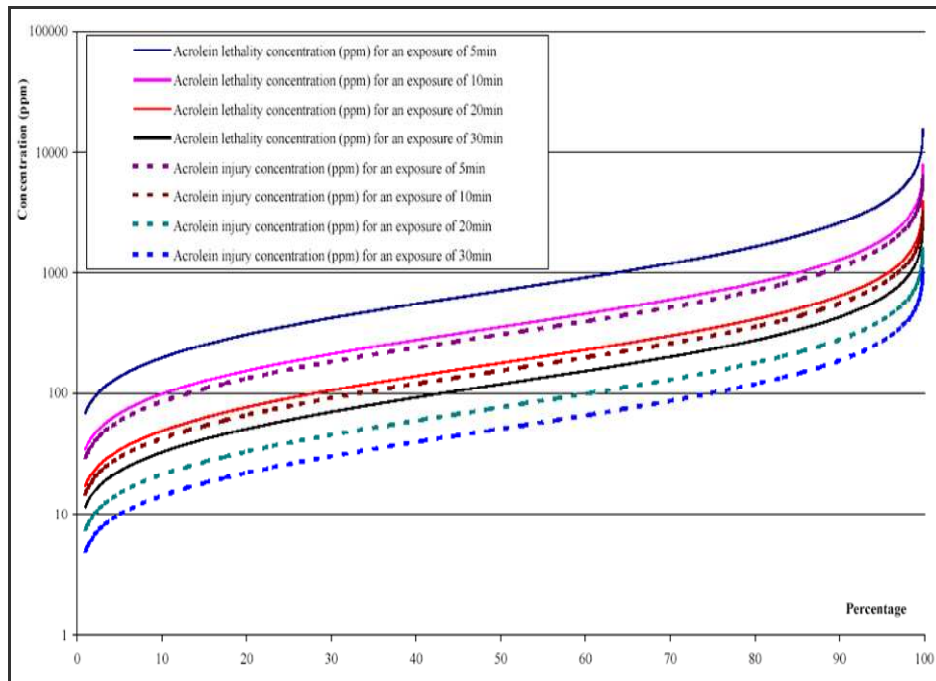


Figura 5.15: confronto tra equazioni di *probit* per fatalità e feriti in caso di rilascio di acroleina.

## 5.8 Modellazione degli scenari di esodo

La modellazione degli scenari di esodo richiede la formulazione e la soluzione di:

- un modello di formazione delle code all'interno della galleria;
- un modello di evacuazione degli utenti dalla struttura.

### 5.8.1 Caratterizzazione del traffico in galleria

Un modello semplificato di formazione delle code in galleria può essere formulato riferendosi ai parametri utilizzati nella caratterizzazione della circolazione in galleria, in termini di regimi di traffico, sottolineandone il ridotto livello di rappresentazione ed accuratezza.

La figura 5.16 schematizza il processo di formazione di una coda all'interno di una galleria in presenza di un evento incidentale.

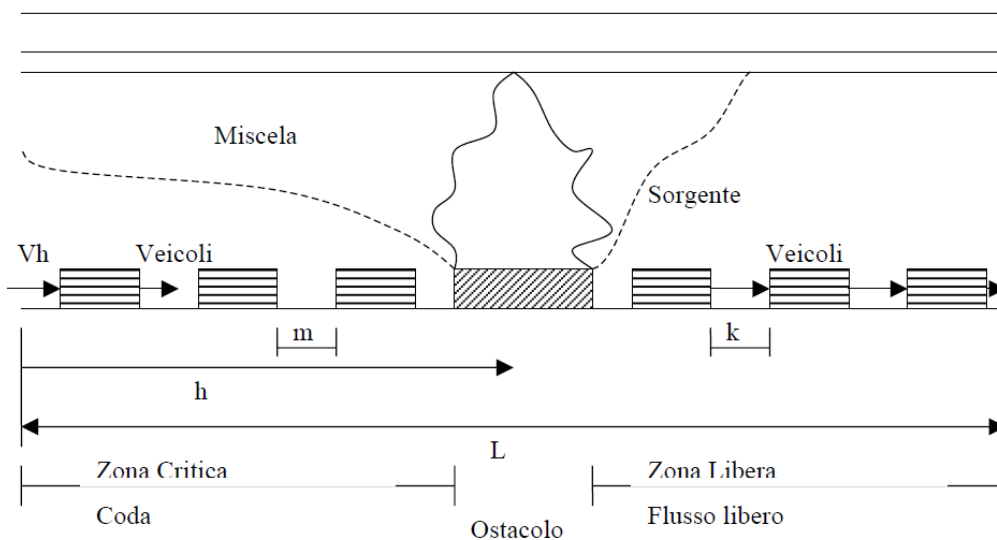


Figura 5.16: processo di formazione di una coda in galleria.

Supponiamo che siano verificate le seguenti condizioni:

- rappresentazione euleriana del traffico;
- flusso di traffico stazionario ed omogeneo.

Identifichiamo l'interdistanza tra i veicoli "I" come il parametro che caratterizza il traffico. Questa viene definita nel modo seguente (ANAS, 2006):

$$I = V \cdot D$$

Inoltre:

$$N = \frac{L}{I}$$

Si ottiene quindi:

$$N = \frac{L}{V \cdot D}$$

Dove "I" è appunto l'interdistanza tra i veicoli in movimento espressa in metri, "V" è la loro velocità (m/s), "N" è il numero di veicoli presenti in galleria su una carreggiata, "D" è il tempo che ogni veicolo impiega a percorrere un tratto dato dalla somma della lunghezza del mezzo stesso e della distanza di sicurezza (s) ed, infine, "L" è la lunghezza totale della galleria (m).

Le condizioni di flusso scorrevole potrebbero essere caratterizzate come quelle per le quali sia verificata la relazione d'ordine:

$$I \geq I^*$$

Dove con il termine "I\*" si indica l'interdistanza di sicurezza tra i veicoli. Questa grandezza dipende ovviamente dalla lunghezza media dei veicoli stessi e dalla loro velocità.

Le condizioni di flusso congestionato di conseguenza potrebbero essere caratterizzate come quelle per le quali sia verificata quest'altra relazione d'ordine:

$$I \leq I^*$$

Il modello descritto evidenzia come il numero dei veicoli presenti nella galleria non cresca con il flusso di veicoli per carreggiata.

Supponiamo ora che si verifichi un evento di incendio e che siano soddisfatte le condizioni:

- traffico bloccato sopravvento al focolaio all'istante iniziale;

- focolaio localizzato ad una distanza “d” dal portale di accesso;
- le condizioni introdotte determinano la formazione di un tappo.

La cinematica del tappo può essere descritta introducendo una velocità di risalita caratteristica stimabile attraverso l'espressione (ANAS, 2006):

$$u = \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{\frac{1}{I_0} - \frac{1}{D \cdot V}}$$

Dove “ $I_0$ ” è l'interdistanza dei veicoli all'istante iniziale.

La velocità di risalita del tappo influenza la probabilità di una carambola di veicoli al termine della coda. Quindi si evince che il valore del tempo di risalita è pari a:

$$\tau = \frac{d}{u}$$

Questo valore deve essere poi confrontato con il tempo necessario alla chiusura della galleria.

### 5.8.2 Evacuazione dalla galleria

La determinazione delle fatalità connesse ad un singolo ramo dell'*albero degli eventi* è ottenuta risolvendo uno specifico modello del processo di esodo degli utenti dalla struttura.

Tale metodo ingloba, come già menzionato, un modello di formazione delle code dei veicoli in galleria dopo l'accadimento di un evento critico rilevante che se risolto consente di valutare la popolazione esposta essendo fissato il numero medio di passeggeri per veicolo.

Il processo di esodo degli utenti verso le uscite di soccorso, in condizioni incidentali, viene realizzato da aggregati di individui caratterizzati da comportamenti specifici.

Pertanto, in questo paragrafo descriviamo i principi generali e le tecniche adottate per modellare la capacità degli occupanti di evacuare in un luogo di relativa sicurezza, in seguito ad incidenti nelle gallerie stradali. In base allo

scenario che si verifica, i passeggeri possono essere sottoposti ad un effetto o ad una combinazione di effetti: termici, tossici, generati dalle esplosioni o dal fumo.

### 5.8.2.1 Principi di evacuazione

Le informazioni attualmente pubblicate sul comportamento umano durante gli incendi e sui metodi di calcolo del tempo di evacuazione sono notoriamente incomplete (BSI, 1997). Il problema chiave è la disponibilità delle persone a lasciare i loro veicoli nei corsi di un incidente. Pertanto, ai fini della progettazione è necessario formulare delle ipotesi ragionevoli nel caso in cui le informazioni disponibili non siano sufficienti.

Il tempo effettivo impiegato dagli occupanti per evacuare un certo spazio ( $T_{\text{evac}}$ ) verso un luogo di sicurezza è molto complesso. Esso comprende i seguenti componenti:

- *tempo di riconoscimento* ( $T_{\text{rec}}$ ), ovvero il periodo che intercorre tra l'inizio di un segnale o di una condizione di emergenza ed il momento in cui viene presa la decisione di iniziare il movimento. L'input può essere un annuncio della PA (Public Address system) o per esempio l'avvistamento di un veicolo in fiamme;
- *tempo di risposta* ( $T_{\text{res}}$ ), cioè il tempo in cui ci si prepara all'evacuazione per esempio studiando il comportamento da tenere, informando gli altri utenti, facendo uscire tutti dai propri veicoli e recuperando gli effetti personali;
- *tempo di movimento* ( $T_{\text{mov}}$ ), ovvero il periodo di tempo trascorso in movimento verso un'uscita o un luogo di relativa sicurezza. La velocità di una persona a piedi, in un ambiente senza fumo, varia tra 1,0 e 2,0 m/s. In caso di incidenti o situazioni di emergenza tale velocità potrebbe essere limitata dalla presenza di veicoli, oggetti abbandonati e dalla ridotta visibilità causata dal fumo, come mostrato dalla tabella 5.4.

Condizioni di visibilità	Velocità di allontanamento (m/s)
Buona	1
Ridotta	0,5
Nulla	0,3

Tabella 5.4: velocità di allontanamento in funzione della visibilità.

### 5.8.2.2 Tempo di “pre-movimento”

Il *tempo di pre-movimento* ( $T_{pre}$ ) è il tempo trascorso dopo un allarme o un segnale, ma prima che gli utenti comincino a muoversi verso un uscita o un rifugio. Esso è costituito da due componenti: il *tempo di riconoscimento* ed il *tempo di risposta*. Pertanto si evince che:

$$T_{pre} = T_{rec} + T_{res}$$

Questo periodo temporale generalmente è una componente significativa del tempo totale impiegato nell'evacuazione.

Inoltre è fondamentale considerare che gli occupanti della struttura non necessariamente si muovono contemporaneamente. Quindi il *tempo di pre-movimento* varia in base al luogo in cui si trovano gli utenti, alla crescita dell'incendio, alla vicinanza delle persone rispetto all'incidente ed alla percezione dell'evento di ogni singolo individuo che viene fornita dall'architettura dell'ambiente e dai sistemi di allarme e gestione della galleria.

### 5.8.2.3 Analisi del tempo di “pre-movimento”

Deve essere effettuata una valutazione della probabile estensione dei tempi di riconoscimento e di risposta al fine di determinare il tempo di pre-movimento. Quest'ultimo dipende principalmente dal tipo di sistema di allarme previsto e dalla natura degli occupanti e può essere determinato attraverso l'applicazione del modello sviluppato da Sime (1995).

Tale modello prende in considerazione, oltre ai parametri di progetto, quali la geometria della struttura e le distanze di viaggio, anche altri fattori per valutare la risposta degli utenti.

Il primo e più importante di questi componenti è il sistema di allarme. Gli occupanti della galleria rispondono, in genere, più prontamente ad un sistema di allarme che fornisce loro informazioni relative all'incidente verificatosi. La tabella 5.5 illustra varie categorie di questi sistemi.

<b>Sistemi di allarme</b>	<b>Descrizione</b>
W0	Nessun sistema di allarme
W1	Sistemi di allarme che utilizzano campanelle, sirene o apparecchiature simili
W2	PA (public address system) Sistema vocale pre-registrato con il possibile utilizzo di display
W3	PA + CCTV (closed circuit television) Informazioni "live" tramite sistema vocale

Tabella 5.5: categorie di sistemi di allarme

Il *tempo di riconoscimento* dipende dai seguenti fattori:

- *caratteristiche degli utenti della galleria* (attenzione, capacità sensoriali, mobilità e attività svolte);
- *segnaletica*;
- *identificazione del pericolo* (distanza dall'incidente, densità del traffico, pendenza longitudinale e trasversale della strada).

Mentre il *tempo di risposta* dipende da:

- *tipo di veicolo*;
- *velocità di marcia* (maggiore è la velocità del veicolo e più lungo sarà il tempo necessario per fermarlo);



- *numero di passeggeri trasportati* (i veicoli con più passeggeri richiedono un tempo di svuotamento maggiore).

La valutazione del *tempo di pre-movimento* degli utenti della galleria prevede alcuni passaggi.

Dalla tabella 5.6 è necessario selezionare il valore di riferimento relativo al sistema di allarme del miglior scenario possibile (bps) per poi inserirlo nella seguente formula:

$$T_{pre}(\text{corretto}) = T_{pre}(\text{bps}, W) \cdot W_{eff}$$

Sistema di allarme	Tempo di pre-movimento ( $T_{pre}$ )		
	Miglior scenario possibile (secondi)	Scenario intermedio (secondi)	Peggior scenario (secondi)
W0	<300	420	>720
W1	<180	360	>540
W2	<120	240	>360
W3	<60	120	>180

Tabella 5.6: valori del  $T_{pre}$  relativi ai diversi sistemi di allarme e scenari.

Per calcolare “ $W_{eff}$ ”, il *coefficiente di efficienza di risposta degli utenti*, si applica la seguente espressione:

$$W_{eff} = \frac{5}{\text{Parametri medi relativi al } T_{pre}}$$

Il coefficiente “ $W_{eff}$ ” deriva quindi dalla combinazione di una serie di parametri riferiti al “ $T_{pre}$ ” come illustrato dalla figura 5.17.

Proportion of distance from incident to safety	Recognition time (tres)										Response time (tres)		type b.p.s x Weff (seconds)						
	Occupant characteristics				Wayfinding	Hazard identification					L	M	Sum BAI	Avg BAI	Weff =S/Avg	w0	w1	w2	w3
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K									
1.0	4	4	3	3	2	1	1	5	5	4	3	2	37	3.1	1.6	486	292	195	97
0.8	4	4	3	3	2	2	2	5	5	4	3	2	39	3.3	1.5	462	277	185	92
0.6	4	4	3	3	2	3	3	5	5	4	3	2	41	3.4	1.5	439	265	176	88
0.4	4	4	3	3	2	4	4	5	5	4	3	2	43	3.6	1.4	419	251	167	84
0.2	4	4	3	3	2	5	5	5	5	4	3	2	45	3.8	1.3	400	240	160	80

Figura 5.17: modello di risposta degli utenti della galleria.

In definitiva si può affermare che il tempo di pre-movimento da utilizzare nell'analisi è il valore minore tra i seguenti:

- componente del " $T_{pre}$ " stimato dal modello di risposta degli occupanti del tunnel;
- tempo impiegato dai prodotti dell'incidente, come fumo o prodotti tossici, a raggiungere gli utenti.

#### 5.8.2.4 Valutazione del tempo di movimento

Il *tempo di movimento* è il periodo che gli utenti della galleria trascorrono in movimento diretti verso un'uscita o un luogo di sicurezza. Viene calcolato dividendo la distanza necessaria da percorrere verso un luogo sicuro per la velocità di spostamento degli occupanti stessi definita nei paragrafi precedenti.

In caso di incendio gli utenti che stanno evacuando non utilizzeranno l'uscita di emergenza se le condizioni in prossimità di questa sono pericolose a causa del calore o del fumo. Pertanto, si deve anche tener conto della distanza in corrispondenza della quale il generico occupante percepisce il pericolo in prossimità di tale uscita per poi deviare il suo tragitto.

#### 5.8.2.5 Valutazione delle conseguenze

Utilizzando i parametri relativi all'evacuazione appena definiti è possibile calcolare il tempo che gli utenti della galleria impiegano per passare da un segmento all'altro verso una locazione sicura  $T_{evac}$ .

La dose totale (radiazione termica, tossica, ecc.) ricevuta da ogni occupante, che sta evacuando dal tunnel, si calcola integrando le dosi ricevute in ogni segmento in relazione al tempo impiegato per attraversare il segmento stesso. Il valore stimato può essere, quindi, utilizzato in combinazione con le varie equazioni di *probit* per valutare decessi e lesioni.

La caratterizzazione di uno scenario di esodo può essere sintetizzata come viene mostrato dalla figura 5.18.

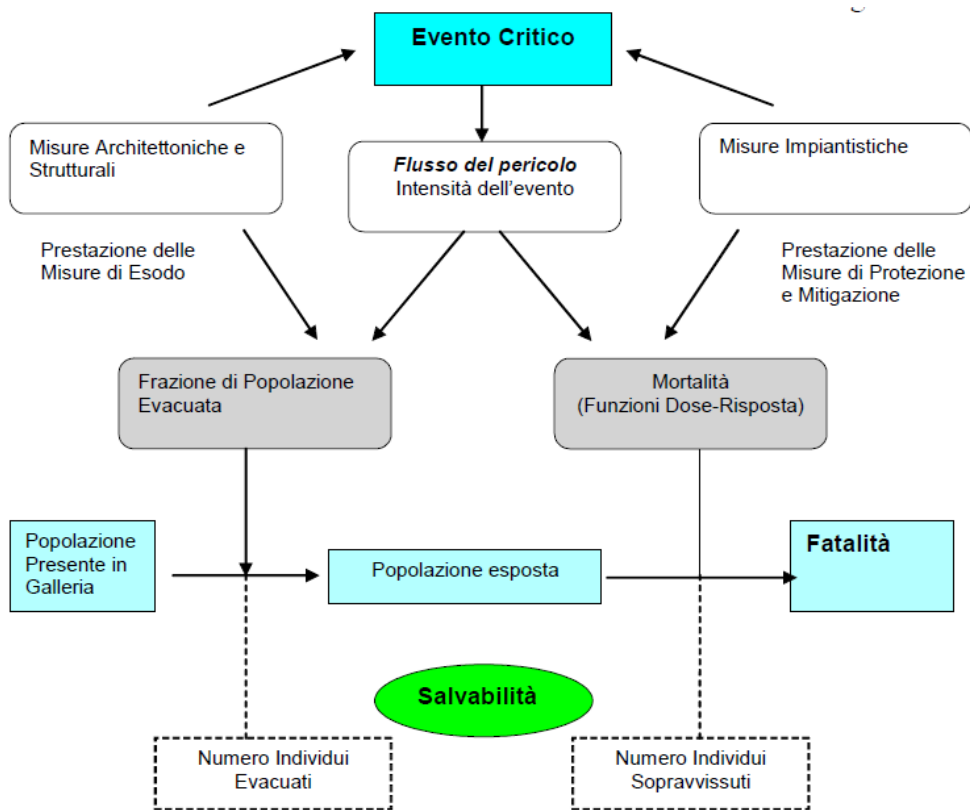


Figura 5.18: scenario di esodo per gli utenti della galleria.

## Capitolo 6

# Il software QRAM

### 6.1 Introduzione

Il trasporto di merci pericolose attraverso gallerie implica rischi particolari per gli utenti, le strutture fisiche, l'ambiente circostante e le persone che risiedono nei pressi del tunnel o lungo la strada. Per questi motivi, come indicato nella normativa europea (Direttiva 2004/54/CE), oltre a misure tecniche ed organizzative volte ad implementare la sicurezza dei tunnel, è richiesta un'analisi di rischio della galleria stessa.

L'analisi del rischio connesso ad una qualsiasi attività si sviluppa attraverso due fasi principali:

- 1) identificazione e quantificazione delle frequenze di accadimento e della magnitudo delle conseguenze di ogni scenario finale ipotizzato;
- 2) ricomposizione quantitativa dell'insieme degli scenari finali, che permette di determinare le misure di rischio complessive.

Il calcolo del rischio, in particolare per quanto riguarda quest'ultima fase, è molto complesso e quindi richiede l'utilizzo di software specifici.

Per soddisfare questa necessità è stato sviluppato il software QRAM "*Quantitative Risk Assessment Model*" (Modello per la Valutazione Quantitativa del Rischio).

Tale software è stato creato da INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Francia) in collaborazione con WS Atkins (U.K) ed IRR (Institute of Risk Research) dell'università di Waterloo (Ontario, Canada), sotto la supervisione di OECD (Organisation for economic Co-operation and Development) e di PIARC (World Road Association) e finanziato in parte da OECD ed in parte dall'Unione Europea.

Sono state sviluppate sei versioni successive, la prima risale all'anno 1997, l'ultima è del 2004 ed è denominata QRAM 3.6.

Il software è avviato come un foglio elettronico di *Microsoft Windows Excel* e si avvale delle librerie di *Visual Basic Application* e di applicativi *Fortran*.

Questo capitolo è dedicato alla descrizione del funzionamento del programma, mettendone in evidenza le principali caratteristiche. Pertanto tutte le informazioni riportate sono state tratte dal manuale del software stesso (INERIS, 2005).

## 6.2 Scopo del software QRAM

Lo scopo del modello QRA è quello di quantificare i rischi dovuti al trasporto di sostanze pericolose su itinerari noti del sistema stradale; il software si caratterizza per il fatto che può svolgere un'analisi del rischio anche per tratti stradali in galleria, per la scelta dell'itinerario più sicuro tra strada aperta e strada passante attraverso un tunnel.

Il software fornisce come risultato finale la valutazione del rischio sociale, espresso tramite curve F/N valutando il rischio per l'uomo ed assumendo come danno di riferimento la morte o il ferimento di un individuo. Inoltre possono essere calcolati i danni ambientali prodotti dall'incidente (con riferimento al sottosuolo, alle acque superficiali e sotterranee ed all'atmosfera) ed i danni economici in seguito a danni ai beni materiali (danni strutturali alla galleria).

Nel calcolo del rischio, per determinati parametri quali la probabilità di accadimento degli scenari finali, i coefficienti dell'equazioni di Probit e la probabilità di presenza delle diverse categorie di popolazione, il software QRAM considera dei valori di default, che possono però essere modificati da un utente esperto attraverso l'applicazione del foglio elettronico denominato *ExpertUserInterface.xls*.

La metodologia di analisi dei rischi implementata nel software è basata su:

- la scelta di un ristretto numero di sostanze pericolose, quali benzina, GPL, ammoniaca, acroleina, cloro e monossido di carbonio e valida solo per modalità di trasporto su strada;
- la scelta di un ristretto numero di scenari incidentali rappresentativi a cui possono portare le merci pericolose selezionate;
- la determinazione degli effetti fisici dello scenario sia per strade all'aperto che per sezioni in galleria;
- la determinazione dei danni di tali scenari sulla popolazione presente sulla strada e su quella residente nelle vicinanze;
- la valutazione della possibilità di fuga e rifugio;
- la determinazione delle frequenze di accadimento associate agli scenari incidentali.

### 6.3 Avvio del programma

Durante l'utilizzo del software l'utente viene guidato all'inserimento di dati di input attraverso diverse finestre di dialogo che appaiono automaticamente; i valori che vengono inseriti ed i risultati forniti per ogni caso definito dall'utente vengono memorizzati all'interno di file *Excel*.

All'avvio del programma si attiva istantaneamente un modello denominato "Sk-DG", basato su un foglio elettronico, che permette il calcolo del rischio nei tratti stradali, considerando una descrizione monodimensionale della popolazione e della rosa dei venti:

- la descrizione monodimensionale della popolazione avviene attraverso un unico valore di densità di popolazione (espresso in persone/km<sup>2</sup>), valido per l'intera area circostante il percorso stradale; tale area viene assunta come avente caratteristiche uniformi in tutta la sua estensione;
- la descrizione monodimensionale della rosa dei venti implica di dover considerare una distribuzione del vento uniforme in tutte le direzioni.

Mediante l'applicazione del modulo "Risk-DG" (abbreviato in "Rk-DG"), basato su un programma Fortran, il software QRAM prevede anche la

possibilità di effettuare i calcoli del rischio prendendo in considerazione una descrizione bidimensionale della popolazione e della rosa dei venti:

- la descrizione bidimensionale della popolazione avviene attraverso la definizione del numero medio di persone presenti in ogni cella di una griglia avente due dimensioni;
- la descrizione bidimensionale della rosa dei venti consente di considerare una diversa distribuzione del vento nelle varie direzioni.

Nel caso in cui l'utente scelga di applicare il modulo "Rk-DG", questo viene avviato automaticamente attraverso una finestra di comando DOS.

Durante la sua esecuzione, il modulo "Rk-DG" non richiede l'inserimento di alcun dato da tastiera, in quanto tutte le informazioni necessarie vengono automaticamente importate da "Sk-DG". Terminata l'elaborazione, i risultati prodotti da "Rk-DG" sono importati nel modulo "Sk-DG", che effettua il calcolo del rischio e procede con la presentazione dei risultati.

Per evidenziare le diverse funzioni dei moduli "Sk-DG" e "Rk-DG", in figura 6.1 viene riportato lo schema logico dei flussi delle operazioni che avvengono nell'ambito della creazione di un nuovo file.

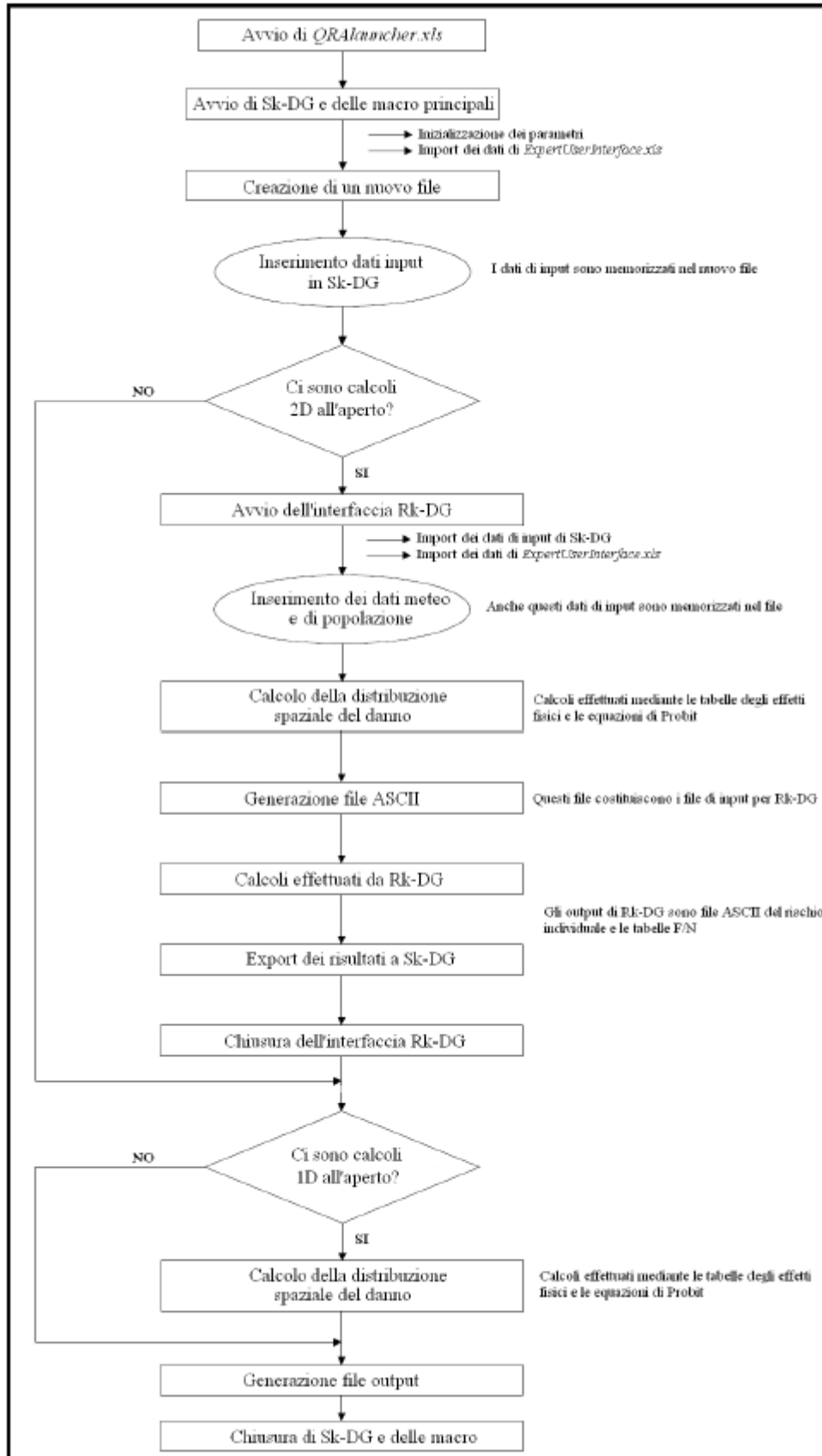


Figura 6.1: successione delle operazioni nella creazione di un nuovo file.



La scelta di applicare il modulo “Rk-DG” viene effettuata dall’utente per ogni tratta stradale considerata, in particolare:

- l’utente deve prima indicare l’intenzione di utilizzare il modulo “Rk-DG” per uno o più tratti della strada, nella stessa finestra di dialogo in cui si selezionano gli scenari incidentali da considerare;
- l’utente, successivamente, specifica l’intenzione di applicare tale modulo per il percorso stradale considerato nella finestra di dialogo dedicata alla definizione delle caratteristiche della tratta in esame.

Nelle figure 6.2 e 6.3 si riportano gli esempi delle due finestre di dialogo sopraindicate, nelle quali sono state evidenziate le celle in cui l’utente seleziona l’applicazione del modulo “Rk-DG”.

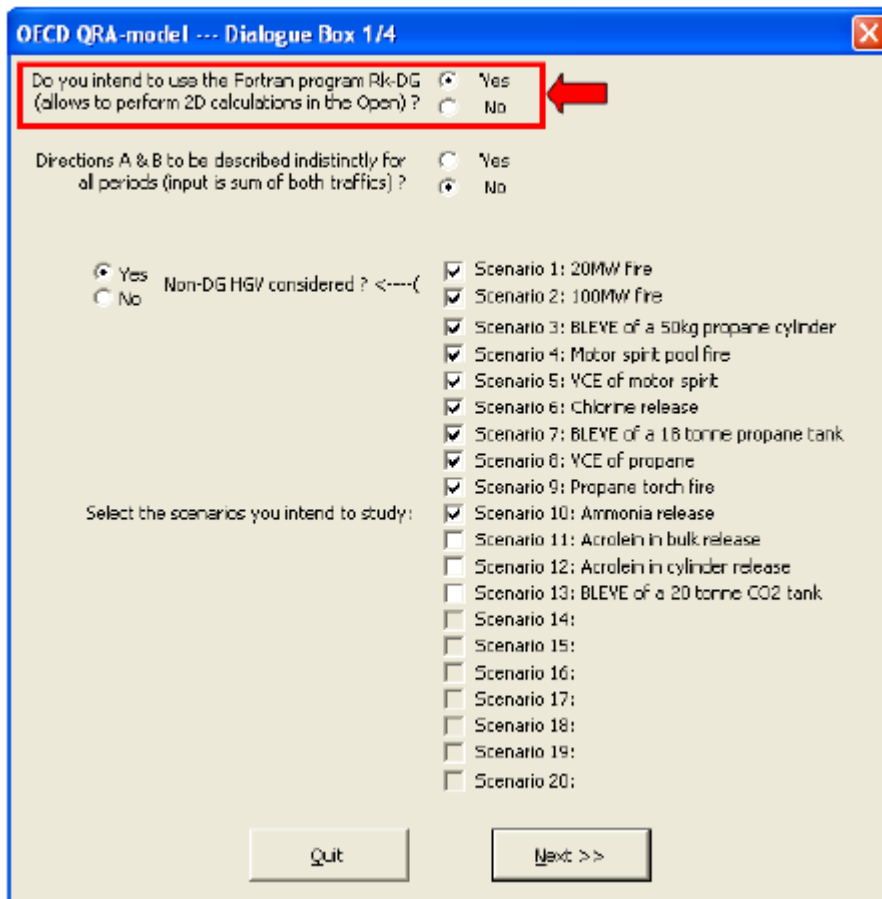


Figura 6.2: esempio di selezione del modulo “Rk-DG” nella finestra di dialogo di selezione degli scenari incidentali.

OECD QRA-model --- Dialogue Box 4/4

**Enter the characteristics of section 1/1 for period NORMAL and direction A**

General Data | Traffic and Local Population Data | Accident rates

Is This section a tunnel?  Yes  No

Do you intend to use Rk-DG on this section?  Yes  No

Coordinates of origin of this section:

Abscissa - X axis - (m): 0  
Ordinate - Y axis - (m): 2000

Coordinates of destination of this section:

Abscissa - X axis - (m): 4000  
Ordinate - Y axis - (m): 2000

Total length of this section (m): 4000

**CAUTION: You are not obliged to enter a length here. In that case, the entry of the co-ordinates of the section will automatically lead to calculate a length equivalent to a straight line between origin and destination of this section. However, if you use SK-DG for this section, you are allowed to enter a length section greater than the one corresponding to a straight line.**

Quit << Previous 3 leaflets & then ... Next >>

Figura 6.3: esempio di selezione del modulo “Rk-DG” nella finestra di dialogo di caratterizzazione della tratta stradale in esame.

## 6.4 Sostanze pericolose considerate dal software

### 6.4.1 Tipologie di sostanze pericolose

Il software QRAM considera un numero limitato di sostanze pericolose, ovvero:

- acroleina o aldeide acrilica (liquidi infiammabili);
- ammoniaca (gas corrosivi);
- anidride carbonica (gas inerti);
- benzina (liquidi infiammabili);
- cloro (gas tossici e/o corrosivi, ossidanti);
- GPL (gas infiammabili).

L'utente definisce univocamente le sostanze pericolose da considerare nel calcolo del rischio a seguito della selezione degli scenari incidentali nella finestra di dialogo denominata "Dialogue box 1/4". Questa finestra è stata riportata in figura 6.4, nella quale sono stati evidenziati tutti gli scenari incidentali previsti per la sostanza benzina (in inglese "motor spirit").

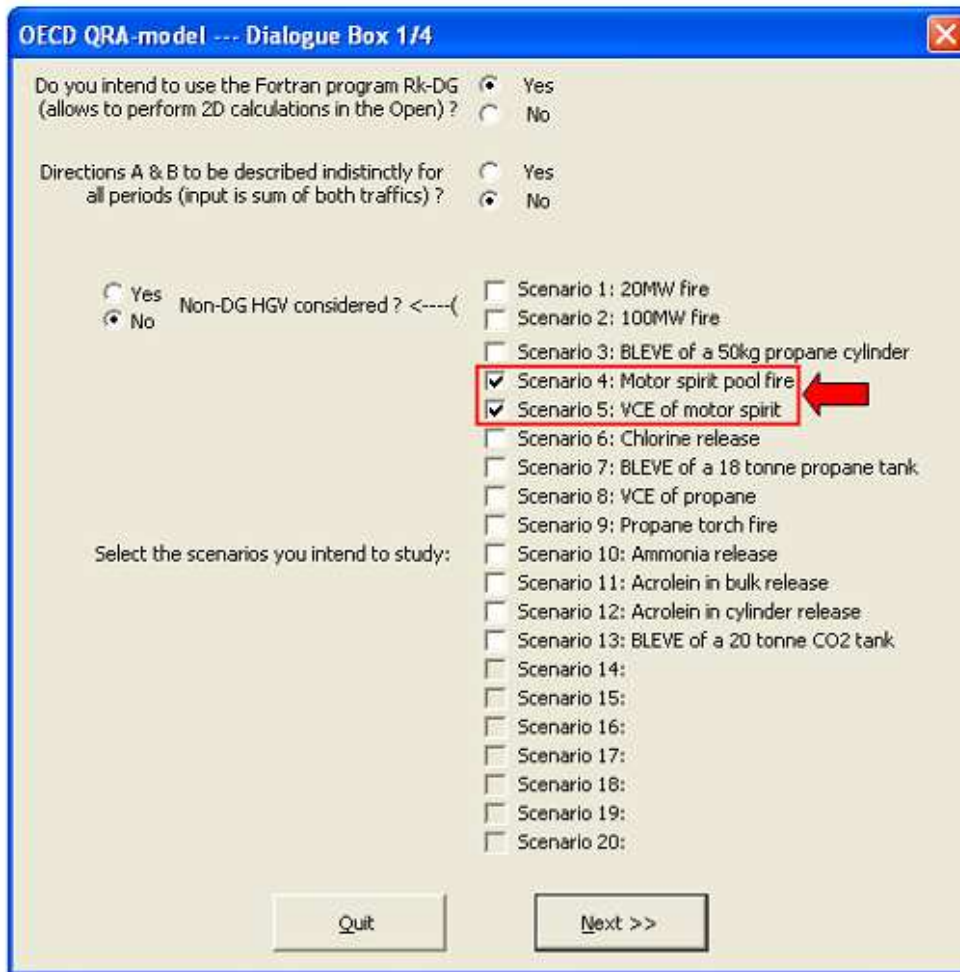


Figura 6.4: esempio di definizione delle sostanze pericolose.

Come si può evincere dalla figura 6.4, oltre alle sostanze pericolose il software può considerare anche le merci generiche, denominate "Non-DG" (abbreviazione di "Non Dangerous Goods").

La necessità di considerare anche le merci generiche nell'analisi di rischio nasce dal fatto che anche queste merci in particolari condizioni, come ad esempio in galleria, possono dar luogo ad incidenti rilevanti. Nella maggior

parte degli studi di rischio, tuttavia, tale tipologia di merce è trascurata nei tratti stradali privi di gallerie.

Nella tabella 6.1 si riassumono le sostanze pericolose considerate nel software evidenziando per ciascuna di esse il numero ONU e la classe di rischio definita dalla guida ERG 2004.

<b>Sostanza pericolosa</b>	<b>Numero ONU</b>	<b>Classe di rischio ERG 2004</b>
<i>Acroleina</i>	1092	131/Liquidi infiammabili tossici
<i>Ammoniaca</i>	1005	125/Gas-corrosivi
<i>Anidride carbonica</i>	2187	120/Gas inerti (compresi liquidi refrigerati)
<i>Benzina</i>	1203	128/Liquidi infiammabili(non polari/non miscibili in acqua)
<i>Cloro</i>	1017	124/Gas-Tossici e/o corrosivi-ossidanti
<i>GPL</i>	1075	115/Gas infiammabili (compresi liquidi refrigerati)
<i>Merce generica</i>	—	—

Tabella 6.1: sostanze pericolose considerate dal QRAM.

#### 6.4.2 Tipologie di mezzo di contenimento

Le merci pericolose possono essere trasportate secondo due modalità:

- in piccoli contenitori denominati “*cylinder*” o bombole;
- nelle autobotti, ovvero alla “rinfusa” o in “*bulk*”.

Generalmente nell’ambito dell’analisi di rischio si considera esclusivamente il trasporto in autobotti, in quanto essendo il quantitativo di sostanza stoccato in un autobotte significativamente maggiore rispetto quello presente in un *cylinder*, si ritengono trascurabili gli scenari incidentali connessi a quest’ultima tipologia di mezzo di contenimento.

Nella tabella 6.2 si riportano le caratteristiche dei mezzi di contenimento definiti nel software, in riferimento a tutte le sostanze pericolose considerate.

<b>Sostanza pericolosa</b>	<b>Tipologia di mezzo di contenimento</b>	<b>Capacità massica o volumica</b>
Acroleina	Autobotte	25 t
	Cylinders	100 l
Ammoniaca	Autobotte	20 t
Anidride carbonica	Autobotte	20 t
Benzina	Autobotte	28 t
Cloro	Autobotte	20 t
GPL	Autobotte	18 t
	Cylinders	50 kg

Tabella 6.2: caratteristiche dei mezzi di contenimento.

### 6.4.3 Flussi delle sostanze pericolose

Nel software QRAM i flussi delle sostanze pericolose lungo una strada vengono definiti attraverso:

- il traffico di veicoli trasportanti merci pericolose (definito come il numero di veicoli circolanti in un determinato tratto stradale nell'unità di tempo) espresso in veicoli/h;
- per ogni merce pericolosa la frazione dei veicoli trasportanti quella particolare merce rispetto al totale dei veicoli trasportanti merci pericolose, indicata con  $DG_i/DG$ ; a tale frazione possono essere assegnati i valori di default suggeriti dal software in funzione della nazione cui appartiene la strada in esame (nello specifico Francia, Canada o Norvegia), oppure dei valori definiti da tastiera dall'utente.

Nella tabella 6.3 si riportano i valori di  $DG_i/DG$  proposti come default dal software.

<b>Valori di DG<sub>i</sub>/DG</b>			
<b>Tipologia di sostanza pericolosa</b>	<b>Valori di default proposti dal software QRAM 3.6</b>		
	<b>Francia</b>	<b>Norvegia</b>	<b>Canada</b>
Cloro	0,000	0,000	0,000
Gas inerti liquefatti	0,013	0,000	0,008
Gas tossici	0,015	0,013	0,039
GPL in autobotte	0,024	0,023	0,015
GPL in cylinders	0,008	0,002	0,005
Liquidi infiammabili	0,363	0,352	0,301
Liquidi tossici in autobotte	0,002	0,000	0,015
Liquidi tossici in cylinders	0,002	0,000	0,015
Altre merci pericolose	0,573	0,610	0,602
<b>TOTALE</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>

Tabella 6.3: valori di default di DG<sub>i</sub>/DG .

In figura 6.5, invece, si riportano a titolo di esempio le finestre di dialogo impiegate per la definizione dei flussi delle sostanze pericolose nel QRAM, nel caso in cui l'utente scelga di inserire da tastiera il valore di DG<sub>i</sub>/DG .

**OECD QRA-model --- Dialogue Box 3/4**

**Constant route characteristics for period: NORMAL and direction A**

Short route description:

Route name:

Enter the time ratio for period: NORMAL and direction A:

Average number of people in a light vehicle:

Average number of people in a HGV:

Average number of people in a BUS/Coach:

DG-HGV traffic (veh/h):

Proportion of each DG type in the DG traffic:

- Custom
- Canadian default values
- French default values
- Norwegian default values

Buttons: Quit, << Previous, Next >>

---

**User defined DGI/DG traffic - Form 1/1**

**Enter the proportion (ratio) of each DG type in the whole DG traffic for the current period**

Flammable liquids in bulk (Motor spirit, diesel oil,...):

Fraction of flammable liquids that can potentially lead to a VCE (includes motor spirit but excludes diesel oil):

Propane (Flammable liquefied gases) in cylinders:

Propane (Flammable liquefied gases) in bulk:

Chlorine (Rather severe toxic gases) in bulk:

Ammonia (Toxic gases) in bulk:

Figura 6.5: esempio di definizione dei flussi delle sostanze pericolose.

#### 6.4.4 Caratterizzazione dei rilasci

Nell'analisi del rischio i possibili rilasci sono schematizzati tramite un numero finito di categorie, generalmente in numero pari a 2 o 3.

Per ogni categoria di rilascio è necessario:

- stabilire se il rilascio è continuo o istantaneo;
- assegnare una massa rilasciata ai rilasci istantanei o un diametro equivalente del foro e quindi una portata ai rilasci continui;
- definire una probabilità di accadimento della categoria.

Il software QRAM considera un numero limitato di categorie di rottura, differenti per le diverse sostanze pericolose, ed univocamente connesse a specifici scenari incidentali.

Nella tabella 6.4 si riportano i dati relativi alle categorie di rottura considerate nel programma, facendo riferimento solamente al trasporto in autobotte. Tuttavia è necessario osservare che è utile definire per uno stesso evento incidentale categorie di rottura diverse (vedi GPL) solo se ad esse sono associati scenari finali caratterizzati da effetti di differente gravità.

	<b>Sostanza pericolosa</b>	<b>Dimensione del foro di rilascio (mm)</b>	<b>Portata di rilascio (kg/s)</b>
<b><i>Rilascio continuo da foro</i></b>	Acroleina	100	24,8
	Ammoniaca	50	36,0
	Benzina	100	20,6
	Cloro	50	45,0
	GPL	50	36,0
<b><i>Rilascio per rottura catastrofica</i></b>	<b>Sostanza pericolosa</b>	<b>Massa rilasciata (t)</b>	
	Anidride carbonica	20	
	GPL	18	

Tabella 6.4: categorie di rottura.

Nel software QRAM la probabilità di ogni categoria di rottura non viene definita direttamente dall'utente che utilizza il programma, ma compare nella probabilità dello scenario finale che è costituita da valori di default modificabili da parte dell'utente esperto.



## 6.5 Scenari incidentali

Il software considera 13 scenari incidentali che sono sintetizzati nella tabella 6.5.

Nr.	Sostanza	Evento Incidentale	Capacità del mezzo di contenimento	Dimensioni del foro di rilascio	Portata di rilascio (kg/s)
1	Veicolo pesante che trasporta merci non pericolose	Incendio di potenza pari a 20 MW	-	-	-
2	Veicolo pesante che trasporta merci non pericolose	Incendio di potenza pari a 100 MW	-	-	-
3	GPL trasportato in "cylinder"	BLEVE	50 kg	-	-
4	Benzina	Pool fire	28t	100 mm	20,6
5	Benzina	VCE	28 t	100 mm	20,6
6	Cloro	Rilascio (nube tossica)	20 t	50 mm	45
7	GPL trasportato in "bulk"	BLEVE (fireball)	18 t	-	-
8	GPL trasportato in "bulk"	VCE	18 t	50 mm	36
9	GPL trasportato in "bulk"	Jet fire	18 t	50 mm	36
10	GPL trasportato in "bulk"	Rilascio (nube tossica)	20 t	50 mm	36
11	Acroleina trasportata in "bulk"	Rilascio (nube tossica)	25 t	100 mm	24,8
12	Acroleina trasportata in "cylinder"	Rilascio (nube tossica)	100 litri	4 mm	0,02
13	Anidride carbonica trasportata come gas liquefatto in pressione	BLEVE	20 t	-	-

Tabella 6.5: scenari incidentali considerati nel software QRAM.

Dalla tabella 6.5 emerge che il software QRAM, oltre agli scenari finali originati dal rilascio delle 6 sostanze pericolose considerate, tiene conto anche degli scenari finali originati da veicoli pesanti trasportanti merci non pericolose, ovvero incendi di diversa potenza termica. Tuttavia, tali scenari finali si considerano rilevanti ai fini del calcolo del rischio qualora si verificano in galleria, mentre vengono solitamente trascurati nei tratti stradali all'aperto.

E' necessario osservare che l'evento incidentale BLEVE è da considerarsi come:

- un'esplosione fisica, il BLEVE propriamente detto, per la sostanza pericolosa anidride carbonica;
- la successione di un' esplosione fisica, il BLEVE, e di un incendio, la "firewall", per la sostanza pericolosa GPL.

Nel caso della sostanza pericolosa GPL, per la quale al BLEVE segue la *fireball*, poiché gli effetti termici di quest'ultima sono di maggiore gravità rispetto agli effetti di sovrappressione del BLEVE, il software trascura gli effetti di sovrappressione del BLEVE, coerentemente a quanto è effettuato dalla maggioranza degli studi di rischio.

Inoltre è necessario osservare che il software assume che una nube infiammabile (nello specifico di benzina o GPL) innescata possa dare luogo ad un evento incidentale di tipo VCE e mai di tipo flash fire; tale assunzione è in contrasto con quanto suggerito dal "Purple Book" del TNO, nel quale si assume che una nube infiammabile innescata possa dare luogo ad un evento incidentale di tipo flash fire e mai di tipo VCE.

Per di più, il software QRAM ipotizza che la nube infiammabile originata dall'evaporazione di una pozza di liquido infiammabile (nello specifico di benzina), in caso di innesco, possa dare luogo ad un evento incidentale del tipo "pool fire" o del tipo VCE; anche tale teoria è in contrasto con quanto suggerito dal "Purple Book" del TNO, nel quale si assume che una nube infiammabile originata dall'evaporazione di una pozza di liquido infiammabile abbia dimensioni trascurabili e che quindi, se innescata, possa dare luogo esclusivamente ad un evento incidentale di tipo *pool fire* e mai di tipo VCE.

In figura 6.6 viene riportato un esempio della finestra di dialogo attraverso la quale l'utente seleziona gli scenari finali nel software QRAM. Si può notare che sono presenti 20 scenari; quelli finali previsti di default sono i primi 13, mentre quelli indicati con i numeri compresi dal 14 al 20 sono scenari che potranno essere implementati in future edizioni del software.

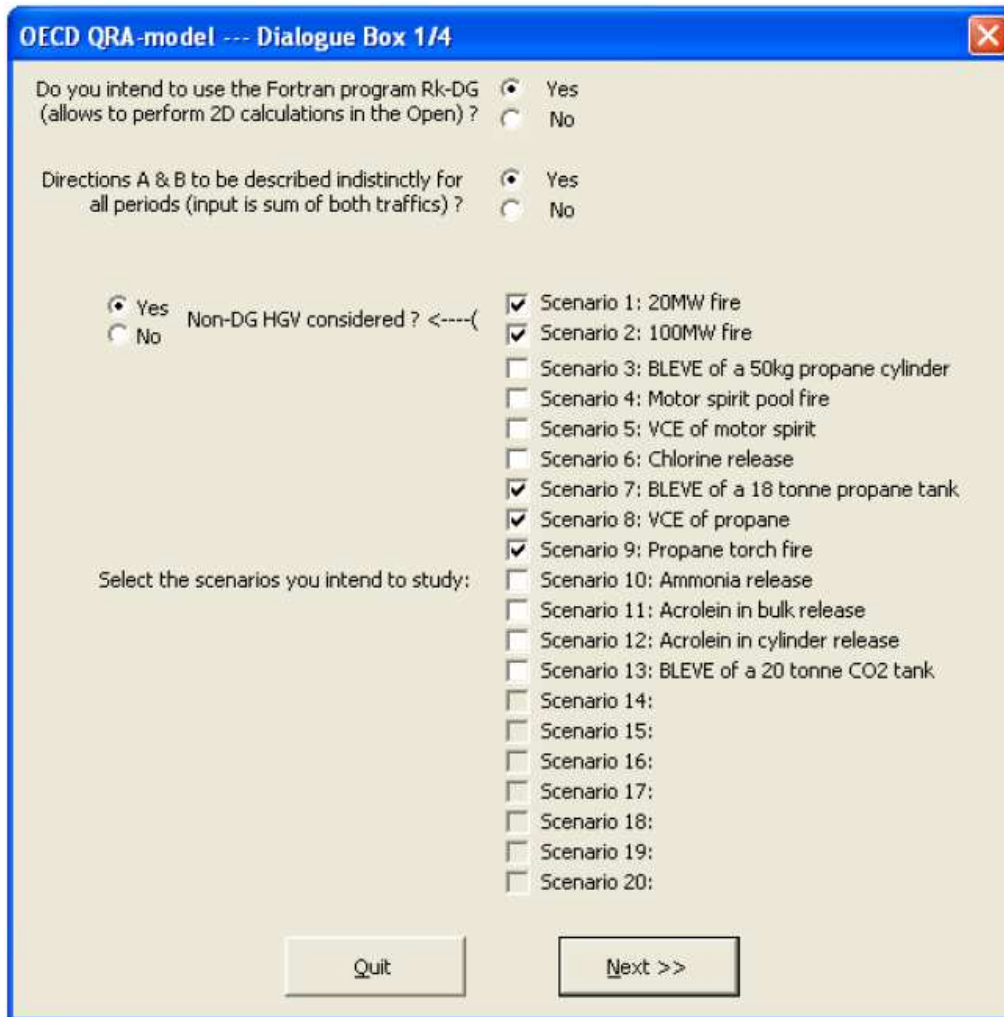


Figura 6.6: esempio di definizione degli scenari incidentali.

Nel software QRAM la probabilità di ogni scenario finale è definita di default, ma modificabile dall'utente esperto nel file *ExpertUserInterface.xls*.

Nella figura 6.7 viene rappresentato il foglio di tale file attraverso il quale l'utente definisce i valori di probabilità degli scenari incidentali. Nell'esempio

specifico i valori riportati corrispondono a quelli di default previsti dal software.

Dalla figura emerge che, esclusa qualche eccezione (scenari 8 e 9), i valori di default della probabilità variano con la tipologia dell'area di impatto, ovvero *area urbana* ed *area rurale* ed in particolare risultano maggiori per quelle rurali.

Probabilities to get the selected scenario once an accident has occurred					
Scen #	Related probability for Urban and Open areas	Related probability for Rural and Open areas	Related probability for Urban and Tunnel areas	Related probability for Rural and Tunnel areas	Scenario description
1	0.0275	0.0275	0.0042	0.0042	HGV fire 20 MW
2	0.0056	0.0056	0.0009	0.0009	HGV fire 100 MW
3	0.0004	0.0008	0.0017	0.0051	BLEVE of a 50kg LPG cylinder
4	0.0027	0.0045	0.0028	0.0196	Motor spirit pool fire
5	0.0003	0.0005	0.0003	0.0020	VCE of motor spirit
6	0.0311	0.0543	0.0003	0.0543	Chlorine release from a 20 tons tank
7	0.0002	0.0004	0.0003	0.0020	BLEVE of an 18 tons LPG tank
8	0.0002	0.0004	0.0028	0.0020	VCE from an 18 tons LPG tank
9	0.0023	0.0042	0.0311	0.0196	Torch fire from an 18 tons LPG tank
10	0.0311	0.0543	0.0256	0.0543	Ammonia release from an 18 tons tank
11	0.0256	0.0488	0.0066	0.0488	Acrolein release from a 25 tons tank
12	0.0066	0.0135	0.0003	0.0135	Acrolein release from a 100 l cylinder
13	0.0002	0.0004	0.0003	0.0020	BLEVE of a 20 ton liquefied CO2 tank

Figura 6.7: valori di default di probabilità degli scenari incidentali.

L'utente definisce direttamente il valore della probabilità dello scenario finale o *final outcome* ( $P_{out}$ ); in realtà però quest'ultimo è funzione della probabilità che si verifichi un rilascio a seguito di un incidente ( $P_{rel}$ ), della probabilità che tale rilascio appartenga ad una specifica categoria di rottura ( $P_{cat}$ ) e della probabilità che in seguito al rilascio si verifichi un determinato evento incidentale ( $P_{evento}$ ).

### 6.5.1 Probabilità di accadimento degli scenari incidentali

Nel manuale si afferma che la probabilità di accadimento di ogni scenario viene valutata attraverso un'adeguata analisi ad albero degli eventi.

Si tratta di uno strumento che consente di rappresentare le varie possibili sequenze di propagazione o di arresto dello scenario critico a partire da un evento iniziatore, e che è già stato descritto in maniera accurata nel capitolo 4.

In realtà è necessario fare molta attenzione poiché il manuale del software QRAM propone una serie di alberi delle cause, definendoli erroneamente “*event tree*”, non modificabili dall'utente. Inoltre non vengono specificate né le modalità con cui viene creato l'albero, né il valore e le formulazioni per il calcolo delle probabilità di accadimento dei vari rami.

#### 6.5.1.1 Scenario 1: incendio di un mezzo pesante con potenza pari a 100 MW

Lo scenario 1 fa riferimento all'incendio di un mezzo pesante che trasporta merci non pericolose; tale incendio è di potenza pari a 100 MW.

Il software valuta la probabilità di accadimento di questo scenario applicando l'“*event tree*” rappresentato in figura 6.8.

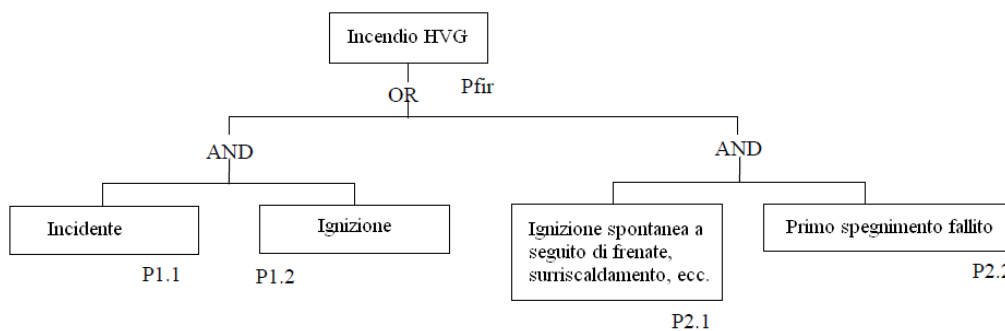


Figura 6.8: “*event tree*” per incendio HVG.

Come si può notare dalla figura, uno degli eventi di base dell'albero è l'ignizione che si verifica in caso di un incidente; questa può coinvolgere il veicolo pesante che si incendierà, oppure un altro veicolo danneggiato posto vicino all'HVG stesso.

Come mostrato nell' "event tree", la probabilità associata ad un incendio di un HVG si può calcolare nel modo seguente:

$$P_{\text{fir}} = P_1 + P_2 = (P_{1.1} \cdot P_{1.2}) + (P_{2.1} \cdot P_{2.2})$$

I pericoli associati a questo scenario, quando si presenta in galleria, sono dati dall'irraggiamento e dalla tossicità dei fumi prodotti. Il software considera un mezzo pesante di dimensioni di  $2,5 \times 10$  m, essendo 2,5 m la larghezza del mezzo e 10 m la sua lunghezza. L'incendio si sviluppa nel tempo, e ciò è implementato nel software considerando per i primi 180 secondi dall'incidente l'assenza di fiamme, che si sviluppano poi istantaneamente con potenza pari a 100 MW.

#### **6.5.1.2 Scenario 2: Incendio di un mezzo pesante con potenza pari a 20 MW**

Lo scenario fa riferimento ad un incendio, con potenza di 20 MW, di un mezzo pesante che trasporta merci pericolose.

L'"event tree" è uguale a quello che viene applicato per il primo scenario, in quanto quello che cambia è solo l'intensità dell'incendio generato, vedi figura 6.8.

Anche in questo caso i pericoli associati a tale scenario, quando si presenta in galleria, sono dati dall'irraggiamento e dai fumi prodotti.

#### **6.5.1.3 Scenario 3: BLEVE di GPL trasportato all'interno di un "cylinder"**

Il terzo scenario considerato fa riferimento al BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) di GPL, ovvero l'esplosione di un contenitore con al suo interno GPL liquefatto.

Il calcolo della probabilità di accadimento di tale scenario viene eseguito prendendo in considerazione l'"event tree" illustrato in figura 6.9.

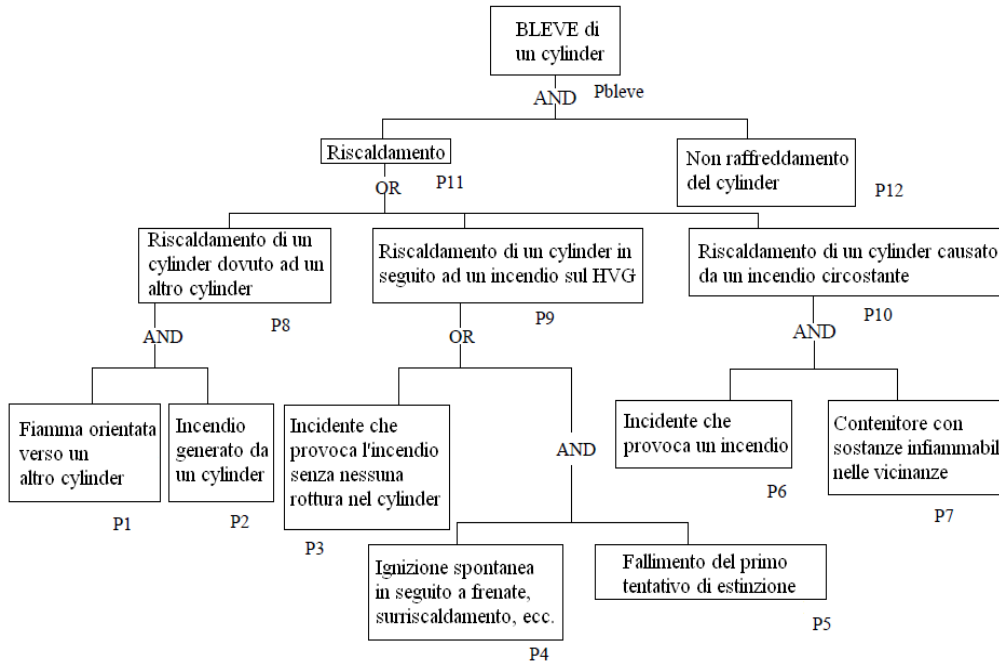


Figura 6.9: “event tree” per BLEVE di GPL trasportato in un “cylinder”.

Le relazioni che vengono utilizzate per calcolare la probabilità che si verifichi questo fenomeno sono le seguenti:

$$P_{BLEVE} = P_{11} \cdot P_{12}$$

Dove:

$$P_{11} = P_8 + P_9 + P_{10}$$

$$P_8 = P_1 \cdot P_2$$

$$P_9 = P_3 + (P_4 \cdot P_5)$$

$$P_{10} = P_6 \cdot P_7$$

Pertanto si ottiene:

$$P_{11} = (P_1 \cdot P_2) + [P_3 + (P_4 \cdot P_5)] + (P_6 \cdot P_7)$$

Quindi la probabilità di accadimento del fenomeno BLEVE sarà pari a:

$$P_{BLEVE} = P_{12} \cdot \{(P_1 \cdot P_2) + [P_3 + (P_4 \cdot P_5)] + (P_6 \cdot P_7)\}$$

Durante il meeting del 4 febbraio 1998 a Leatherhead gli esperti arrivarono alla conclusione che BLEVE simultanei, o lunghe sequenze di tali fenomeni successivi, sono molto improbabili; perciò si presume che la massa di GPL da considerare per questo scenario sia quella di un solo cilindro, quindi 50 kg.

Si hanno danni dovuti all'irraggiamento ed alla sovrappressione conseguenti il BLEVE. Il software, per quanto riguarda lo scenario in galleria, calcola come prima cosa le dimensioni della sfera di fuoco che si forma a seguito dell'esplosione.

#### 6.5.1.4 Scenario 4: incendio di una pozza liquida di carburante

L'“event tree” costruito per valutare la probabilità di accadimento di tale scenario è il seguente, riportato in figura 6.10.

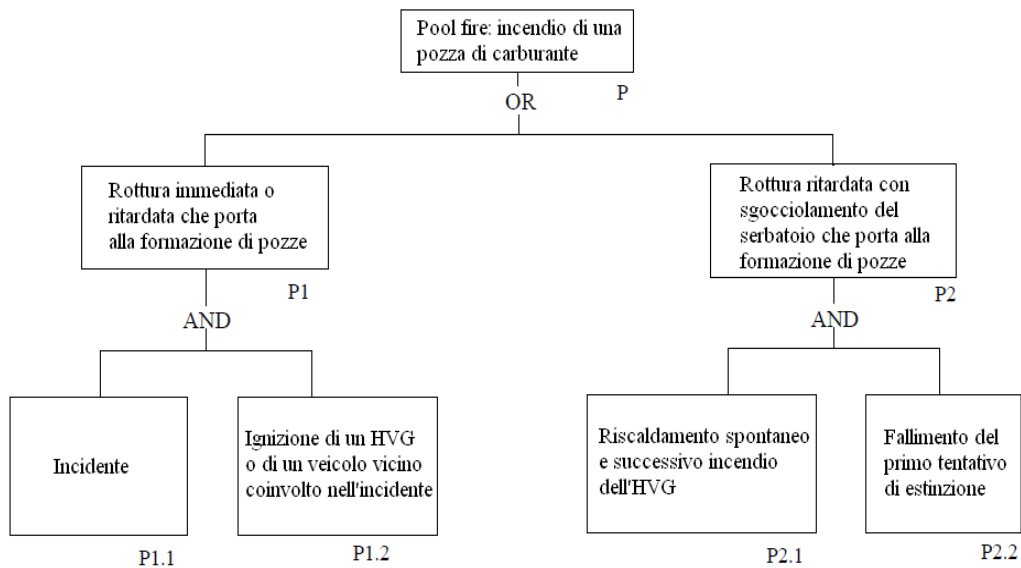


Figura 6.10: “event tree” per incendio di una pozza di carburante.

Pertanto è possibile calcolare la probabilità che si verifichi questo evento incidentale come:

$$P = P_1 \cdot P_2 = (P_{1.1} \cdot P_{1.2}) + (P_{2.1} \cdot P_{2.2})$$



L'incendio di una pozza di carburante, in galleria, ha come conseguenze l'irraggiamento e la tossicità dei fumi prodotti.

Il software calcola dapprima la quantità di carburante che viene rilasciata, con flusso di massa di sostanza infiammabile che fuoriesce dalla cisterna, e successivamente la potenza termica prodotta dall'incendio della pozza.

Anche per questo scenario le fiamme si sviluppano nel tempo. Il software assume che siano nulle per i primi tre minuti e che il fuoco si sviluppi completamente dopo 180 secondi.

#### **6.5.1.5 Scenario 5: esplosione di una nube di carburante (VCE)**

Lo scenario numero 5 rappresenta un VCE, ovvero l'esplosione di una nube di vapori, che genera come conseguenze irraggiamento e sovrappressione.

Per tale scenario l'“*event tree*” riportato nel manuale del software è rappresentato nella figura seguente (6.11).

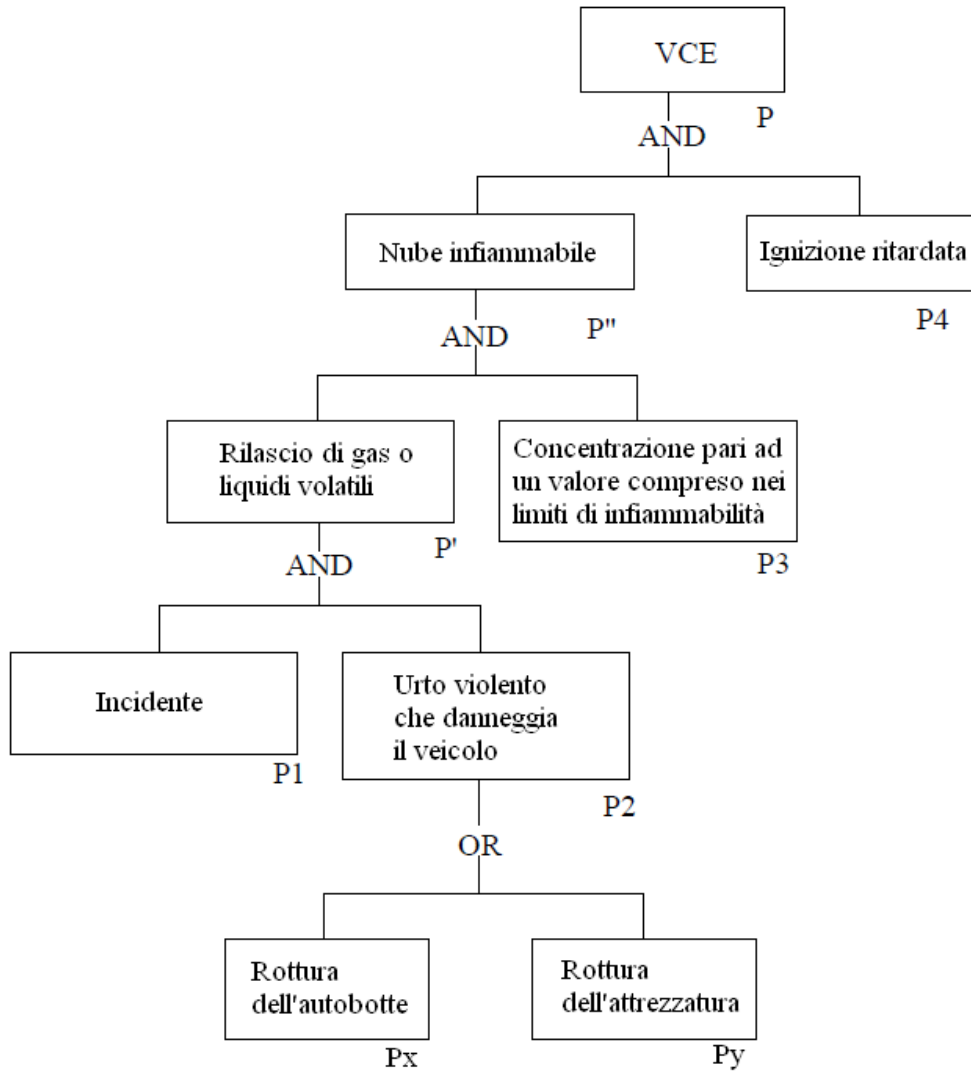


Figura 6.11: “event tree” per l’esplosione di una nube di carburante (VCE).

La probabilità legata a questo scenario può essere valutata come segue:

$$P = P'' \cdot P_4$$

Mentre le probabilità degli eventi di base valgono:

$$P'' = P' \cdot P_3$$

$$P' = P_1 \cdot P_2$$

$$P_2 = P_x + P_y$$

Pertanto il valore di “P” si può calcolare come:

$$P = P_1 \cdot (P_x + P_y) \cdot P_3 \cdot P_4$$

Il software QRAM calcola dapprima la quantità di sostanza che forma la nube, quindi gli effetti termici prodotti dall'esplosione di questa. Infine, attraverso il calcolo della massa di TNT equivalente, l'effetto della sovrappressione generata dall'esplosione.

### 6.5.1.6 Scenario 6: rilascio di Cloro

Lo scenario 6 è associato al rilascio di cloro, sostanza gassosa a temperatura ambiente, il cui pericolo è dato dalla tossicità della nube che si forma a seguito del rilascio.

L'“event tree” correlato a questo scenario è quello illustrato nella figura 6.12.

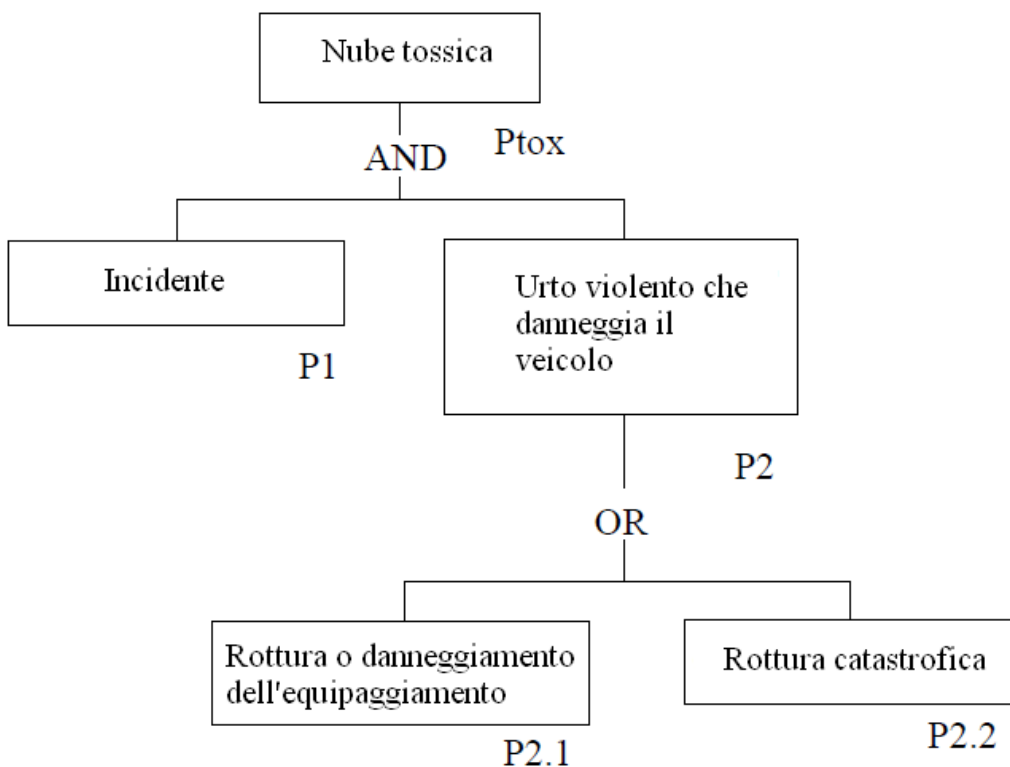


Figura 6.12: “event tree” per il rilascio di cloro.

Come mostrato dalla figura 6.12, la probabilità associata alla formazione di una nube tossica può essere espressa attraverso la seguente relazione:

$$P_{\text{tox}} = P_1 \cdot P_2 = P_1 \cdot (P_{2.1} + P_{2.2})$$

Gli studiosi suggeriscono di considerare un solo scenario: quello che prevede una liberazione continua attraverso una rottura di 50 mm di diametro. A priori è lecito considerare che un rilascio continuo sia molto più probabile di uno istantaneo. Inoltre, da diverse analisi emerge che una liberazione istantanea non sempre conduce alle peggiori conseguenze in termini di fatalità.

I risultati di un confronto tra un rilascio continuo, attraverso un foro di 50 mm di diametro, ed uno istantaneo sono riportati nella tabella 6.6, tratta dal manuale del programma; le lettere presenti nella terza colonna dalla A alla F indicano la classe di stabilità, secondo Pasquill-Gifford, mentre il valore numerico rappresenta la velocità del vento in m/s.

Name of the scenario :

1	20t Chlorine release through a 50 mm diameter breach
2	20t Chlorine instantaneous release

% of lethality	Associated Probit	Meteo	Distance (m) of effect for scenario:	
			1	2
1%	2.7	(A;1.5)	1100	720
		(F;1.5)	2290	1600
		(A;3)	550	710
		(D;3)	1330	1180
		(F;3)	1750	1530
		(C;6)	800	1260
		(D;10)	830	1400
10%	3.7	(A;1.5)	1000	640
		(F;1.5)	1750	1030
		(A;3)	425	490
		(D;3)	950	820
		(F;3)	1250	1070
		(C;6)	600	815
		(D;10)	600	900
50%	5.0	(A;1.5)	900	410
		(F;1.5)	1050	410
		(A;3)	325	380
		(D;3)	640	520
		(F;3)	800	605
		(C;6)	425	510
		(D;10)	400	510

Tabella 6.6: confronto tra rilascio continuo ed istantaneo.

Il software calcola la massa di sostanza che viene rilasciata a seguito dell'incidente e da questa le dimensioni della nube, quindi la concentrazione di cloro all'interno di essa. Si può notare che la concentrazione viene considerata uniforme in ogni punto della nube.

**6.5.1.7 Scenario 7: BLEVE di GPL trasportato all'interno di un'autobotte**

Lo scenario 7 fa riferimento al BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) di GPL, ovvero l'esplosione di un contenitore al cui interno è presente GPL liquefatto in grandi quantità.

L'“event tree” rappresentato in figura 6.13 si discosta poco rispetto a quello riportato nel manuale per lo scenario 3.

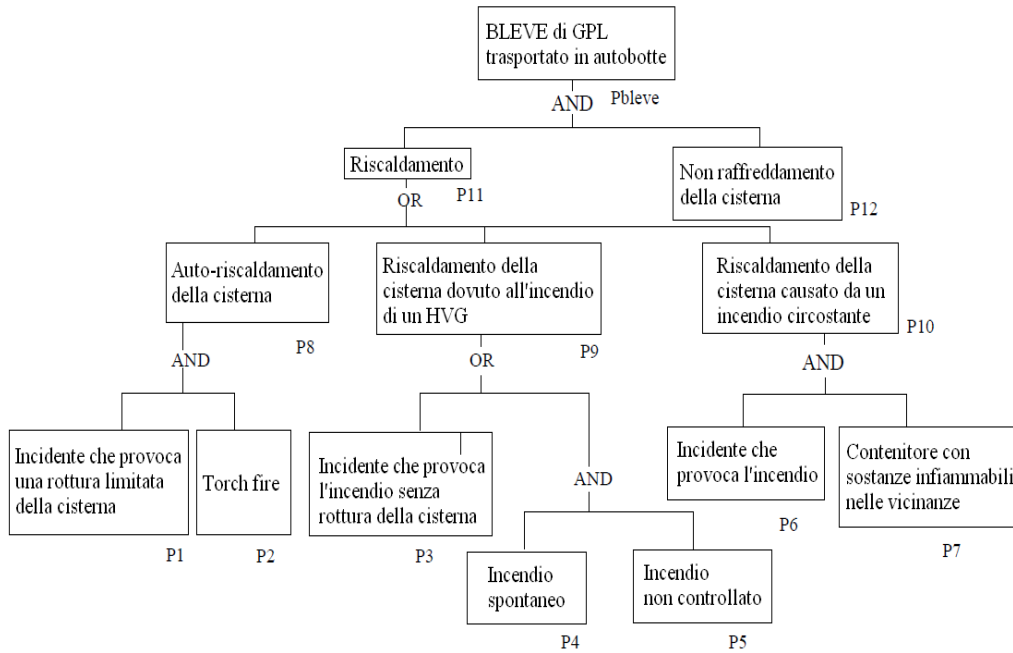


Figura 6.13: “event tree” per BLEVE di GPL trasportato in autobotte.

La probabilità relativa al verificarsi di questo scenario può essere espressa attraverso la stessa relazione riportata per un BLEVE di GPL trasportato all'interno di un “cylinder”:

$$P_{BLEVE} = P_{12} \cdot \{(P_1 \cdot P_2) + [P_3 + (P_4 \cdot P_5)] + (P_6 \cdot P_7)\}$$

Analogamente allo scenario 3 si hanno danni dovuti all'irraggiamento ed alla sovrappressione conseguenti a tale fenomeno.

#### **6.5.1.8 Scenario 8: esplosione di una nube di GPL**

Lo scenario 8 è inerente all'esplosione di una nube di GPL, a seguito della sua fuoriuscita da una cisterna. I rischi associati a tale scenario sono dati dall'irraggiamento termico e dalla sovrappressione prodotti da tale esplosione.

L'“*event tree*” e l'equazioni di calcolo sono uguali a quelle presentate dal manuale del software per lo scenario numero 5.

#### **6.5.1.9 Scenario 9: incendio di un getto di vapore di GPL**

Lo scenario 9 è inerente all'incendio di un getto di vapore di GPL che fuoriesce, ad alta velocità, da un foro di un serbatoio.

L'“*event tree*” per questo fenomeno è simile a quello proposto per un VCE.

Il software considera che tale scenario all'interno di una galleria degeneri in un BLEVE poiché:

- se la torcia di fuoco è diretta lungo l'asse del tunnel e nella stessa direzione della ventilazione, i suoi effetti sono più lievi rispetto a sezioni all'aperto; inoltre si avranno diametri minori, cioè la torcia non riuscirà a svilupparsi pienamente all'interno della galleria, anche per mancanza di ossigeno;
- negli altri casi è probabile che il calore prodotto dalla torcia sia riflesso sui muri del tunnel e che quindi torni indietro verso la massa stessa.

Pertanto, per eventi che si verificano in galleria, il software QRAM considera tale scenario avente le stesse conseguenze di un BLEVE di GPL, ovvero irraggiamento termico e sovrappressione (l'unica differenza è quella che riguarda il tempo di ignizione).

Anche le equazioni per il calcolo delle conseguenze sono identiche a quelle usate nel caso di BLEVE di GPL stoccato in grandi quantità.

#### **6.5.1.10 Scenario 10: rilascio di Ammoniaca**

Lo scenario 10 fa riferimento al rilascio di ammoniaca da una cisterna. Viene preso in considerazione anche questo scenario perché in molti Paesi, tra cui Norvegia e Austria il cloro non può essere trasportato su strada ed in Paesi come Francia e Canada se ne possono trasportare solo piccole quantità.

Gli effetti associati a questo scenario sono dati dalla tossicità della nube che si forma per l'evaporazione dell'ammoniaca, la quale avviene a temperatura ambiente.

L'“*event tree*” per questo evento incidentale può essere ricavato da quello dello scenario 6, relativo al rilascio di cloro, poiché si tratta sempre di sostanze tossiche ed in maniera analoga si valuta la sua probabilità di accadimento.

#### **6.5.1.11 Scenari 11 e 12: rilascio di Acroleina da una cisterna e da “cylinder”**

Lo scenario 11 riguarda il rilascio di acroleina da una cisterna contenete 25 tonnellate di questo liquido. L'acroleina è tossica per l'uomo, con temperatura di ebollizione di circa 52 °C. Una parte della sostanza sversata evapora, con conseguente formazione di una nube tossica.

Lo scenario 12 è simile all'11, infatti fa riferimento al rilascio di acroleina da bombole contenenti 50 kg di liquido.

Il software valuta la probabilità di accadimento di questi fenomeni utilizzando l'espressioni e l'“*event tree*” relativi allo scenario 6 riguardante il rilascio di cloro.

#### **6.5.1.12 Scenario 13: BLEVE di diossido di carbonio liquefatto**

Lo scenario 13 riguarda l'esplosione di un contenitore di CO<sub>2</sub> liquefatto. Gli effetti calcolati dal software non riguardano la tossicità del diossido di carbonio rilasciato ma soltanto gli effetti forniti dall'esplosione del serbatoio.

Pertanto anche per questo fenomeno vengono utilizzate le equazioni e l'albero riportate per lo scenario 3, riguardante un BLEVE di GPL trasportato in bombole.

### 6.5.2 Modelli per la valutazione di conseguenze e danni

Per il calcolo del rischio è necessaria l'applicazione di modelli per la valutazione delle conseguenze, che forniscono la distribuzione spazio-temporale degli effetti, e di modelli per la determinazione dei danni che forniscono la distribuzione spaziale delle perdite (ad esempio la probabilità di morte per l'uomo) a partire dalla distribuzione degli effetti.

All'interno della sua struttura il software QRAM non esegue la valutazione delle conseguenze per i tratti stradali in assenza di tunnel. Quest'ultima, infatti, è stata effettuata una volta per tutte da strumenti non incorporati nel programma.

Per quanto riguarda le gallerie, invece, la stima delle distanze a cui si risentono gli effetti di determinati eventi incidentali viene eseguita direttamente dal “*pre-conditioner*” (modulo del pacchetto software incaricato dei calcoli relativi alle gallerie) con l'aiuto di modelli analoghi a quelli descritti nel capitolo precedente.

La determinazione dei danni viene eseguita dallo stesso software attraverso le equazioni di *probit* con coefficienti di default, ma modificabili dall'utente esperto. Come già descritto nel capitolo precedente, tale metodo consiste nel definire una variabile di *probit* indicata con  $Y(x, y, z)$  e funzione della dose (definita come combinazione di effetto fisico e tempo di esposizione), dove  $x$ ,  $y$  e  $z$  sono le coordinate spaziali di un generico punto. Si ottiene quindi la seguente equazione generale:

$$Y(x,y,z) = A + B \cdot \ln[\text{dose}(x,y,z)]$$

Dove “A” e “B” sono dei coefficienti che dipendono dal tipo di effetto e dal danno di riferimento (esempio morte o ferimento delle persone coinvolte in un incidente).



La probabilità di danno indicata con il termine “PrM”, assumendo come danno di riferimento la morte di un individuo, è funzione della variabile di *probit* secondo la seguente relazione:

$$\text{PrM}[Y(x,y,z)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Y(x,y,z)} e^{-\frac{u^2}{2}} \cdot du$$

La dose è caratterizzata da espressioni analitiche differenti in funzione dell'effetto fisico negativo al quale si riferisce, ovvero concentrazione tossica, irraggiamento o sovrappressione.

Nella tabella 6.7 sono riportati i coefficienti delle equazioni di *probit* impiegati di default dal software in riferimento agli effetti dannosi di incendi e nubi tossiche.

<b>Effetti dannosi</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>n</b>	<b>[c]</b>	<b>[t]</b>
Acroleina	-3,18	1	1	ppmv	min
Ammoniaca	-35,95	1,85	2	ppmv	min
Cloro	-5	0,5	2,75	ppmv	min
Irraggiamento	-14,9	2,56	4/3	kW/m <sup>2</sup>	sec

Tabella 6.7: coefficienti di default delle equazioni di *probit*.

La procedura di calcolo descritta consente di ottenere il valore della probabilità di morte per un bersaglio situato all'esterno di un edificio, denominata nell'ambito del presente studio *vulnerabilità outdoor*.

La probabilità di morte di un bersaglio situato all'interno di un edificio, denominata *vulnerabilità indoor*, è ottenuta nel caso di incendi ed esplosioni mediante la moltiplicazione della vulnerabilità outdoor per un coefficiente riduttivo, funzione del tipo di effetto considerato:

- nel caso di incendi il coefficiente riduttivo è elevato, poiché si assume che gli edifici forniscano alla popolazione presente al loro interno una protezione totale dagli effetti dell'irraggiamento e quindi la vulnerabilità indoor risulta nulla;

- nel caso di esplosioni il coefficiente è di difficile stima in quanto spesso, a causa del pericolo di crolli, trovarsi all'interno di un edificio può non offrire alcun vantaggio.

Nella tabella 6.8 si riportano i valori dei fattori di schermo per gli incendi e per le esplosioni considerati di default dal software.

Irraggiamento (pool fire, flash fire, al di fuori della zona d'ombra della fireball)	Fattore di schermo						
	ORAM 3.6						
	Popolazione on road			Popolazione off road			
	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi e senza ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi ma con ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini aperti	Pedoni	Popolazione all'interno di case private	Popolazione all'interno di edifici pubblici	Pedoni
0			1			1	0
Irraggiamento (nella zona d'ombra della fireball)	Fattore di schermo						
	ORAM 3.6						
	Popolazione on road			Popolazione off road			
	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi e senza ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi ma con ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini aperti	Pedoni	Popolazione all'interno di case private	Popolazione all'interno di edifici pubblici	Pedoni
0			0			0	0
Sovrappressione	Fattore di schermo						
	ORAM 3.6						
	Popolazione on road			Popolazione off road			
	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi e senza ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi ma con ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini aperti	Pedoni	Popolazione all'interno di case private	Popolazione all'interno di edifici pubblici	Pedoni
0			0			0	0

Tabella 6.8: fattori di schermo per gli effetti negativi di incendi ed esplosioni.

Tali valori sono complementari ai coefficienti riduttivi e quindi:

- se il valore del fattore di schermo è pari a 1, la protezione è totale;
- se il valore del fattore di schermo è pari a 0, la protezione indoor è nulla e gli effetti dannosi che si verificano all'interno dell'edificio sono analoghi a quelli che si verificano all'esterno.

Ne caso di nubi tossiche, invece, la vulnerabilità, sia indoor che outdoor, dipende dalla concentrazione tossica e dal tempo di esposizione.

La concentrazione tossica indoor è funzione di quella outdoor e di un coefficiente, detto *tasso di ventilazione*, definito come il numero di ricambi d'aria effettuati in un ambiente chiuso durante un determinato periodo di tempo (generalmente pari ad 1 ora).

In tabella 6.9 sono riportati i valori del tasso di ventilazione considerati di default dal software.

<i>Tasso di ventilazione (1 ricambio/ora)</i>						
<b>Concentrazione tossica</b>	<i>QRAM 3.6</i>					
	Popolazione on road			Popolazione off road		
	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi e senza ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini chiusi ma con ventilazione	Popolazione all'interno di veicoli con i finestrini aperti	Pedoni	Popolazione all'interno di case private	Popolazione all'interno di edifici pubblici
2.5	25	1000	$10^{30}$	0.8	7	$10^{30}$

Tabella 6.9: valori del tasso di ventilazione considerati di default dal software.

### 6.5.3 Valutazione dei danni alla struttura

Quando avviene un incidente all'interno di una galleria, le conseguenze che l'intero sistema può subire possono essere molto gravi; in generale quando ci sono crolli, cedimenti o danni alle strutture interne, si genereranno problemi funzionali del tunnel, ma la sua integrità strutturale non dovrebbe essere compromessa.

Tutti i tunnel contengono strutture interne, incluse le attrezzature meccaniche ed elettriche, per la manutenzione ed il controllo della galleria; costruzioni interne potrebbero essere muri di sezione, barriere, adattamenti provvisori usati per ripari e lavoro di manutenzione, attrezzatura usata per accedere ai sistemi di ventilazione, sistemi di controllo, unità di comunicazione ed installazioni di sicurezza.

Un'esplosione all'interno di una galleria genera una pressione che si propaga lunga tutta la sezione, accompagnata da temperature alte e transitorie; il danno strutturale dipende dall'entità dell'esplosione e quindi dalla pressione. Nel caso estremo si può arrivare al crollo dell'intera struttura; è doveroso però considerare anche gli effetti minori, infatti i carichi generati dallo spostamento d'aria e le vibrazioni prodotte dalla deflagrazione potrebbero rompere elementi strutturali, provocando danni alle attrezzature meccaniche ed elettriche ed inoltre i frammenti liberati potrebbero provocare danni supplementari.

Conseguenza tipica di temperature alte e transitorie, di circa 2000°C, è il fenomeno dello "*thermal spalling*" del calcestruzzo superficiale. Questo causato dalla rapida espansione dell'umidità all'interno del calcestruzzo che potrebbe provocare una rimozione, anche di una zona abbastanza estesa, di materiale influenzando seriamente sulla stabilità della galleria. Temperature alte e transitorie potrebbero causare anche problemi di composizione e compattezza delle pavimentazioni in galleria ed ossidazione delle superfici dipinte.

Un incendio produce fiamme che scaldano il tunnel attraverso radiazione e convezione. Pertanto il carico termico persiste per una durata maggiore rispetto a quella fornita da un'esplosione e per questo motivo può provocare danni più seri.

Generalmente, le attrezzature meccaniche ed elettriche hanno una resistenza al fuoco bassa; può perciò essere necessario offrire protezione supplementare per tali attrezzature.

Il software QRAM considera quattro categorie di danno, riportate nella tabella 6.10 seguente:

<b>Possibili scenari di danno</b>
1) Struttura della galleria (collasso o problemi di integrità strutturale)
2) Strutture interne inclusa la carreggiata (in genere l'integrità non è un problema)
3) Danni alle attrezzature antincendio
4) Danni alle attrezzature che non sono di protezione (ad esempio illuminazione)

Tabella 6.10: categorie di danno.

#### **6.5.4 Valutazione dei danni all'ambiente**

È molto difficile offrire informazioni quantitative sulle conseguenze ambientali in seguito ad incidenti stradali, soprattutto quando coinvolgono merci pericolose. La figura 6.14 (PIARC, 2008) rappresenta un diagramma che riporta le possibili conseguenze e le sostanze tossiche rilasciate dai diversi scenari considerati all'interno del QRAM.

Come si può evincere dalla figura gli scenari che comportano incendi o esplosioni possono dare luogo allo scarico di una grande quantità di prodotti di combustione ed anche materiali evidentemente "innocui", non nocivi, possono produrre, in condizioni particolari, come nel caso di un incendio o di un'esplosione, sostanze potenzialmente dannosi. La nube di prodotti di combustione generalmente si disperderà su una grande area, ma dipendendo dalle condizioni meteorologiche, le sostanze nocive potrebbero essere depositate direttamente su aree sensibili dal punto di vista ambientale incluso fiumi, laghi o boschi.

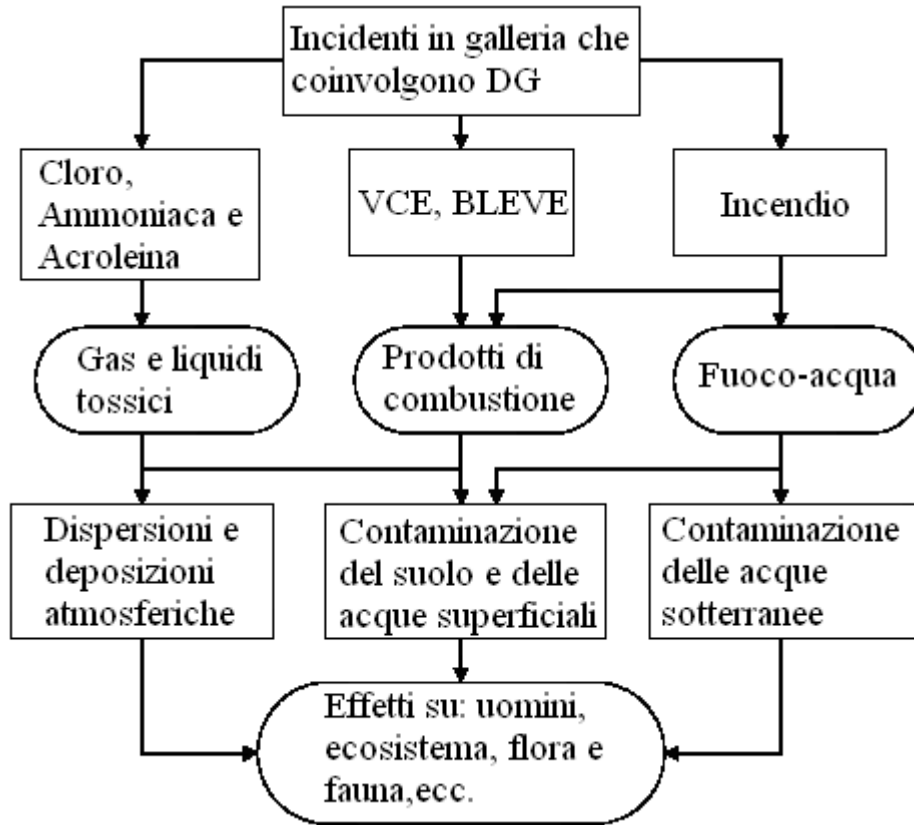


Figura 6.14: componente di inquinamento ambientale.

Se si considerano incidenti che coinvolgono benzine, è importante evidenziare che il materiale infiammabile può essere disperso nell'atmosfera. La dispersione avviene su un'ampia area e con concentrazioni basse, perciò l'impatto ambientale non è significativo.

Due dei tredici scenari considerati dal QRAM, si occupano della liberazione diretta di prodotti tossici, vale a dire cloro ed ammoniaca:

- il cloro è estremamente tossico, corrosivo per i tessuti umani ed attacca prima gli occhi, poi l'apparato respiratorio e le mucose; inoltre si dissolve in acqua formando una soluzione silicea e corrosiva che, se penetra nelle aree verdi con concentrazioni più elevate di circa 100 ppmv, porta alla morte di ogni specie di pianta.
- l'ammoniaca è tossica ed irritante per il sistema respiratorio in piccole dosi; una concentrazione maggiore è corrosiva per le membrane mucose, occhi e pelle umida ed inoltre è estremamente solubile in acqua.

All'interno del software, ci sono anche due scenari che si occupano della liberazione di acroleina ovvero un composto volatile molto tossico; è caratterizzato da un livello alto della reattività su specie vivente ed è un irritante per il sistema respiratorio. Essendo un liquido a pressione e temperatura atmosferica, se rilasciato può dare luogo alla contaminazione di sistemi acquatici.

Per gli scopi del modello QRA, il trattamento degli effetti ambientali è stato limitato ad alcuni semplici indicatori qualitativi come suggerito dalla tabella 6.11 (INERIS, 2005) riportata sotto.

Per poter interpretare correttamente tale tabella è necessario prendere visione della seguente legenda e delle ipotesi riportate sotto:

- 1) gravità:            **n** = trascurabile;  
                          **Lo** = bassa;  
                          **M** = media;  
                          **Hi** = alta;
- 2) si presume che i sistemi anti-incendio non saranno in grado di trattenere del tutto l'incendio;
- 3) si presume una risposta rapida dei servizi d'emergenza.

Scenario	Fattori chiave relativi alla gravità dell'evento			
	Nessuno	Sistema di drenaggio	Sistema antincendio	Flora, fauna o sistemi acquatici vicini
Incendio di un HVG, 20 MW	<b>Lo:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria	-	<b>n</b>	<b>n</b>
Incendio di un HVG, 100 MW	<b>M:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria e di acqua antincendio	-	<b>Lo</b>	<b>n</b>
BLEVE di GPL in <i>cylinder</i>	<b>n:</b> Bassa quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria	-	-	<b>n</b>
Incendio di una pozza di benzina	<b>Hi:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria e di acqua antincendio; fuoriuscita di idrocarburi liquidi nocivi	<b>Lo</b>	<b>Lo</b>	<b>n</b>
VCE di benzina	<b>M:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria; fuoriuscita di idrocarburi liquidi nocivi	<b>Lo</b>	-	<b>n</b>
Rilascio di cloro	<b>Hi:</b> Fuoriuscita di idrocarburi liquidi molto nocivi	<b>Lo</b>	-	<b>n</b>
BLEVE di GPL in cisterna	<b>Lo:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria	-	-	<b>n</b>
VCE di GPL in cisterna	<b>Lo:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria	<b>Lo</b>	-	<b>n</b>
Torch fire di GPL	<b>M:</b> Elevata quantità di prodotti di combustione dispersi nell'aria e di acqua antincendio	-	<b>Lo</b>	<b>n</b>
Rilascio di ammoniacca	<b>Hi:</b> Fuoriuscita di idrocarburi liquidi molto nocivi	<b>Lo</b>	-	<b>n</b>
Rilascio di acroleina	<b>Hi:</b> Fuoriuscita di idrocarburi liquidi molto nocivi	<b>M</b>	-	<b>n</b>

Tabella 6.11: indicatori di severità.



### 6.5.5 Scenari di esodo

La modellazione degli scenari di esodo richiede la soluzione di:

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

Per formulare un modello di formazione delle code ci si riferisce ai parametri correntemente utilizzati nella caratterizzazione della circolazione in galleria in termini di regimi di traffico, assumendo quest'ultimo stazionario ed omogeneo. Si assume l'interdistanza tra i veicoli come parametro caratterizzante e si suppone che il traffico presente a valle dell'incidente possa ragionevolmente raggiungere l'uscita della galleria e mettersi in salvo. Per i veicoli che precedono, invece, si ipotizza la formazione di una coda.

Per quanto riguarda il modello di esodo degli utenti dalla struttura deve tener conto della dinamica comportamentale degli utenti che in condizioni di emergenza si dirigono verso le uscite di soccorso. Un modello semplificato può essere formulato assumendo come parametri fondamentali i tempi di abbandono dei veicoli da parte degli utenti e la loro velocità di esodo.

Questi modelli, citati sopra, vengono ampiamente descritti nel capitolo precedente, nel paragrafo 5.8.

## 6.6 Descrizione della rete stradale

All'interno del software QRAM la rete stradale è schematizzata come un insieme di più segmenti rettilinei denominati *tratte*; ogni tratta ha caratteristiche omogenee sulla sua lunghezza, ma che possono essere differire da quelle delle altre tratte. Nel programma in esame è possibile definire fino a 33 tratte.

Ogni strada, e quindi ogni sua tratta, è sempre costituita da due direzioni di traffico, denominate A e B che possono avere caratteristiche uguali o diverse, come mostrato dalla figura 6.15.

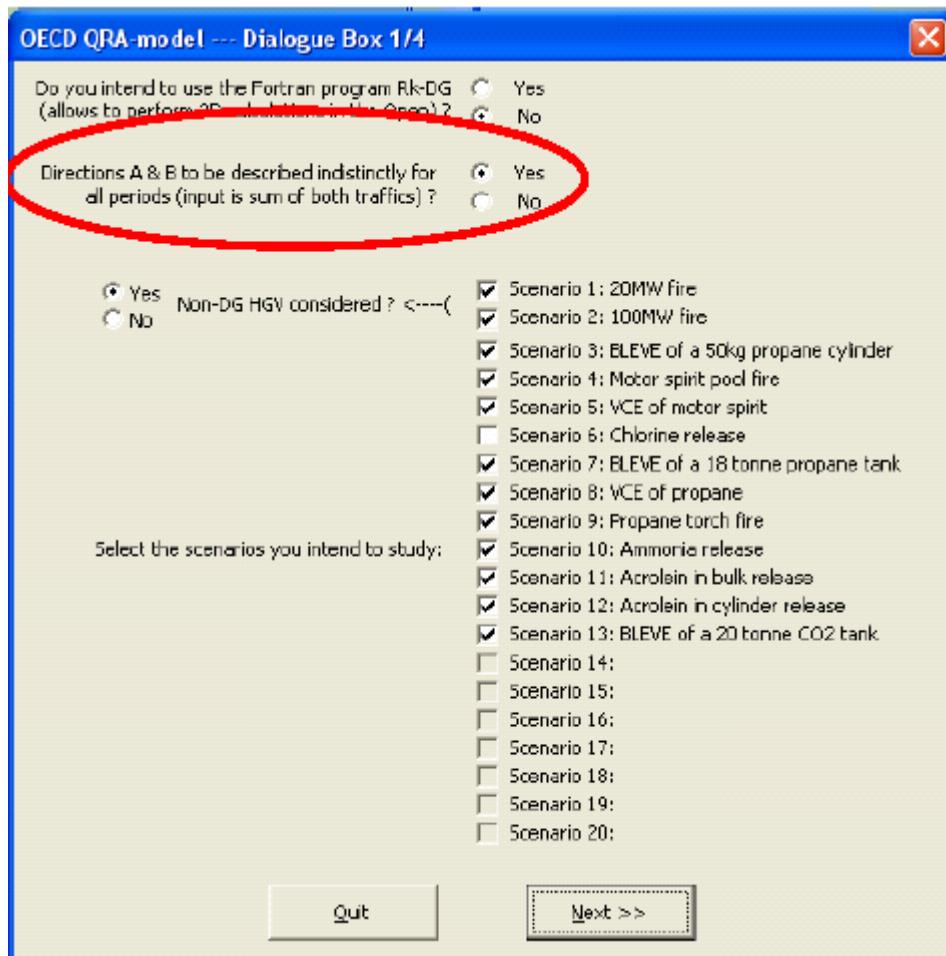


Figura 6.15: finestra di dialogo per tracciato.

Se le due direzioni di traffico presentano caratteristiche diverse, per ogni direzione è necessario definire (figura 6.16):

- coordinate del punto iniziale e del punto finale della tratta in esame;
- numero delle corsie di marcia;
- traffico;
- dati che consentano il calcolo della popolazione on road (quali il numero di persone presenti in ogni tipologia di veicolo, essendo le tipologie di veicolo l'automobile, l'autobus o i veicoli adibiti al trasporto merci);
- frequenza incidentale unitaria.

Figura 6.16: finestra di dialogo per inserimento dei dati su una tratta.

Invece, se le due direzioni di traffico presentano caratteristiche uguali, i dati inseriti dall'utente sono considerati come globali per entrambe le direzioni e quindi:

- i dati delle coordinate delle sezioni stradali e di frequenza incidentale unitarie sono gli stessi per le due direzioni;
- il dato di traffico attribuito a ciascuna direzione è pari alla metà del valore inserito dall'utente;
- il numero delle corsie di marcia è lo stesso per le due direzioni di traffico, ed è pari alla metà del valore inserito dall'utente.

La galleria è schematizzata come un segmento stradale rettilineo al quale l'utente, tramite opportune finestre di dialogo, può associare specifiche caratteristiche, come viene evidenziato delle figure 6.17 e 6.18.

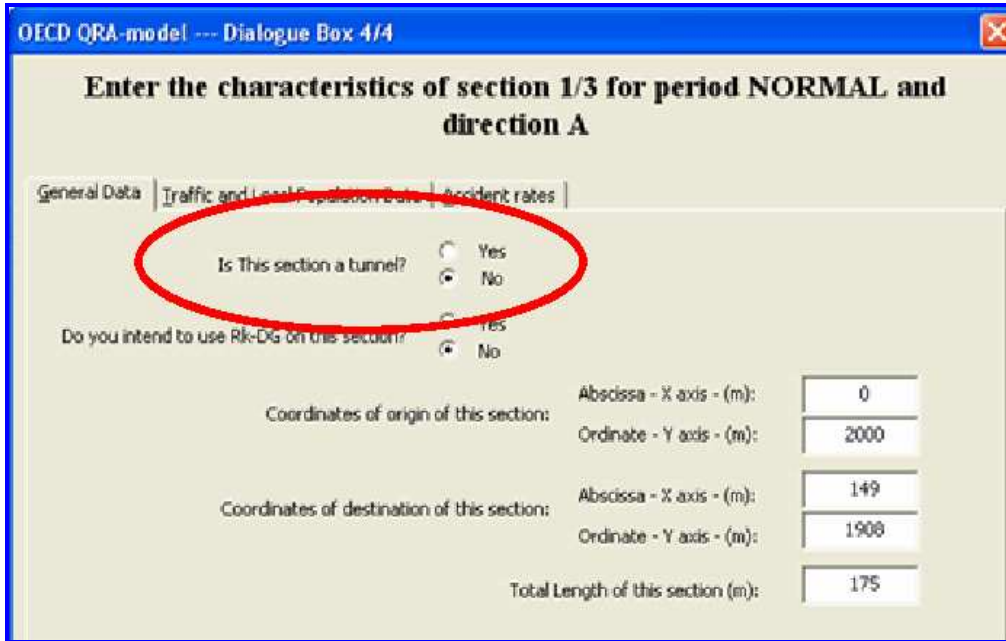


Figura 6.17: finestra di dialogo per inserimento tratte in tunnel.



Figura 6.18: specifiche previste per sezioni in tunnel.

## 6.7 Periodi temporali

Nel software QRAM l'utente può considerare tre periodi temporali denominati rispettivamente:

- 1) *normal*;
- 2) *quiet*;
- 3) *peak*.

In figura 6.19 viene riportata la finestra di dialogo in cui l'utente seleziona il numero di periodi temporali.

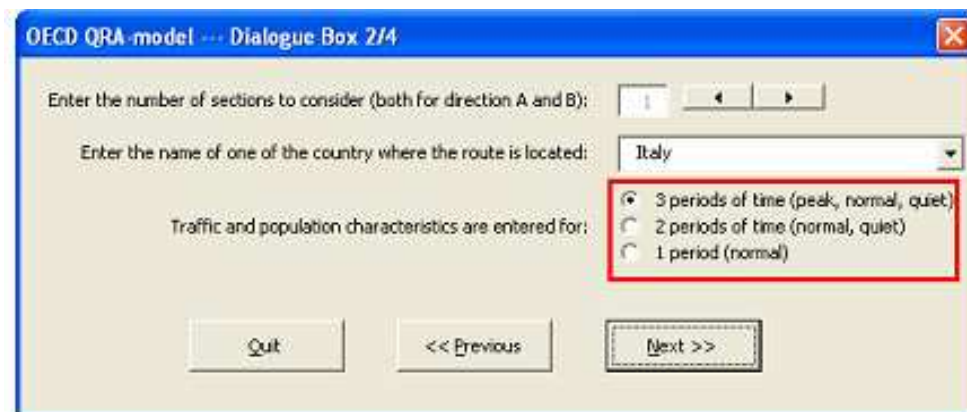


Figura 6.19: finestra di dialogo per la definizione dei periodo temporali.

L'utente deve successivamente specificare la probabilità di accadimento di tutti i periodi temporali selezionati e la somma di tali probabilità deve risultare pari ad 1.

In figura 6.20 si riportano le finestre di dialogo nelle quali l'utente definisce le probabilità di accadimento di ogni periodo temporale; si osservi che nell'esempio specifico sono stati considerati tutti e tre i periodi temporali e che la probabilità di accadimento del periodo "*peak*" viene definita di default dal software, affinché la somma delle probabilità risulti pari a 1.

The figure displays three sequential dialog boxes from the OECD QRA model software, each titled "Constant route characteristics for period: [PERIOD]". All three dialog boxes share the same layout and are for route "A14".

**Dialog Box 1: NORMAL**

- Short route description: [Empty]
- Route name: A14
- Enter the time ratio for period: NORMAL: 0.6
- Average number of people in a light vehicle: 2
- Average number of people in a HGV: 1.1
- Average number of people in a BUS/Coach: 40
- DG-HGV traffic (veh/h): 1000
- Proportion of each DG type in the DG traffic:
  - Custom
  - Canadian default values
  - French default values
  - Norwegian default values

**Dialog Box 2: QUIET**

- Short route description: [Empty]
- Route name: A14
- Enter the time ratio for period: QUIET: 0.2
- Average number of people in a light vehicle: 2
- Average number of people in a HGV: 1.1
- Average number of people in a BUS/Coach: 40
- DG-HGV traffic (veh/h): 700
- Proportion of each DG type in the DG traffic:
  - Custom
  - Canadian default values
  - French default values
  - Norwegian default values

**Dialog Box 3: PEAK**

- Short route description: [Empty]
- Route name: A14
- Enter the time ratio for period: PEAK: 0.2
- Average number of people in a light vehicle: 2
- Average number of people in a HGV: 1.1
- Average number of people in a BUS/Coach: 40
- DG-HGV traffic (veh/h): 1200
- Proportion of each DG type in the DG traffic:
  - Custom
  - Canadian default values
  - French default values
  - Norwegian default values

Figura 6.20: esempio di definizione delle probabilità dei periodi temporali.

Per ogni periodo temporale l'utente deve specificare i dati di:

- popolazione:
  - on road: tramite il numero medio di persone all'interno delle tre tipologie di veicoli considerate ed il traffico di tali tipologie di veicoli;
  - off road: tramite il valore di densità media di popolazione in caso di applicazione del modulo Sk-DG, oppure tramite il numero medio di persone all'interno di ogni cella della griglia nel caso di applicazione del modulo Rk-DG.
- Traffico totale dei veicoli pesanti trasportanti merci pericolose e frazione di veicoli pesanti trasportanti un particolare tipo di merce pericolosa sul totale dei veicoli pesanti trasportanti merci pericolose;
- Frequenza incidentale unitaria per ogni sezione.

## 6.8 Descrizione della popolazione

Le informazioni relative alla popolazione presente nell'area di impatto di un incidente sono necessarie al fine del calcolo del rischio sociale.

Come già accennato la popolazione è raggruppata in due gruppi:

- “*popolazione on road*” costituita da tutta la popolazione presente sulla strada e suddivisa in:
  - popolazione all'interno dei veicoli con finestrini chiusi senza ventilazione;
  - popolazione all'interno dei veicoli con finestrini chiusi ma con ventilazione;
  - popolazione all'interno dei veicoli con finestrini aperti;
  - pedoni.

Nella figura 6.21 è riportata la relativa finestra di dialogo per la popolazione on-road nel QRAM.

OECD QRA-model --- Dialogue Box 3/4

**Constant route characteristics for period:  
NORMAL**

Short route description:

Route name:

Enter the time ratio for period: NORMAL

Average number of people in a light vehicle:

Average number of people in a HGV:

Average number of people in a BUS/Coach:

DG-HGV traffic (veh/h):

**ON-ROAD**

Proportion of each DG type in the DG traffic:

Custom  
 Canadian default values  
 French default values  
 Norwegian default values

Figura 6.21: finestra di dialogo per popolazione on-road.

- “popolazione off road” costituita da tutta la popolazione presente nell’area circostante la strada:
  - popolazione all’interno di edifici pubblici;
  - popolazione all’interno di case private;
  - pedoni.

Nella figura 6.22 viene rappresentata la finestra di dialogo per la definizione della popolazione off-road nel software QRAM.



Figura 6.22: finestra di dialogo per popolazione off-road.

## 6.9 Dati meteorologici

Nel software QRAM l'introduzione dei dati meteorologici avviene diversamente a seconda del modulo utilizzato.

Nel caso si utilizzi solamente il modulo Sk-DG, il software assume una rosa dei venti uniforme, ovvero la probabilità che il vento spiri in una direzione è la stessa per tutte le direzioni e considera sette classi meteorologiche, intese come coppie di "classe di Pasquille, velocità del vento", ovvero A-1.5, F-1.5, A-3, D-3, F-3, C-6, D-10; la probabilità di accadimento di tali classi è definita di default, ma modificabile da un utente esperto.

In figura 6.23 si rappresenta il foglio del file *ExpertUserInterface.xls* in cui l'utente definisce i valori di probabilità delle classi meteorologiche; nell'esempio specifico sono stati riportati i valori di default previsti dal software.

Condition	A	F	A	D	F	C	D	
	1.5	1.5	3	3	3	6	10	
								Sum
Reference	0.2	0.2	0.16	0.08	0.16	0.1	0.1	1
Mountainous	0.2	0.2	0.08	0.04	0.08	0.3	0.1	1
Sea	0.1	0.1	0.12	0.06	0.12	0.2	0.3	1
Inland	0.2	0.2	0.16	0.08	0.16	0.1	0.1	1

Figura 6.23: valori di default di probabilità delle classi meteorologiche.

Nel caso in cui si applichi il modulo Rk-DG, il software consente di descrivere una rosa dei venti non uniforme; l'utente deve definire il numero di settori della rosa dei venti, che deve essere compreso tra 4 e 36, successivamente, per ogni tratta della rosa dei venti, l'utente deve indicare la probabilità che il vento spiri in quel settore con velocità  $< 2$  m/s, o compresa tra 2 e 5 m/s, o compresa tra 5 e 8 m/s, o  $> 8$  m/s.

Nelle figure 6.24 e 6.25 si riportano le finestre di dialogo di QRAM in cui l'utente definisce rispettivamente il numero dei settori della rosa dei venti e la probabilità delle diverse categorie di velocità del vento in un singolo settore della rosa dei venti.

Figura 6.24: esempio di definizione del numero di settori della rosa dei venti.

**Wind Rose entry - Form 2/2**

**Enter the meteorological characteristics for sector 2/18 of the Wind Rose**

Angle (°) from North corresponding to sector 2: 20

**WARNING: The 0° sector corresponds to a wind blowing southwards**

Sum of time ratios entered so far: 0,047

Time ratio for calm winds (< 2m/s) with this direction (sector): 0.023

Time ratio for winds between 2m/s and 5m/s with this direction (sector): 0.012

Time ratio for winds between 5m/s and 8m/s with this direction (sector): 0.010

Time ratio for winds blowing faster than 8m/s with this direction (sector): 0.002

Buttons: Cancel, << Previous, Next >>

Figura 6.25: esempio di definizione delle probabilità delle classi di velocità del vento, in un settore della rosa dei venti.

E' necessario osservare che in caso di applicazione del modulo Rk-DG non vengono definite le classi meteorologiche ed il manuale del software (INERIS, 2005) afferma che i valori di probabilità di tali classi, contenuti nel file *ExpertUserInterface.xls* non sono considerati ai fini della descrizione della meteorologia.

Si suppone, tuttavia, che ad ogni categoria di velocità del vento siano associate una o più classi meteorologiche e che definendo la probabilità di accadimento delle diverse categorie di velocità del vento, l'utente definisca indirettamente la somma delle probabilità di accadimento delle classi meteorologiche considerate dal software, appartenenti a tale categoria.

Nello specifico si presume che:

- alla categoria di velocità del vento caratterizzata da velocità < 2m/s corrispondano le classi meteorologiche equiprobabili A-1.5 e F-1.5;

- alla categoria di velocità del vento caratterizzata da velocità  $< 2\text{ m/s}$  corrispondano le classi meteorologiche equiprobabili A-1.5 e F-1.5;
- alla categoria di velocità del vento caratterizzata da velocità  $5\text{ m/s} < v < 8\text{ m/s}$  corrisponda le classi meteorologiche equiprobabili C-3;
- alla categoria di velocità del vento caratterizzata da velocità  $v > 8\text{ m/s}$  corrisponda la classe meteorologica equiprobabili D-10;

Nella tabella 6.12 si riportano le categorie di velocità del vento e le classi meteorologiche che ad esse si suppongono associate.

Categoria di velocità del vento	Classe meteorologica
$v < 2\text{ m/s}$	A-1.5
	F-1.5
$2\text{ m/s} < v < 5\text{ m/s}$	A-3
	D-3
	F-3
$5\text{ m/s} < v < 8\text{ m/s}$	C-6
$v > 8\text{ m/s}$	D-10

Tabella 6.12: associazione delle classi meteorologiche alle categorie di velocità del vento.

## 6.10 Zone di impatto

Nel software QRAM è possibile considerare unicamente due zone di impatto:

- area urbana (*urban area*);
- area agricola (*rural area*).

L'utente deve definire la zona di impatto per ogni tratta considerata. Nella figura 6.26 si riporta un esempio della finestra di dialogo in cui l'utente definisce le caratteristiche di una tratta, evidenziando la cella nella quale si effettua la selezione della zona di impatto.

OECD QRA-model --- Dialogue Box 4/4

**Enter the characteristics of section 1/3 for period NORMAL and direction A**

General Data | Traffic and Local Population Data | Accident rates |

**Enter the traffic characteristics for this section:**

Total traffic (veh/h): 1000

HGV ratio (adm): 0.1

Bus Coaches ratio (adm): 0

Light vehicles average speed (km/h): 120

HGV/Bus average speed (km/h): 80

Number of lanes: 2

Delay (s) for stopping approaching traffic: 9000

Area (Urban/Rural):  Urban  Rural

Average density of population (inhab/km<sup>2</sup>): 1E-17

This section is in the following country: Italy

Quit << Previous 3 leaflets & then ... Next >>

Figura 6.26: esempio di definizione della zona di impatto.

Al variare della tipologia di zona di impatto nel software QRAM variano i dati di:

- distribuzione di default della popolazione off road tra le diverse categorie;
- frequenza incidentale unitaria di default;
- probabilità di default degli scenari finali.

Nel manuale del programma (INERIS, 2005) si afferma che la scelta della tipologia della zona di impatto ha un'influenza limitata sui valori finali di rischio.

## 6.11 Inserimento dei dati nel software QRAM

L'inserimento dei dati nel software risulta essere la fase più delicata del processo di calcolo del rischio. I dati possono essere presi da osservazioni eseguite “sul campo” o da statistiche relative al trasporto sul tratto stradale considerato; inoltre il programma in esame prevede, come già messo in evidenza, la possibilità di scelta di valori di “default” riguardanti dati statistici di alcuni Paesi europei ed extraeuropei.

### 6.11.1 Dati preliminari

Il software QRAM richiede di effettuare delle scelte preliminari, riguardanti in modo particolare i dati di output che si vogliono ottenere. L'interfaccia iniziale del programma è presentata in figura 6.27.



Figura 6.27: interfaccia iniziale del software QRAM.

In tale interfaccia è possibile scegliere se effettuare i calcoli delle conseguenze per un caso già esistente o si voglia analizzare un nuovo tratto stradale. Si deve specificare il nome del *file* che si vuole creare, che avrà

estensione “.xls”. Tale scelta è effettuata nell'interfaccia presentata in figura 6.28.

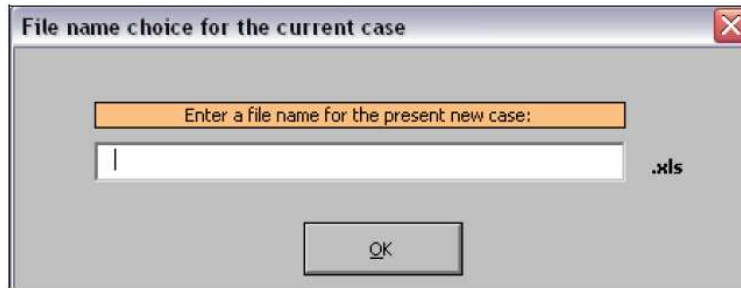


Figura 6.28: interfaccia per la scelta del nome del file creato dal software.

A questo punto il software richiede di effettuare delle scelte riguardanti i risultati di calcoli, ovvero delle curve F/N che saranno prodotte. Nello specifico si richiede quale danno deve essere considerato nella determinazione del numero di vittime, cioè se occorre considerare il numero di morti o il numero dei morti e dei feriti. I risultati inoltre possono essere prodotti sia per la sola popolazione presente nella strada sia per la sola popolazione residente nelle vicinanze di questa sia per entrambe. In caso di incidente in galleria l'unica possibilità di scelta risulta essere il calcolo del danno per la popolazione presente nella strada. In figura 6.29 è rappresentata l'interfaccia del software attraverso cui effettuare tali scelte.

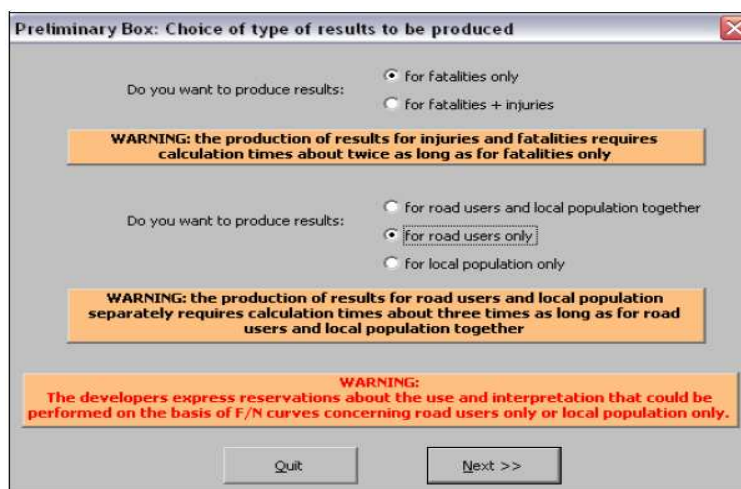


Figura 6.29: interfaccia per la scelta del danno di riferimento e della popolazione.

### **6.11.2 Dati relativi al traffico**

Il software richiede la conoscenza di alcune informazioni, quali la tipologia di galleria che si vuole analizzare e l'omogeneità o meno del traffico stradale presente nella tratta di interesse nell'arco della giornata.

Possono essere analizzate infatti sia gallerie a singola canna (con traffico unidirezionale o bidirezionale) che gallerie a doppia canna con traffico unidirezionale.

Per quanto riguarda l'omogeneità del traffico è possibile la scelta di implementazione del calcolo anche su più periodi del giorno; si può scegliere cioè di analizzare il tratto variando il traffico fino a tre diversi periodi temporali della giornata, imponendo diversi valori per il numero di veicoli che percorrono la strada. Questo permette di analizzare tratte stradali in cui il traffico non è omogeneo, ma presenta un andamento con dei picchi massimi e minimi per quanto riguarda il numero di veicoli circolanti.

Se il traffico nelle due direzioni risulta essere diverso, per intensità o tipologia di veicoli che attraversano il tratto o per le caratteristiche della strada stessa, è possibile l'inserimento di dati diversi per ogni direzione di marcia.

Quindi per ogni periodo considerato, per ogni sezione, ed eventualmente per ogni senso di marcia, devono essere noti i seguenti dati:

- il numero medio di occupanti di veicoli leggeri;
- il numero medio di occupanti di veicoli pesanti;
- l'intensità del traffico di veicoli pesanti trasportanti merci pericolose, espressi in veicoli/ora; in tale voce deve essere inserito il dato riguardante sia i veicoli pesanti trasportanti merci pericolose a pieno carico che i veicoli pesanti che risultano vuoti;
- la proporzione nel trasporto di merci pericolose, ovvero la frazione di ogni merce pericolosa presente nel tratto stradale.



### 6.11.3 Dati relativi alla galleria

Inseriti i dati sul traffico veicolare il software richiede l'inserimento dei dati relativi alla galleria stradale che si sta considerando. Per l'immissione di tali dati è necessaria la conoscenza della struttura della galleria in esame nelle sue caratteristiche principali, ovvero le caratteristiche geometriche e costruttive di questa, la ventilazione ed il sistema di drenaggio, oltre alle misure di sicurezza presenti. La procedura di immissione dei dati avviene tramite la compilazione di un foglio Excel, le cui voci sono riportate nelle tabelle 6.13 e 6.14.

<b>Dati necessari per la specifica delle caratteristiche della galleria</b>	<b>Unità di misura</b>
<b>Caratteristiche geometriche</b>	
Larghezza della galleria	m
Altezza della galleria	m
Curvatura della galleria	%
<b>Suddivisione in segmenti della galleria</b>	
Numero di segmenti in cui si divide la galleria	
Lunghezza di ogni segmento della galleria	m
Pendenza di ogni segmento	%
<b>Caratteristiche della ventilazione di esercizio</b>	
Volume di aria estratta dal tunnel in ogni segmento	m <sup>3</sup> /s
Volume che attraversa ogni nodo <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> /s
<b>Caratteristiche della ventilazione di emergenza</b>	
Numero di ventilazioni di emergenza previste	/
Tempo di attivazione della ventilazione di emergenza	min
Tipo di ventilazione di emergenza per ogni sezione della galleria	/
Tipo di ventilazione di emergenza in ogni sezione	/
Volume di aria estratta dalla galleria per ogni tipo di ventilazione di emergenza prevista	m <sup>3</sup> /s
Volume di aria che attraversa ogni nodo della galleria per ogni tipo di ventilazione di emergenza prevista	m <sup>3</sup> /s

Tabella 6.13: Dati necessari per la specifica delle caratteristiche della galleria stradale in esame.

<b>Dati necessari per la specifica delle caratteristiche della galleria</b>	<b>Unità di misura</b>
<b>Caratteristiche del sistema di drenaggio</b>	
Area aperta per ogni tombino di drenaggio, sia esso continuo o discontinuo	m <sup>2</sup>
Intervallo tra i tombini di drenaggio se discontinui o lunghezza di questi se continui	m
<b>Misure di sicurezza presenti in galleria</b>	
Intervallo fra le uscite di emergenza	m
Misure di sicurezza adottate	/
<b>Caratteristiche costruttive della galleria</b>	
Tipo di costruzione	/
Tipo di terreno	/
Raggio interno	m
Spessore del manto stradale	m
Spessore del rivestimento della galleria	m
Spessore del diaframma di separazione tra le canne nel caso di galleria a doppio fornice	m
Spessore degli strati di terreno sovrastanti la galleria	m
Profondità delle falde acquifere sottostanti la galleria	m
Misure di protezione dal fuoco delle strutture	/
Temperatura massima a cui la struttura può resistere	°C

Tabella 6.14: Dati necessari per la specifica delle caratteristiche della galleria stradale in esame.

Nelle figura 6.30 e 6.31 si riporta il foglio Excel, tratto dal manuale del software (INERIS, 2005), che deve essere compilato per l'inserimento dei dati sulle caratteristiche della galleria. Si fa notare che le celle con sfondo turchese sono le uniche in cui è permesso l'inserimento o la modifica dei dati, mentre le altre vengono fornite in base ai calcoli effettuati dal software.

Tunnel 1 inputs				symbol	units	data
<b>cross-section geometry</b>						
effective width	W	m	8			
effective height	H	m	6.2			
open cross-sectional area	A	m <sup>2</sup>	49.6			
camber	Cam	%	0			
<b>lengthwise geometry</b>						
...segments (homogeneous - ventilation, gradient)						
total number of segments	Ns	-	1			
segment number		-	1			
segment lengths	Xs	m	1275			
total length of tunnel	Xt	m	1275			
segment gradient	Gs	%	3			
...nodes (segment start and end points)						
total number of nodes	Nn	-	2			
node number		-	1	2		
location of node	Xn	m	0	1275		
<b>ventilation - normal</b>						
...segments						
segment number		-	1			
volume flow rate extracted from tunnel	VsN	m <sup>3</sup> /s	0			
...nodes (segment start and end points)						
node number		-	1	2		
volume flow rate along tunnel at nodes	VnN	m <sup>3</sup> /s	100	100		
<b>ventilation - emergency</b>						
number of emergency ventilation regimes	nE	-	1			
time taken to activate emergency ventilation	tE	mins	5			Warning: This value can differ as a fu
segment number		-	1			
emergency ventilation regime if accident within this segment	iE	-	1			
...volume flow rate extracted from tunnel						
segment number		-	1			
emergency ventilation regime	1		0			
...volume flow rate along tunnel						
node number		-	1	2		
emergency ventilation regime	1		100	100		

Figura 6.30: Foglio Excel per l'inserimento dei dati riguardanti la galleria.

<b>drainage</b>			
open area of discrete drains or continuous slot (per Xd m)	Ad	m <sup>2</sup>	0.075
interval between drains, or slot length used to define Ad	Xd	m	20
<b>traffic</b>			
traffic direction ( 0=bi-directional, 1=A-to-B, -1=B-to-A)	TrDir	-	1
traffic density (0=none, 1=light, 2=normal, 3=peak)	TrDen	-	1.488225
<b>mitigation measures</b>			
average spacing between emergency exits	Xe	m	500
emergency coms (0=no, 1=bell/siren, 2=PA, 3=PA+CCTV)	Ecom	-	0
<b>tunnel structure</b>			
type of construction (1=drill+blast/tbm, 2=cut+cover)	itype	-	1
ground type (1=bedrock, 2=fragmented, 3=frag/under water)	ground	-	1
internal radius	trad	m	4
lining thickness	dlin	m	0.6
road support thickness	droad	m	0.3
mid-wall thickness	dmidw	m	0.3
overburden depth	dover	m	6.5
depth of water above solid overburden	dwater	m	20
fire protection lining (0=no, 1=yes)	fprot	-	1
temperature rating	fptemp	degC	1350
lime rating	fpilime	mins	120
State of data entries:		Ended	
<b>calculations</b>			
...sub-segments			
maximum sub-segment length		m	10
segment number		-	1
number of sub-segments per segment	Nsub	-	128
total number of sub-segments		-	128
actual sub-segment lengths	Xsub	m	9,9609375

Figura 6.31: Foglio Excel per l'inserimento dei dati riguardanti la galleria.



## Capitolo 7

# Applicazione del software QRAM per l'analisi di rischio del "Traforo delle Torricelle"

### 7.1 Introduzione

Il Comune di Verona in data 9 Aprile 2008 ha pubblicato l'avviso indicativo 30/08 per la selezione del Promotore al fine di realizzare il collegamento stradale per il completamento dell'anello circonvallatorio a Nord della Città – Traforo delle Torricelle. Tale opera risulta inserita nel Programma Triennale dei lavori pubblici per gli esercizi 2008-2009-2010 del Comune di Verona, approvato con deliberazione consiliare n.107 del 20/12/2007 e modificata con deliberazione consiliare n.11 del 13/03/2008.

In seguito all'avviso indicativo citato vengono presentate due proposte di Project Financing ai sensi del D. Lgs. 163/06 e successive modifiche ed integrazioni. Una di queste è sviluppata dall'ATI, costituita da Technital S.p.A., in qualità di mandataria e capogruppo, Verona Infrastrutture Consorzio Stabile e Girpa S.p.A., in qualità di mandanti.

La seconda proposta è stata presentata da Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A. In caso di scelta quale promotori, le società Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A., si riuniranno in Società di Progetto, nominando quale impresa capogruppo e mandataria Geodata S.p.A.

In entrambi i casi le motivazioni di base del progetto sono state:

- congestionamento dei tessuti urbani attraversati da flussi di traffico di rango territoriale;

- assenza di una connessione diretta, nella direzione est-ovest, a nord della città, che possa svolgere la funzione di asse ordinatore del traffico in entrata ed uscita dalla città;
- assenza di un collegamento diretto tra la Valpantena, la Valpolicella e la grande viabilità.

Gli obiettivi preposti sono stati quelli di:

- 1) migliorare l'interconnessione tra la direttrice di fondovalle, la direttrice est ovest e il sistema di grande viabilità urbana veronese;
- 2) migliorare le condizioni di accessibilità di breve raggio (turismo, studio, lavoro) e di integrazione locale dei sistemi della Lessinia e della Valpolicella con le aree pedemontane della grande Verona e dei corridoi Verona-Vicenza ad est e Verona-Trento ad ovest;
- 3) riqualificare i tessuti urbani congestionati dal traffico in attraversamento.

In questo capitolo verrà realizzata un'analisi di sicurezza, non dell'intero tracciato, ma solamente per il tratto in galleria (Studio Fattibilità Comune di Verona, 2008, progetto preliminare Technital, 2008 e progetto preliminare Geodata, 2008).

## **7.2 Studio di fattibilità del Comune di Verona**

Lo Studio di Fattibilità del Comune di Verona riguarda la nuova infrastruttura che completa il sistema viario delle tangenziali urbane della città chiudendo l'anello a nord e ad ovest.

Pertanto l'oggetto di quest'analisi è il collegamento stradale denominato "Passante delle Torricelle" a completamento dell'anello circonvallatorio a nord della città di Verona, comprendente una galleria di lunghezza pari a circa 4,2 km per l'attraversamento della collina delle Torricelle.

L'intervento si inquadra come ipotesi di "galleria lunga", nella convinzione che debba essere garantita sia la funzione di circonvallazione nord della città per i traffici di provenienza extraurbana, sia una funzione prettamente "urbana", attraverso il collegamento diretto tra Via Fincato ed il

Saval, ormai assolutamente indispensabile per risolvere gli attuali problemi di traffico di attraversamento delle aree urbane di Veronetta, Borgo Trento, Valdonega, Via Mameli e Via Ca' di Cozzi.

Il nuovo itinerario non comprende solo l'attraversamento sotterraneo, ma realizza il collegamento diretto tra l'esistente Tangenziale Est di Verona e la Tangenziale Ovest, in prossimità dello svincolo autostradale di Verona Nord, attraverso anche la cosiddetta "Gronda Ovest" ed un nuovo attraversamento del Fiume Adige, chiudendo di fatto l'anello circonvallatorio delle tangenziali veronesi, come schematizzati dalla figura 7.1.

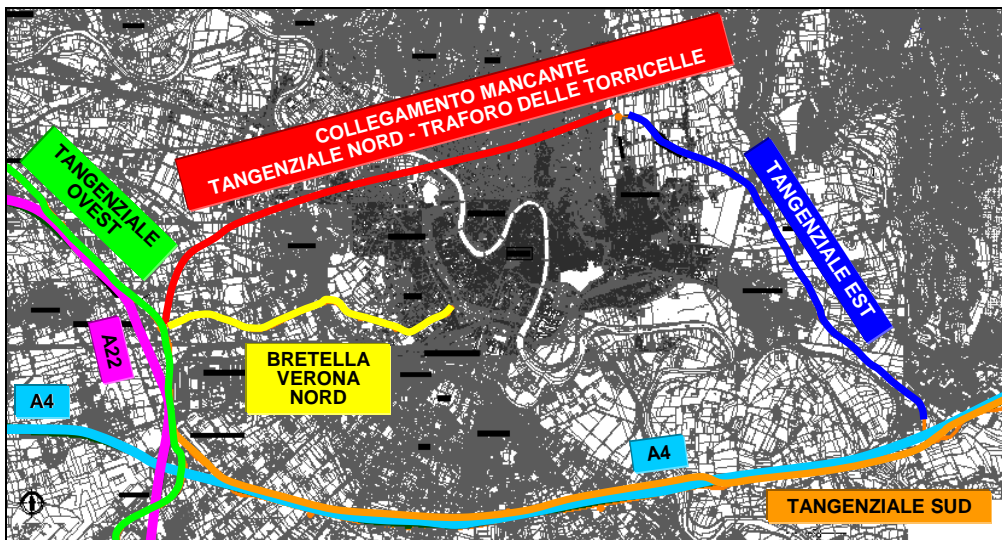


Figura 7.1: schematizzazione dell'intervento.

### 7.2.1 Aspetti trasportistici

Il Comune di Verona ha eseguito in varie epoche delle simulazioni tese a stabilire la domanda di traffico associabile alla galleria, dai quali emerge che l'entrata in esercizio della Tangenziale Est non ha generato effetti drenanti significativi sulla direttrice Porta Vescovo – Porta S. Giorgio – Via Mameli.

Inoltre, sono state condotte specifiche valutazioni, seppur di carattere preliminare, sui volumi del traffico che potrà interessare l'infrastruttura in oggetto.



Lo scenario infrastrutturale di riferimento nella definizione di tali volumi comprende la “Galleria delle Torricelle”, la viabilità di rango autostradale, la cosiddetta “Gronda Ovest”, nonché la viabilità principale che interessa il comune di Verona ed il territorio immediatamente limitrofo, fino a scendere alla viabilità urbana principale.

Queste simulazioni sono state eseguite con riferimento all'anno 2013, anno di presumibile entrata in esercizio dell'infrastruttura.

Ciò premesso, con il completamento dell'anello circonvallatorio a nord tra la tangenziale est e lo svincolo di Verona Nord, i passaggi nella galleria delle Torricelle sono valutati pari a circa 3.600 veicoli/ora nell'ora di punta, mentre quelli sull'asse di penetrazione ovest si attestano ad un valore di circa 2.800 veicoli/ora.

Questi risultati portano ad una fondamentale considerazione: i volumi di traffico, ancorché calcolati sommariamente sulla base di valutazioni preliminari, non sono compatibili con l'adozione di una piattaforma ad una corsia per senso di marcia.

### **7.2.2 Inquadramento geologico, geomorfologico ed idrogeologico**

Il territorio oggetto di studio è interamente compreso nel Comune di Verona. Il contesto geologico generale è quello di un'area di pianura delimitata, verso nord, da una serie di dorsali collinari a direzione meridiana cui si intercalano valli con direzione circa nord – sud. Al limite meridionale dell'area collinare scorre il Fiume Adige con percorso meandriforme.

Il settore nord orientale del tracciato interessa il rilievo montuoso delle Torricelle. Quello nord occidentale si pone invece immediatamente a valle di Monte Ongarina, in un ambito di transizione fra collina e pianura. Infine il settore meridionale, dall'attraversamento dell'Adige sino a fine intervento, è pianeggiante e si sviluppa entro l'unità geomorfologica del Conoide dell'Adige, i cui depositi risultano scavati e terrazzati dall'azione erosiva di antichi corsi d'acqua. Mentre nelle zone montuose i caratteri salienti naturali e

caratteristici del territorio si sono sostanzialmente preservati, nel settore di pianura le morfologie erosivo-deposizionali minori sono state invece obliterate dalla forte antropizzazione del luogo.

Dal punto di vista litologico i rilievi montuosi sono costituiti da rocce calcareo marnose di età compresa fra l'Eocene ed il Miocene. In particolare la galleria delle Torricelle andrà ad interessare termini riferibili alla Formazione dei Calcari Nummulitici (Eocene medio – inferiore) su cui poggiano le Marne di Priabona (Eocene superiore) e limitati lembi di Calcareni (Eocene superiore). Il tratto di pianura interessa depositi alluvionali fluviali e fluvioglaciali, prevalentemente grossolani di tipo ghiaioso o sabbioso - ghiaioso, alternati a lenti discontinue di sabbia ed argilla. La zona di transizione fra rilievi e pianura è occupata da depositi alluvionali di fondovalle prevalentemente limoso sabbiosi.

Dal punto di vista idrogeologico l'area in studio è sede dell'acquifero indifferenziato veronese. Tale acquifero, di tipo freatico, è ospitato nel materasso alluvionale ghiaioso-sabbioso molto permeabile precedentemente descritto, ed ha una direzione di deflusso generale NNW-SSE. Dall'analisi delle isofreatiche tratta dalla "Carta idrogeologica dell'Alta Pianura dell'Adige" (Dal Prà e De Rossi, 1989) si evince come la falda si trovi sempre, pur considerando cautelativamente una sensibile escursione stagionale, a profondità superiori rispetto quelle interessate dalle opere.

Il tracciato attraversa ortogonalmente la valle di Avesa in corrispondenza di una piana alluvionale creatasi a seguito delle piene dei torrenti di Avesa e di Quinzano e intercetta, oltre ai due torrenti citati, anche il Lorì.

Pertanto le caratteristiche geometriche di progetto della strada e le peculiarità idrologiche dei torrenti rendono estremamente problematica la realizzazione di un tracciato in trincea aperta. Per queste motivazioni, appare necessario realizzare invece l'infrastruttura in galleria artificiale con una opportuna copertura.

### **7.2.3 Descrizione e caratteristiche dell'intervento**

Il collegamento viario si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 11,5 km chilometri, dallo Svincolo della Tangenziale Est su Via Fincato, fino allo svincolo di Verona Nord, in prossimità del casello autostradale della A22 "Del Brennero".

L'infrastruttura si compone di una prima tratta in galleria naturale di lunghezza pari a circa 2,2 km per l'attraversamento delle Torricelle, una seconda tratta in artificiale lunga circa 2,0 km in prossimità delle località Avesa e Quinzano e di una terza parte terminale in trincea.

Inoltre è previsto l'attraversamento del fiume Adige in viadotto di lunghezza pari a 220 m circa, ipotizzato in struttura metallica.

#### **7.2.3.1 Sezione tipo e tracciato**

La sezione tipo, di larghezza pari a 22,00 m, è assimilabile ad una strada tipo "B Extraurbane principali" ai sensi del Decreto 5/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e del Nuovo Codice della strada, aggiornato al D. Lgs. 27/06/2003 n. 151 e convertito in Legge 01/08/2003, n. 214.

La piattaforma stradale è così composta: due corsie per senso di marcia di 3,75 m, banchine in destra di 1,75 m, banchine in sinistra di 0,50 m e spartitraffico di 2,50 m. Ai margini della sezione per le tratte in trincea è stato posto un cunettone per il convogliamento delle acque e, laddove necessario, sono stati progettati muri di sottoscarpa di altezza variabile.

La sezione in galleria ha altezza libera non inferiore a 5,00 m in ogni punto della carreggiata, secondo le normative vigenti; sui lati è previsto un camminamento di servizio ed emergenza secondo quanto imposto dalle norme vigenti; sono stati previsti by-pass pedonali ogni 300 m, by-pass carrabili ogni 900 m e piazzole di sosta ogni 600 m.

La velocità di progetto è compresa tra 70 e 120 km/h. Il tracciato planoaltimetrico rispetta quanto imposto dalle norme; le curve planimetriche minime hanno raggi che superano sempre i mille metri e sono raccordati ai

rettifili con elementi a curvatura variabile aventi parametri adeguati. L'andamento altimetrico ha pendenze massime intorno al 4%.

Gli svincoli sono stati progettati secondo le vigenti "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali" del 19 aprile 2006. Lo schema utilizzato è quello denominato a "diamante" con rotonda a piano campagna.

### **7.2.3.2 Tipologie costruttive della galleria naturale**

La galleria naturale, fatta eccezione per le tratte d'imbocco, presenta generalmente una buona copertura costituita da un substrato di calcari, calcari marnosi e marne. In tale contesto si è ipotizzato un metodo di scavo tradizionale con due sezioni tipo principali.

Cautelativamente ed in via del tutto preliminare è possibile stimare un avanzamento per il 70% della lunghezza complessiva con una sezione senza preconsolidamenti o con preconsolidamenti leggeri, e per il rimanente 30% con una sezione con preconsolidamenti del fronte di scavo; quest'ultima in particolare sarà confinata in zona d'imbocco, nelle tratte a maggior grado di fratturazione (attraversamento delle zone di faglia) e più in generale nelle tratte a modesta copertura.

### **7.2.3.3 Tipologie costruttive della galleria artificiale o trincea coperta**

I tratti in galleria artificiale vengono realizzati adottando due distinti metodi: il metodo "Milano" e la realizzazione dello scatolare doppio a scavi aperti.

Il metodo "Milano" è applicato nelle zone antropizzate o di particolare interesse paesaggistico, poiché, anche in fase di costruzione, minimizza le occupazioni temporali di porzioni di territorio. Tale metodo consiste nella costruzione di due diaframmi che costituiscono le pareti verticali laterali della struttura e a seguire del solettone di copertura poggiante su di esse. Una volta realizzata la struttura, dall'interno avviene lo scavo a foro cieco del materiale e

può essere ripristinato immediatamente lo stato dei luoghi precedente l'esecuzione delle opere. A questo punto viene realizzato il solettone inferiore e completata la galleria.

Il metodo a scavi aperti si compone delle seguenti fasi: apertura degli scavi, costruzione in opera del manufatto scatolare e ripristino delle condizioni iniziali. Tale tecnica sarà applicata nelle tratte dove le condizioni al contorno lo permettono, infatti la lavorazione necessita di una occupazione provvisoria di territorio maggiore rispetto al metodo "Milano".

#### **7.2.3.4 Impianti**

Nel contesto dell'opera da realizzare il progetto prevede tutti gli impianti necessari, sia nelle tratte allo scoperto ed in particolare negli svincoli e sulle rotoatorie di interconnessione con la viabilità ordinaria, che in galleria, e saranno dotati delle prestazioni tecniche necessarie ad assicurare il più elevato grado di comfort e di protezione alla marcia dei veicoli, in conformità alla normativa in vigore.

I dispositivi impiantistici previsti comprendono:

- l'illuminazione lungo l'intero tracciato;
- la localizzazione delle vie di fuga;
- la ventilazione;
- il sistema di monitoraggio in continuo del traffico in galleria attraverso sistemi di ripresa TV a circuito chiuso;
- l'alimentazione in continuo delle utenze elettriche di base e delle strumentazioni di sicurezza;
- il sistema di richiesta di soccorso di tipo strumentale e a viva voce;
- la rete antincendio.

Inoltre è prevista una cabina elettrica principale, ubicata in prossimità dell'imbocco est della galleria Torricelle ed una cabina secondaria collocata all'incirca a metà della lunghezza dell'infrastruttura. L'alimentazione in sicurezza delle utenze in galleria viene attuata attraverso la presenza di fonti

energetiche indipendenti dall'alimentazione ENEL/AGSM, quali gruppi elettrogeni e gruppi statici di continuità.

#### **7.2.4 Inserimento ambientale**

Le misure di inserimento paesaggistico ed ambientale si possono suddividere in dirette ed indirette. Le prime sono finalizzate alla mitigazione degli impatti sul territorio e ad un corretto inserimento paesaggistico, quali, ad esempio, opere di difesa e presidio idraulico e idrogeologico e interventi di mitigazione acustica ed atmosferica. Le altre, volte alle compensazioni ambientali e paesaggistiche, non risultano strettamente necessarie ai fini del più corretto inserimento ambientale, ma sono legate alla pianificazione urbanistica, all'innescio di una operazione di riqualificazione e valorizzazione territoriale, mirata più a compensare gli effetti sul territorio della nuova infrastruttura, che a mitigarne gli impatti. In questo modo si assolve in primo luogo alla mitigazione degli effetti della nuova viabilità, mentre in secondo luogo si crea una sorta di filtro e di ricucitura ecologica.

Il tracciato proposto, che si sviluppa per più di un terzo in galleria, rende l'infrastruttura in esercizio in un certo senso "silenziosa". Le opere in sotterraneo non avranno infatti particolari problematiche dal punto di vista dell'inserimento paesaggistico; lo studio di dettaglio degli imbocchi potrà garantire un adeguato inserimento dell'opera nel contesto di particolare pregio ambientale, storico e paesistico delle colline delle Torricelle, ad est e delle zone di San Rocco e prossime a Parona, ad ovest.

D'alto canto, i tratti scoperti si sviluppano tutti in trincea, ad eccezione dei rilevati di appoggio ai viadotti necessari per scavalcare successivamente, procedendo da est verso ovest, il fiume Adige, il canale Biffis ed il Canale di bonifica Alto Veronese, pertanto può definirsi "silenziosa" anche perché il rumore dei veicoli verrà già in prima battuta contenuto dalle pareti delle trincee stesse, che costituiscono la migliore barriera acustica, per la forma e le libertà con cui si possono trattare o rivestire le superfici. Infine, risulta "silenziosa" in senso figurato, per il modo invisibile in cui si inserisce, per la

maggior parte dello sviluppo e soprattutto nelle zone più critiche, nel territorio, senza eliminare alcuna viabilità locale o modificare drasticamente il paesaggio.

Per quanto riguarda le opere di mitigazione diretta dovranno essere previste opportune opere di difesa e presidio idraulico ed idrogeologico, che comprendono sia sistemi drenanti per il mantenimento del continuum idraulico della rete idrografica superficiale, sia specifici invasi di raccolta e diversi trattamenti per le acque di prima e seconda pioggia scolanti dalla piattaforma stradale, nonché la protezione da sversamenti accidentali. Dalla piattaforma gli organi di recapito avvieranno rispettivamente le acque meteoriche o gli sversamenti accidentali alle vasche cosiddette “di prima pioggia”, nelle quali avverrà la separazione da sostanze grasse e solidi sedimentabili ed infine, verranno restituite in superficie mediante sollevamento meccanico.

Le barriere antirumore artificiali, a seconda delle necessità, potranno avere altezze e lunghezze variabili in funzione della dimensione longitudinale dell'area da proteggere. Sui rilevati e lungo i viadotti verranno posizionate alla minima distanza dalla carreggiata compatibilmente con le esigenze di sicurezza, legate alla sagoma limite degli automezzi e alla deformazione plastica della barriera di sicurezza, oppure potranno essere previste della tipologia cosiddetta “integrata”, ovvero barriera di sicurezza ed antirumore in un unico elemento verticale. In rilevato o in sommità alle trincee le barriere potranno anche essere mascherate da una successione di essenze vegetative a rapido sviluppo e molto fitte, per un migliore inserimento estetico-paesaggistico.

### **7.3 Progetto preliminare proposto da Technital S.p.A., Girpa S.p.A. e Verona Infrastrutture Consorzio Stabile**

Nella fase preliminare alla progettazione sono state eseguite indagini atte all'acquisizione di dati essenziali per la scelta della tipologia degli interventi di progetto. Gli studi condotti hanno evidenziato le criticità orografiche, geologiche, urbanistiche e le problematiche legate al sistema della viabilità del tessuto urbano e di attraversamento.

Acquisiti e sviluppati tali dati preliminari, sono state studiate alcune soluzioni progettuali per la realizzazione del collegamento, partendo dalla definizione del tracciato stradale e ponendosi come obiettivo la funzionalità, la fruibilità, la sicurezza e la compatibilità dell'opera. Pertanto l'attività di progettazione è stata avviata analizzando i requisiti geometrici e funzionali imposti dalle normative vigenti con particolare riferimento alla definizione degli elementi della sede stradale, alle verifiche planimetriche ed altimetriche nonché al coordinamento planoaltimetrico. In parallelo sono state analizzate le problematiche legate al territorio prevedendo le necessarie misure compensative e di mitigazione ambientale. Si è quindi avviato un percorso di lavoro su più fronti con lo spirito di procedere ad una contaminazione dei diversi approcci culturali mirato ad apportare al progetto preliminare quelle soluzioni estetiche tali da garantire la qualità architettonica e paesaggistica.

L'infrastruttura è stata quindi oggetto di una progettazione integrata nella quale hanno trovato un razionale equilibrio non solo la funzionalità ed i costi, ma anche la sicurezza e l'impatto sull'ambiente.

#### **7.3.1 Studio trasportistico**

Lo studio trasportistico è stato redatto al fine di valutare la domanda sulle nuove infrastrutture con diverse soglie temporali e l'efficacia della nuova infrastruttura in termini di miglioramento dei livelli di servizio della rete e dell'accessibilità urbana. E' stato elaborato tenendo conto delle modifiche al



sistema di offerta infrastrutturale proposto, inclusa la proposta di pedaggiamento sulla nuova infrastruttura, nonché aggiornando i dati di traffico di base con rilievi puntuali condotti ad hoc ed utilizzando un diverso modello di simulazione.

Le fonti di informazione utilizzate per ricostruire la domanda di traffico nello stato attuale si possono ricondurre essenzialmente alle seguenti:

- statistiche ISTAT, con particolare riferimento agli spostamenti relativi alla mobilità sistematica, su base provinciale e comunale;
- pubblicazioni AISCAT, dalle quali si è tratto il traffico autostradale sui tratti della A4 compresi tra Brescia e Padova e sulla A22 tra Verona e Brennero;
- statistiche autostradali, fornite da Autostrade per l'Italia e da Autostrade del Brennero, relative rispettivamente ai flussi classificati (leggeri e pesanti - commerciali) in entrata ed uscita dai caselli di Verona Sud e Verona Est (A4), e relative al casello di Verona Nord (A22);
- indagini di traffico pregresse (a cura della scrivente società) effettuate nel maggio 2007;
- infine è stata condotta un'indagine ad hoc, mediante l'esecuzione di conteggi manuali classificati di traffico e conteggi automatici con strumentazione radar.

### **7.3.1.1 Scenario previsionale**

In base all'analisi delle fonti sopraelencate, sono state identificate tre soglie temporali di riferimento per l'elaborazione degli scenari previsionali della domanda di traffico: 2014 (anno di entrata in esercizio della nuova infrastruttura), 2024 (termine del primo decennio di previsione) e 2034.

Per il primo periodo (2008 – 2014) si è adottato un tasso di evoluzione per il traffico passeggeri pari al 2%, mentre per il traffico merci su strada si è adottato un tasso pari a 2,5%.

Per quanto riguarda le merci, si tratta di tassi prudenzialmente inferiori a quelli previsti dalla programmazione europea, congruenti con le previsioni

medie effettuate a livello nazionale e regionale e certamente inferiori all'evoluzione effettivamente riscontrata sulla rete.

Per quanto riguarda i flussi di passeggeri i tassi adottati sono in linea rispetto alla pianificazione europea e nazionale; sovrastimati rispetto alle previsioni tendenziali del PRG, ma decisamente conservativi se confrontati con il traffico riscontrato negli ultimi anni sulla rete autostradale, soprattutto nel tratto afferente Verona.

Nei periodi successivi, ben al di fuori degli intervalli oggetto di previsione da parte dei documenti programmatici ufficiali, si sono adottati tassi medi annui leggermente più conservativi. Infatti per il periodo 2014 – 2024 si sono assunti rispettivamente tassi pari al 1,5% per i veicoli leggeri e al 2% per i mezzi pesanti; nel periodo 2024 – 2034, sono assunti rispettivamente tassi pari all'1% per i veicoli leggeri e al 1,5% per i mezzi pesanti.

I valori sono stati riassunti nel prospetto che segue (tabella 7.1).

<b>Periodo di previsione</b>	<b>Tassi adottati - merci</b>	<b>Tassi adottati - passeggeri</b>
2008-2014	2,5%	2,0%
2014-2024	2,0%	1,5%
2024-2034	1,5%	1,0%

Tabella 7.1: sintesi dei tassi medi annui di crescita del traffico merci e passeggeri adottati negli scenari di previsione.

Dallo studio è emerso con chiarezza che l'evoluzione naturale del traffico porterebbe ad una saturazione insostenibile delle strade asservite contestualmente alla penetrazione urbana e al traffico di attraversamento.

La nuova infrastruttura di progetto, soggetta a pedaggio, è risultata in grado di mantenere buoni livelli di servizio fino al 2024, cominciando a dare segnali di congestionamento al 2034 in una delle due direzioni, limitatamente al tratto compreso tra l'innesto con la tangenziale Est e lo svincolo del Saval.

La tangenziale nord assorbe carichi maggiori rispetto alla cosiddetta "strada di gronda" (complessivamente dell'ordine del 40%). Infatti il TGM

massimo (traffico giornaliero medio) supera il valore di 55.000 passaggi al 2034, nella tratta nord, come riportato in tabella 7.2.

Tratta	TGM	TGM	TGM
	Veicoli Commerciali	Veicoli Leggeri	Totale
Innesto Tang. Est–Svincolo Via Cà di Cozzi	3867	51856	55722
Svincolo Cà di Cozzi-Svincolo Via Preare	2044	29222	31267
Svincolo Via Preare-Svincolo Viale del Brennero/Valpolicella-S.P.1A	2167	31689	33856
Svincolo Viale del Brennero/Valpolicella-Svincolo Via Gardesane S.P.5	2289	33156	35444
Svincolo Via Gardesane S.P.5-Svincolo Via Bresciana S.R.11	2406	23033	25439
Svincolo Via Bresciana S.R.11-Innesto Verona Nord	2222	19089	21311

Tabella 7.2: TGM al 2034

Alla luce di quanto esposto si evince che l'infrastruttura in oggetto così collegata al sistema infrastrutturale esistente risulta fondamentale per il sistema viabilistico di penetrazione e di attraversamento della città.

### 7.3.2 Indicatori demografici e socioeconomici

La provincia di Verona si estende su un territorio di circa 3100 km<sup>2</sup> (di cui il Comune occupa circa il 7%), pari a circa un quinto dell'intera superficie regionale.

Il censimento effettuato nel 2001 ha rilevato una popolazione residente pari a circa 825 mila abitanti, circa il 20% della popolazione regionale, come illustrato dalla tabella 7.3.

L'evoluzione, riportata nella figura 7.2, rispetto ai censimenti precedenti ha saldo positivo (terza performance regionale), ancorché l'incremento percentuale sia piuttosto modesto (dell'ordine del 5% rispetto al 1991).

Territorio	Anni di censimento			
	1971	1981	1991	2001
<b>Verona</b>	<b>733 595</b>	<b>775 745</b>	<b>788 343</b>	<b>826 582</b>
Vicenza	677 884	726 418	747 957	794 317
Belluno	221 155	220 335	212 085	209 550
Treviso	668 620	720 580	744 038	795 264
Venezia	807 251	838 794	820 052	809 586
Padova	762 998	809 667	820 318	849 857
Rovigo	251 908	253 508	248 004	242 538
<b>Regione Veneto</b>	<b>4 123 411</b>	<b>4 345 047</b>	<b>4 380 797</b>	<b>4 527 694</b>
<b>ITALIA</b>	<b>54 136 551</b>	<b>56 556 911</b>	<b>56 778 031</b>	<b>56 995 744</b>

Tabella 7.3: popolazione residente nella provincia di Verona.

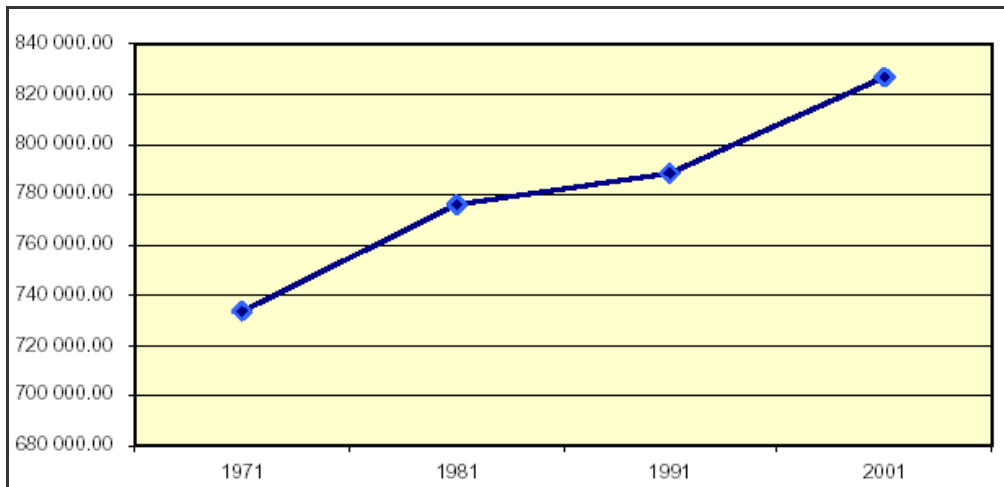


Figura 7.2: andamento della popolazione residente nella provincia di Verona.

Più interessante è l'analisi dettagliata della dinamica della popolazione, inclusa la dinamica migratoria, nella più recente serie storica 2003 – 2006.

Come si vede nella figura 7.3 e nella tabella 7.4 la popolazione residente, inclusi i cittadini stranieri iscritti all'anagrafe dei comuni, rivela tassi più accentuati.

Va rilevato poi che rispetto al tasso di incremento naturale (bilancio tra i tassi di natalità e mortalità), comunque in ripresa e positivo, il saldo migratorio e la crescita totale hanno indici relativamente superiori, dell'ordine dell'1% medio annuo.

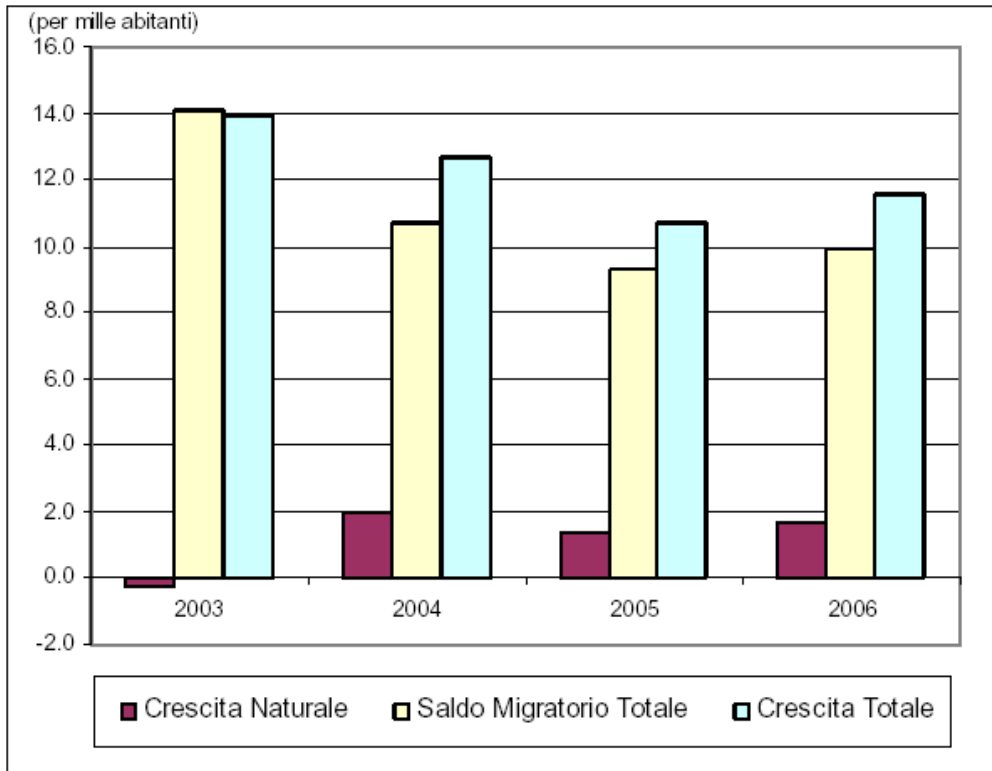


Figura 7.3: tassi di incremento e saldo migratorio della popolazione residente nella provincia di Verona – anni 2003 – 2006 (per 1000 abitanti).

Dinamica demografica (valori per 1000 abitanti)	2003	2004	2005	2006
Crescita Naturale	-0.2	2.0	1.4	1.7
Saldo Migratorio Totale	14.1	10.7	9.3	9.9
Crescita Totale	13.9	12.7	10.7	11.6

Tabella 7.4: dinamica demografica nella provincia di Verona.

### 7.3.3 Descrizione dell'intervento

L'asse principale si sviluppa dallo svincolo con la tangenziale est di Verona fino alla tangenziale ovest in prossimità del casello di Verona Nord sull'Autostrada A22 del Brennero. La lunghezza totale dell'intervento è di circa 12 chilometri, ma nel nostro studio ci occupiamo principalmente dei tratti in sotterraneo.

La progressiva 0+000 è ubicata ad est, alla fine della esistente tangenziale; in questa zona è previsto il primo svincolo, denominato Via Fincato, in quanto si raccorda all'omonima strada e alla SP6 della Valpantena.

Il tracciato imbecca quindi l'opera più rilevante, costituita dal Traforo delle Torricelle, che si sviluppa sotto l'omonima collina, con sezione policentrica (2226 m), per proseguire in galleria artificiale (1829 m), superando le località di Avesa e Quinzano. Nella prima parte del tracciato l'andamento planimetrico è abbastanza regolare con curve circolari che rispettano i minimi normativi; l'andamento altimetrico presenta pendenze modeste che non superano il 2%, quindi inferiori al valore massimo imposto dalla normativa (6% per strade di tipo "B"). Nella tratta in galleria naturale è stato predisposto un sistema di trattamento dei fumi che prevede due stazioni: una all'imbocco est ed una all'imbocco ovest. La galleria è dotata di piazzole di sosta ogni 600 metri, by-pass carrabili ogni 900 metri e by-pass pedonali ogni 300 metri, come prescritto dal D.M. 5 novembre 2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade". In figura 7.4 viene riportato l'andamento della galleria naturale.



Figura 7.4: primo tratto galleria naturale.

Anche per il tratto in galleria artificiale (mostrato in figura 7.5) sono state predisposte le piazzole di sosta, i by-pass carrabili e le uscite pedonali laterali di sicurezza con i medesimi interassi dei by-pass pedonali della galleria naturale. L'utente che percorrerà la galleria non percepirà differenze

funzionali, tra il tratto in naturale e quello in artificiale: il Traforo verrà inteso come un unico tunnel di lunghezza complessiva pari 4,2 km

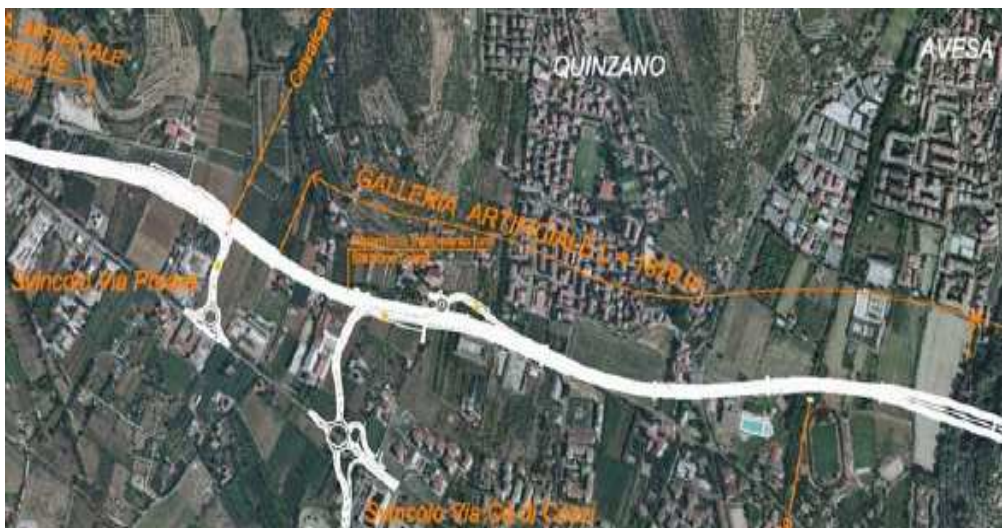


Figura 7.5: secondo tratto galleria artificiale.

All'uscita della galleria artificiale, in località S.Rocco, sono ubicati rispettivamente gli svincoli di Via Cà di Cozzi e di via Preare, che collegano la parte est della città a Via Mameli e Parona, nonché alla circonvallazione interna (ponte del Saval) e all'Ospedale Maggiore. Questi due svincoli, così ravvicinati, in realtà funzionalmente costituiscono un unico sistema di svincolo; Via Preare a servizio delle manovre da e per la zona Ovest (Verona Nord – Tang. Ovest), mentre Via Cà di Cozzi per le percorrenze da e per la zona est (Via Fincato – Tangenziale Est).

### 7.3.4 Galleria naturale

Il progetto in oggetto prevede la realizzazione di una galleria che consente il collegamento tra la tangenziale est in prossimità di Via Colonnello Fincato e via Parona.

Si tratta di una galleria a doppia canna, con una piattaforma stradale di tipo "B", ciascuna delle quali è caratterizzata da un raggio interno di 6,10 m, come previsto dalla Circolare ANAS del novembre 2005, in modo da contenere una carreggiata con le stesse caratteristiche geometriche di quella all'esterno,

con una larghezza complessiva di 9,75 m, comprendenti le due corsie di marcia da 3,75 m ciascuna, una banchina in sinistra di 0,50 m ed una in destra di 1,75 m; essa è delimitata ai due lati da New Jersey gettati in opera o prefabbricati pressoché a ridosso dei piedritti della galleria stessa.

Come mostrato dalla figura 7.6 l'altezza libera minima prevista è pari a 5,00 m in corrispondenza della carreggiata e 4,80 m in corrispondenza della banchina, come previsto dal D.M. 5/11/2001.

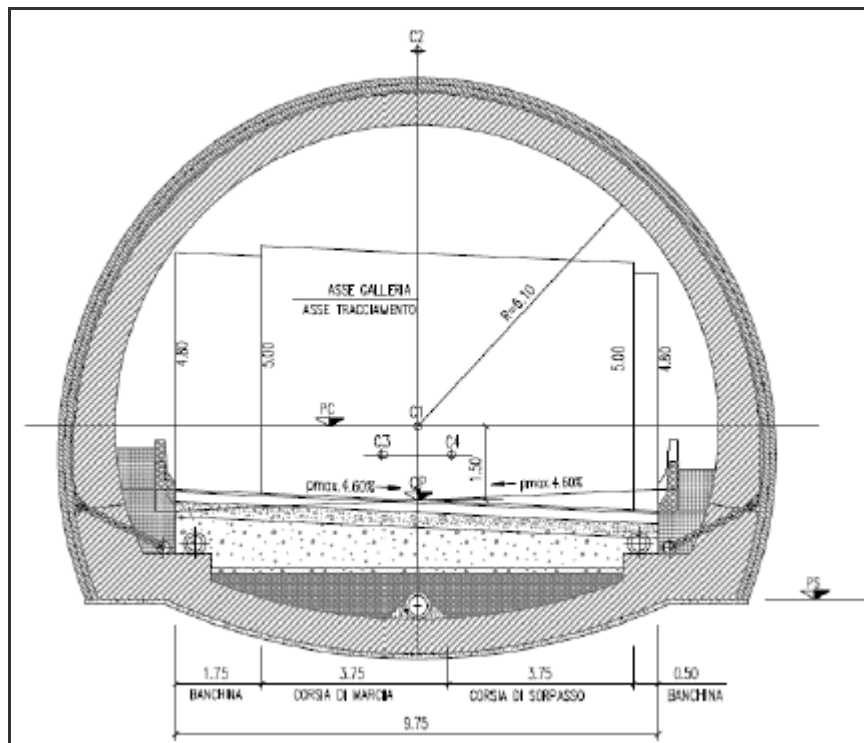


Figura 7.6: sezione tipo in galleria naturale.

Nelle due canne si è prevista l'ubicazione di una nicchia per l'S.O.S. ogni 150 m circa e di piazzole di sosta, di lunghezza pari a 60 m, ogni 600 m al massimo in corrispondenza di ciascuna di esse.

Le due canne sono inoltre collegate tra di loro mediante by-pass pedonali e carrabili, i primi posti a una distanza di circa 300 m l'uno dall'altro, mentre i by-pass carrabili posti in modo da rispettare l'interasse di 900 m previsto dal D.M. 5/11/01.

Per quanto riguarda il collettamento delle acque, si prevede una separazione tra quelle di piattaforma e quelle provenienti dai drenaggi esterni



collegati con l'impermeabilizzazione; le prime, infatti, dovranno essere trattate poiché contengono i residui provenienti dal traffico (oli, residui solidi, ecc.) e possono essere anche costituite da liquidi provenienti da sversamenti accidentali di automezzi. Le seconde sono invece acque pulite che possono pertanto essere restituite tranquillamente al ricettore naturale più vicino, senza alcun trattamento.

Si prevede inoltre l'adozione di una pavimentazione in calcestruzzo (tranne le prime decine di metri agli imbocchi), che presenta diversi vantaggi rispetto a quella tradizionale in conglomerato bituminoso: primo fra tutti quello di non contribuire alla combustione in caso di incendio, oltre a una maggiore durabilità; riduzione del rumore e luminosità che migliorano la sicurezza, abbassando il rischio di incidenti e favorendo il risparmio energetico in fase di esercizio, fatti particolarmente importanti soprattutto nel caso di gallerie così lunghe. La pendenza longitudinale ha valori molto contenuti (0,5%), in ottemperanza alle indicazioni del D.M. 05/11/2001.

La pavimentazione prevista è caratterizzata da un pacchetto, realizzato al di sopra del materiale di riempimento, costituito da uno strato di misto stabilizzato avente spessore pari a 30 cm e da una lastra di calcestruzzo non armato di spessore totale 25 cm, a sua volta composta, per i primi 20 cm, da calcestruzzo di classe Rck 35 e per i 5 cm superiori da calcestruzzo Rck 40 con inerte "duro", coadiuvato da un trattamento superficiale per l'asporto delle particelle fini.

Il conglomerato cementizio viene realizzato in due fasi, producendo piastre lunghe circa 6 m, con la larghezza della carreggiata divisa in 3 parti. I giunti trasversali sono armati come giunti di dilatazione, con barre di compartecipazione solidarizzate ad una delle piastre e libere di scorrere in una guaina in quella adiacente; i giunti longitudinali sono invece collegati da barre in acciaio ad aderenza migliorata annegate nel calcestruzzo.

Gli imbocchi delle gallerie vengono realizzati con l'ausilio di paratie tirantate eseguite con micropali o palificate che saranno in fase definitiva interamente ricoperte con terreno di riporto o terre armate.

La copertura massima dell'opera risulta di circa 150 m con un tracciato che si sviluppa ai piedi dei rilievi che si trovano immediatamente a monte della città di Verona. La galleria interessa i depositi lapidei del substrato che costituisce i rilievi montuosi e si sviluppa prevalentemente entro calcareniti e calcari nummulitici; si tratta di un ammasso roccioso che si presenta sotto forma di strati e banchi di spessore variabile da pochi decimetri a parecchi metri. I giunti di strato sono scabri e spesso ondulati, raramente riempiti da interstrati marnosi, talora interrotti da dissoluzione carsica o riempiti da terra rossa residuale.

Esso si presenta nel complesso con buone caratteristiche geomeccaniche e solo localmente potranno essere presenti zone di faglia con materiale molto fratturato e disarticolato. Non si prevede la presenza d'acqua in fase di scavo, se non condizioni di stillicidio diffuso in corrispondenza delle stesse faglie o delle zone dove l'ammasso si presenta maggiormente carsificato. In zona d'imbocco si prevede la presenza di coltri detritiche e materiale alterato ed allentato della formazione in posto, per spessori modesti.

La tipologia di avanzamento prevede lo scavo a piena sezione con tecnica tradizionale. In base alla litologia, alle coperture ed alle caratteristiche geomeccaniche dei materiali attraversati, si sono individuate quattro sezioni tipo denominate, in base al comportamento dell'ammasso allo scavo, tipo A0, A1, B1 e B3.

Laddove l'ammasso roccioso interessato dallo scavo presenta un comportamento di tipo A, "fronte stabile", lo scavo è seguito, nel caso in cui la litologia e la giacitura favorevole degli strati lo consente, dalla messa in opera di una bullonatura radiale sistematica e di uno strato di spritz-beton (Sezione tipo A0) o da una centina metallica singola o doppia con spritz-beton (Sezione tipo A1), come rappresentato dalle figure 7.7 e 7.8.

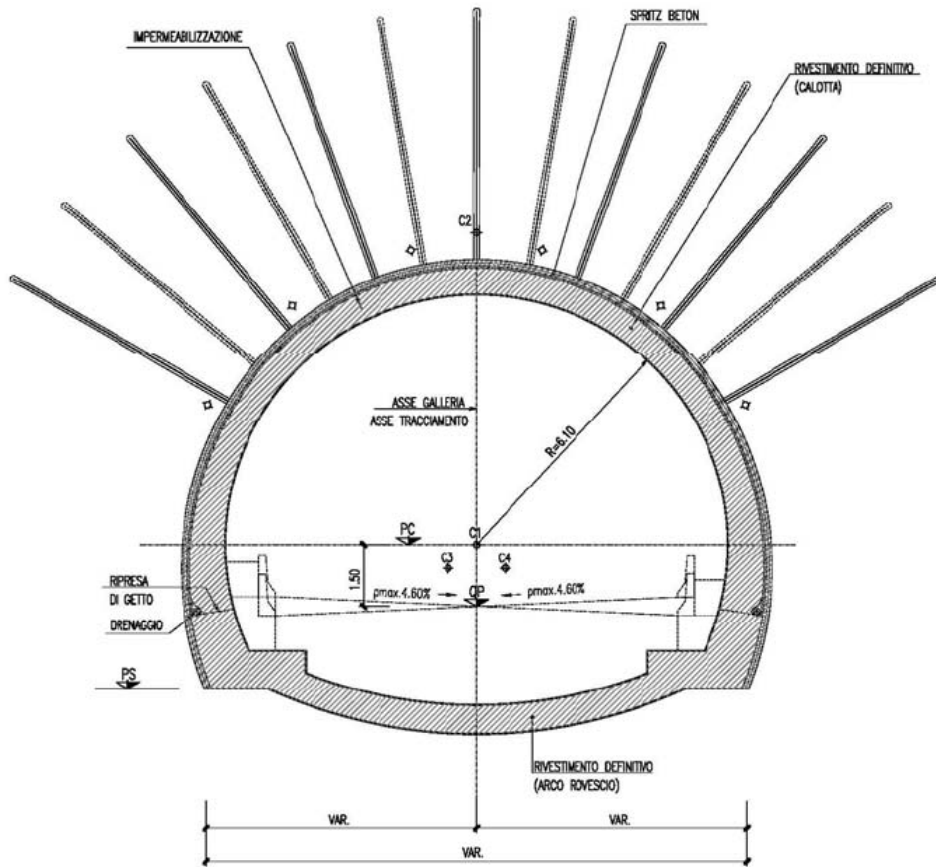


Figura 7.7: sezione tipo A0.

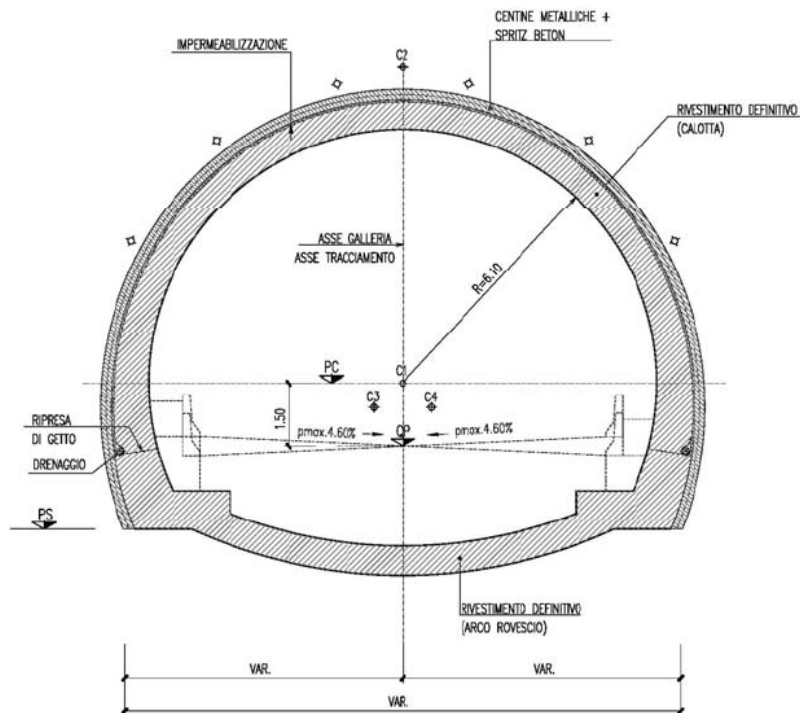


Figura 7.8: sezione tipo A1.

Nelle tratte in cui l'ammasso presenta un comportamento tipo B, "fronte stabile a breve termine", qualora i soli interventi di contenimento del cavo non risultassero sufficienti si potrà prevedere: la realizzazione di interventi di presostegno del fronte di scavo mediante la messa in opera di una coronella di tubi al contorno (Sezione Tipo B1), ed in ultimo la realizzazione di un intervento di consolidamento in avanzamento del fronte di scavo costituito da elementi strutturali in VTR volti a contrastare l'evoluzione dei fenomeni deformativi in presenza di materiali alterati nelle zone di faglia o nelle zone alterate in prossimità degli imbocchi (Sezione tipo B3). Gli interventi al fronte verranno dosati quantitativamente e geometricamente in funzione della situazione geologica presente al fronte in fase di scavo. Tali sezioni sono associate alla realizzazione del rivestimento di prima fase in centine e spritz-beton (vedi figure 7.9 e 7.10).

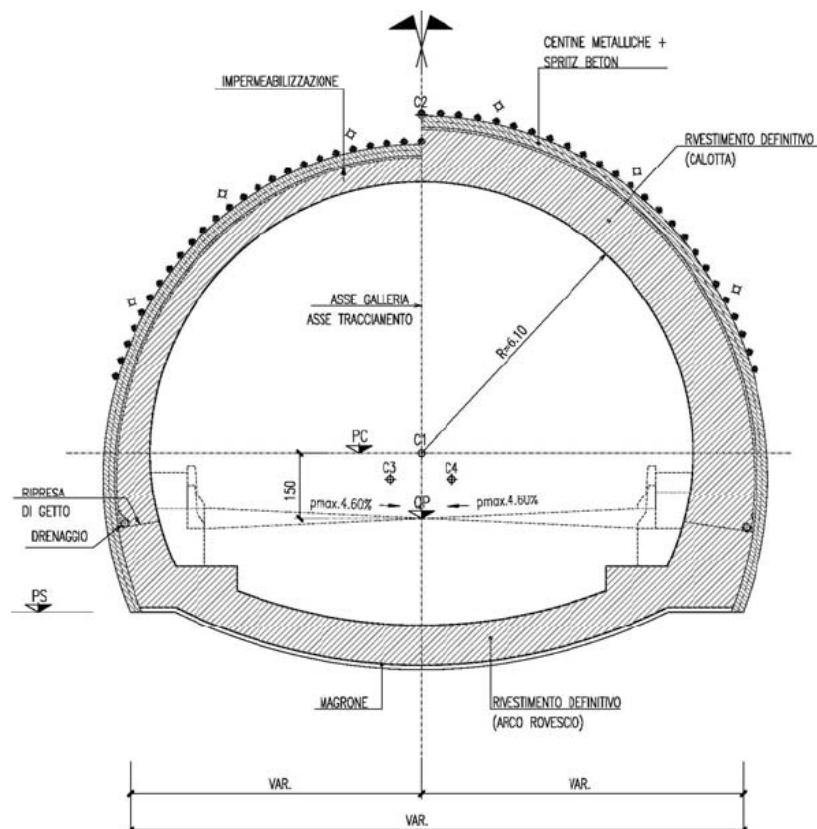


Figura 7.9: sezione tipo B1.

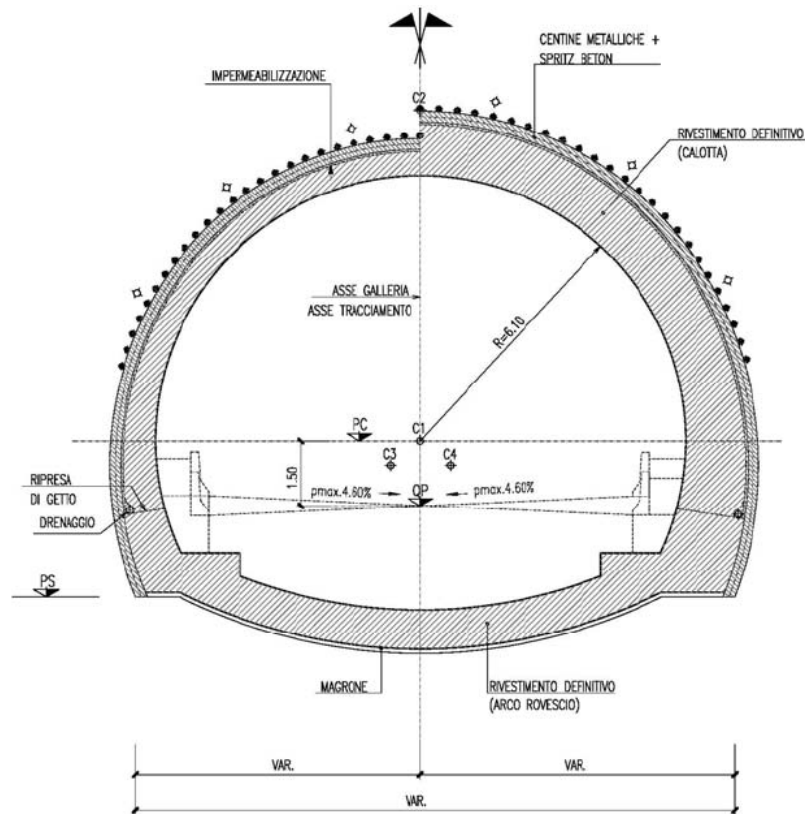


Figura 7.10: sezione tipo B3.

### 7.3.5 Galleria artificiale

Dalla progressiva 3+094 circa, in corrispondenza dello sbocco della galleria naturale, inizia il tratto di galleria artificiale di lunghezza pari a circa 1829 m fino a terminare alla progressiva 4+923 circa.

Le gallerie artificiali certamente rivestono notevole importanza soprattutto per le caratteristiche orografiche che il tracciato incontra durante il suo sviluppo e che di riflesso caratterizzano le modalità costruttive delle opere stesse.

L'opera non prevede particolari fasi costruttive, in quanto, si tratta della realizzazione di un tipico fornice stradale eseguito con getto in opera.

La galleria presenta una sezione tipo in doppia canna separata, la tipologia prevista per la realizzazione delle gallerie artificiali di progetto, prevede che la piattaforma sia organizzata come di seguito specificato:

- due corsie per senso di marcia ciascuna di larghezza pari a 3,75 m;

- una banchina laterale di larghezza pari a 1,75 m;
- margine interno pari a 0,50 m;

Anche in questo caso la pendenza longitudinale ha valori molto contenuti, pari a 0,5%, in ottemperanza alle indicazioni del D.M. 05/11/2001.

Su ambedue i margini è stato previsto l'inserimento di barriere a profilo ridirettivo e l'altezza libera minima prevista è pari a 6.10 m come mostrato dalla figura 7.11.

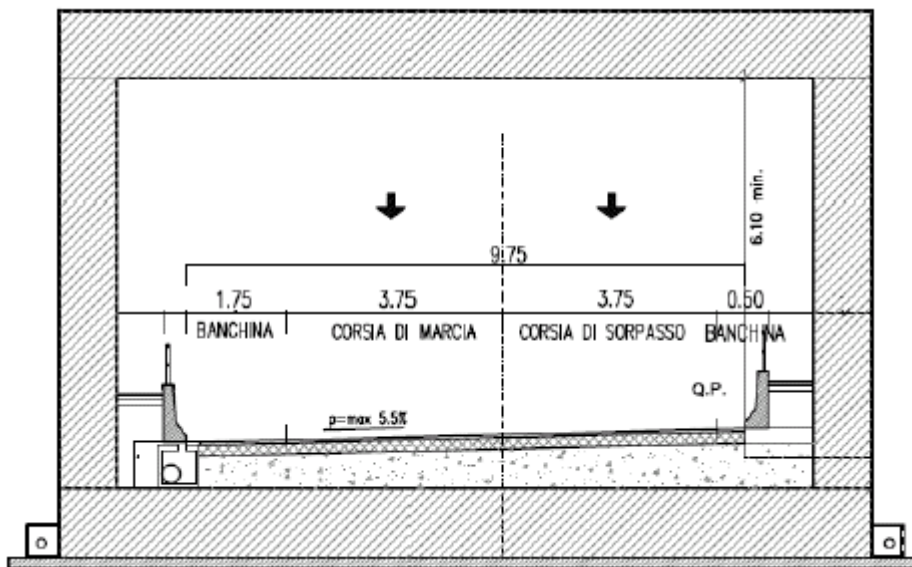


Figura 7.11: sezione tipo in galleria artificiale.

### 7.3.6 Impianti tecnologici

Saranno previsti tutti gli impianti necessari e saranno dotati delle prestazioni tecniche fondamentali per assicurare il più elevato grado di comfort e di protezione alla marcia dei veicoli, in conformità alla normativa in vigore.

#### 7.3.6.1 Impianti di illuminazione in galleria

Gli impianti dovranno fornire adeguate prestazioni tecniche quali:

- a) illuminazione differenziata delle diverse zone del fornice di galleria, ed adozione di valori di luminanza diversificati, in conformità alla Norma UNI 11095, articolata in:

- illuminazione di rinforzo all'imbocco nel tratto di soglia;
  - illuminazione di rinforzo all'imbocco nel tratto di transizione;
  - illuminazione permanente del tratto interno;
  - illuminazione di rinforzo agli sbocchi dei singoli fornicci di galleria Torricelle.
- b) illuminazione differenziata tra ciclo diurno e ciclo notturno con la regimentazione dei valori di luminanza interna in funzione della condizione meteorologica e della realtà temporale della luminanza diurna esterna.

### **7.3.6.2 Impianti di illuminazione di evacuazione**

Sui camminamenti laterali protetti a fianco della sede stradale in galleria, al fine di garantire gli utenti che sgombrano a piedi il fornice in caso di emergenza, è necessario predisporre un impianto di illuminazione “di evacuazione” costituito da un corpo illuminante installato sul piedritto da ambedue i lati della carreggiata, in modo da creare una “linea di luce” che conduce gli utenti al luogo sicuro più vicino o all'esterno della galleria.

L'alimentazione del sistema sarà effettuata in bassissima tensione, al fine di ridurre al minimo i rischi di fulminazione in caso di contatto, e sarà sostenuta dal sistema elettrico in emergenza sotto gruppo statico di continuità con una autonomia di funzionamento minima di 30 minuti.

### **7.3.6.3 Impianti di ventilazione in galleria**

In considerazione della tipologia di traffico monodirezionale, dei regimi di percorrenza dei veicoli in galleria e della lunghezza dei fornicci della galleria Torricelle, il progetto prevede la dotazione di un sistema di ventilazione di tipo longitudinale per la movimentazione degli inquinanti e dei fumi in galleria; l'impianto sarà dimensionato in modo da contenere il limite di inquinamento entro i dettami tecnici previsti da PIARC 1995.

Gli impianti di ventilazione dovranno fornire le seguenti prestazioni:

- il controllo dei valori di inquinamento interno ai singoli fornici in modo sistematico attraverso il monitoraggio del valore della concentrazione di monossido di carbonio presente all'interno dell'atmosfera della galleria e del grado di riduzione della visibilità attraverso il monitoraggio delle particelle incombuste in sospensione presente all'interno dei fumi dei gas di scarico;
- il controllo dell'entità di traffico attraverso il sistema di telecamere a circuito chiuso;
- la misura dell'entità del vento quale contributo algebrico della ventilazione naturale;
- il rinnovo programmato dell'atmosfera di galleria attraverso opportuni cicli di intervento/ricambi programmati nelle condizioni di maggiore traffico;
- il controllo del grado di efficienza delle apparecchiature aerauliche e di alimentazione di emergenza in galleria attraverso un programma di attivazione frazionata.

La disposizione dei ventilatori, per il sistema di ventilazione longitudinale, dovrà essere di tipo a pacchetto con una distribuzione omogenea a partire in prossimità degli imbocchi con l'uso di apparecchiature adatte per operare in presenza di fumi con temperatura di 400°C e continuità di esercizio non inferiore a 2 ore.

Il sistema di ventilazione, in relazione all'entità del livello di inquinamento atmosferico interno, sarà collegato alla cartellonistica a messaggio variabile prevista nel senso di marcia agli imbocchi di ogni fornice di galleria in modo da segnalare il livello di servizio al transito.

Caratteristiche tecniche:

- diametro girante: 1000 mm;
- portata aria: 24,0 m<sup>3</sup>/s;
- spinta in aria ferma: 900 N;
- velocità in uscita aria: 30,5 m/s;
- velocità di rotazione: 1470 giri/min;



- potenza motore: 27 kW;
- potenza assorbita: 24,5 kW;
- livello di rumorosità: 71 dB(A) a 10 m a 45° in campo libero emissione emisferica;
- corrente a pieno carico: 45 A / 26,2 A;
- corrente allo spunto in c.a.: 353 A / 205 A;
- rendimento motore: 90%;
- $\cos \Phi$ : 0,89;
- classe isolamento: H;
- alimentazione elettrica: trifase 660V – 50Hz;
- temperatura max: 400°C per 2 ore in emergenza.

Il ventilatore dovrà essere equilibrato dinamicamente, con un valore massimo efficace di 2,8mm/s secondo ISO 13350:1999. Tale valore, che è relativo ad un montaggio rigido, è ugualmente richiesto per motivi di sicurezza.

Fra ventilatore e telaio di sostegno dovranno essere previsti antivibranti del tipo a molla con perni in acciaio inox, il grado di isolamento minimo deve essere dell'85%.

#### **7.3.6.4 Impianti di segnalazione di soccorso**

All'interno delle gallerie, ogni 150 m circa, saranno installati armadi stagni nei quali sono contenute le seguenti apparecchiature:

- pulsanti di chiamata (soccorso meccanico, soccorso medico, segnalazione incendio, segnalazione emergenza);
- postazione per la comunicazione in fonia;
- periferica di acquisizione dei segnali di richiesta soccorso;
- prese di servizio e manutenzione.

La segnaletica verticale di indicazione delle postazioni di emergenza sarà di tipo luminoso con pellicola rifrangente.

La presenza di una condizione di emergenza segnalata attraverso il sistema di segnalazione soccorso generalizzata modificherà automaticamente il

pittogramma dei semafori elettronici posti all'imbocco e lungo i fornici di galleria inibendo la transitabilità delle piste di fornice.

#### **7.3.6.5 Impianti di segnalazione e spegnimento incendi in galleria**

Al fine di combattere efficacemente gli eventuali incendi che si potessero sprigionare in galleria, il progetto prevede la realizzazione degli impianti di rilevazione e spegnimento incendi ad acqua in corrispondenza delle postazioni di segnalazione soccorso.

A questo proposito il progetto prevede la dotazione di sistemi di monitoraggio della temperatura interna ai fornici mediante l'uso di cavo termosensibile a guida laser associato a centraline di rilevamento in grado di ripartire il tracciato di galleria in zone monitorate con passo di 10 m. Il monitoraggio dei due fornici sarà attuato in modo indipendente attraverso due dorsali direttamente attestate sulle rispettive centrali ubicate all'interno delle cabine elettriche.

L'impianto di spegnimento sarà costituito da una rete di distribuzione idrica del tipo chiuso ad anello, installata all'interno della galleria in sede "protetta" sotto entrambi i marciapiedi laterali di destra di ciascuna carreggiata, allo scopo di fornire acqua in quantità adeguata per combattere, tramite gli idranti ed i naspi ad essa collegati, l'incendio di maggiore entità ragionevolmente prevedibile nell'area protetta della galleria in questione.

Tale impianto comprenderà i seguenti componenti principali:

- alimentazione idrica tramite allacciamento alla rete acquedottistica di pubblica derivazione, tramite una condotta dedicata ad un'apposita riserva idrica costituita da una vasca di accumulo in c.a. da costruirsi in posizione interrata in adiacenza ad una delle cabine di alimentazione elettrica posta agli imbocchi della galleria;
- rete di tubazioni fisse, chiuse ad anello, permanentemente in pressione, ad uso esclusivo antincendio, mantenuta in pressione per mezzo di gruppo di pressurizzazione omologato UNI 9490;

- cassette con idranti ad interasse medio di 75 m e naspi ad interasse di 150 m alloggiati all'interno degli armadi S.O.S.;
- valvole di intercettazione ed attacchi agli imbocchi delle gallerie per i Vigili del Fuoco.

#### **7.3.6.6 Impianti di segnalazione fissa ed a messaggio variabile**

In corrispondenza degli imbocchi di galleria sarà prevista la segnaletica semaforica a 3 luci a bandiera dotata di pittogramma a messaggio variabile riportante lo stato di transitabilità delle corsie in galleria, associata al sistema di segnalazione di soccorso all'interno del tunnel.

La cartellonistica luminosa segnerà, oltre al messaggio base, l'indicazione di:

- lavori in galleria;
- code per presenza di veicoli fermi in galleria;
- galleria chiusa;
- incidente in galleria.

In corrispondenza dei by-pass saranno localizzate le vie di esodo lungo i piedritti di galleria mediante cartellonistica di orientamento opportunamente illuminata.

#### **7.3.6.7 Impianto di TV a circuito chiuso**

La dotazione di un sistema di ripresa video a circuito chiuso in galleria consente la percezione continua degli eventi verificati all'interno dei forni dal centro di presidio remoto.

Il centro di presidio dovrà consentire:

- il monitoraggio dello stato di servizio delle gallerie dotate di tecnologie impiantistiche diverse quali impianti di illuminazione e ventilazione;
- una supervisione correlata alla transitabilità della sede stradale con l'operatività dell'impiantistica di dotazione;

Da ogni cabina elettrica sarà possibile remotare il segnale verso un centro di presidio ed inoltre il sistema di monitoraggio video dovrà permettere:

- il riscontro automatico dei veicoli fermi sulla carreggiata;
- di verificare in tempo reale la formazione di code all'interno dei fornici di galleria e la conseguente possibilità di preavvisare, attraverso il sistema di informazione con l'attivazione della cartellonistica a messaggio variabile, l'utenza sullo stato di transitabilità del fornice di galleria;
- l'individuazione di autori di atti vandalici;
- la presenza di soggetti diversi dall'utenza autostradale all'interno dei fornici quali animali randagi o pedoni che camminano lungo la banchina.

#### **7.3.6.8 Impianto di telecontrollo**

Il sistema di telecontrollo dovrà prevedere la restituzione dei diversi stati di allarme provenienti dalle periferiche di galleria e di cabina elettrica, ed il riscontro dei principali parametri funzionali degli impianti di illuminazione e ventilazione, delle strumentazioni presenti sui quadri di media e bassa tensione su postazioni di presidio locale denominate sub-centro ed il trasferimento remoto ad un centro di presidio.

I parametri interessati dalle "unità remote" dovranno essere convogliati ai "subcentri" di controllo, all'interno delle cabine elettriche di tratta e quindi centralizzati a loro volta al "Centro Primario gestionale di telecontrollo".

Dal centro primario di telecontrollo verranno attivati i "Servizi di manutenzione" e/o i mezzi di emergenza (ambulanza, polizia stradale, VV.FF.) in caso di incidente stradale o incendio in galleria.

Ai "Servizi di manutenzione" perverranno:

- le richieste di manutenzione ordinaria e/o straordinaria;
- la manutenzione programmata ricavabile dai tabulati che evidenziano i parametri specifici dello stato di funzionamento o del livello strumentale delle apparecchiature poste sotto controllo.

La rete di teletrasmissione prevista lungo il tracciato stradale sarà costituita da cavo multifibra equipaggiato con fibre ottiche di tipo monomodale e multimodale.

La flessibilità del sistema consente, anche in seguito, di attuare scelte logistiche anche diverse rispetto alla soluzione progettuale ipotizzata e soprattutto consente l'introduzione apparati anche in tempi successivi adeguati al progredire delle tecnologie trasmissive conseguenti all'immissione sul mercato di materiali ad apparecchiature innovativi.

I segnali analogici e digitali trasmessi dalle periferiche di cabina elettrica verranno raccolti dal centro di presidio, qui elaborati e presentati all'operatore attraverso una interfaccia uomo/macchina per mezzo di schermate a video e tabulati grafici di registrazione degli eventi.

#### **7.3.6.9 Trattamento dei fumi**

Le soluzioni sotterranee in galleria offrono netti miglioramenti da un punto di vista ambientale rispetto alle costruzioni all'aperto, tuttavia, dato che le emissioni sono contenute all'interno, devono essere valutati alcuni aspetti in corrispondenza dei portali d'uscita, per controllare e mitigare la qualità dell'aria scaricata.

Il problema consiste nel restituire l'aria in superficie, in modo da non causare impatti inaccettabili sulla popolazione e soprattutto sulla salute.

Un sistema ben noto ed usato frequentemente è quello di scaricare l'aria vicino all'uscita delle gallerie, mediante condotti di ventilazione.

Vari studi mostrano che un'ubicazione idonea di questi condotti, altezza (circa 20 metri) e velocità di aspirazione dell'aria (circa 25 m/sec.), offrono concentrazioni di caduta degli inquinanti sostanzialmente accettabili per l'ambiente, ma non per la componente sociale, che percepisce sempre la soluzione in modo negativo.

Essendo i gas generati dalle emissioni, CO, NO<sub>x</sub> ad oggi ridotti grazie alle Direttive UE, entrate in vigore negli ultimi decenni, i fattori più

discriminanti e nocivi per la salute umana rimangono la fuliggine e il particolato (PM).

Anche se l'introduzione dell'EURO 4 ed, in futuro, dell'EURO 5 ridurranno l'emissione di polveri sottili, l'aumento congenito alla domanda di mobilità si contrapporrà alla riduzione, mantenendo sempre critico il contenuto di particolato nell'aria.

Pertanto è stato adottato per l'infrastruttura in oggetto un innovativo sistema di filtrazione ad aspirazione elettrostatica dell'aria in uscita della galleria, in grado di raggiungere alte percentuali di abbattimento del particolato sospeso totale (TSP), formato principalmente da polveri comprese tra i 2,5  $\mu\text{n}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) ed i 10  $\mu\text{n}$  ( $\text{PM}_{10}$ ).

#### **7.3.6.10 Opere civili**

Le opere civili asservite agli impianti tecnologici consistono nella realizzazione delle opere murarie per le cabine elettriche, dei blocchi di fondazione dei punti luce e delle torri faro, degli scavi per la posa dei cavidotti e del loro rinterro, dei plinti di fondazione dei pali, dei muri di sostegno per la formazione dei sedimi di insediamento delle cabine elettriche e dei manufatti interrati per l'alloggiamento dei serbatoi di stoccaggio del gasolio per i gruppi elettrogeni.

## **7.4 Progetto preliminare proposto da Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A..**

L'oggetto specifico di questa proposta è funzionale alla realizzazione dell'anello completo della Tangenziale Nord, dallo svincolo di Verona Nord a quello in corrispondenza dello sbocco della galleria Torricelle in prossimità di Fincato.

La realizzazione di tale collegamento consentirà il completamento dell'anello di tangenziali della città.

La concezione di una nuova importante arteria stradale, come la Tangenziale Nord di Verona, non può prescindere dall'applicazione di moderni concetti di sicurezza, innanzitutto "attiva", cioè quando si pone come obiettivo la diminuzione della probabilità di incidente, ed in secondo luogo "passiva", cioè quando è mirata all'attenuazione della gravità delle conseguenze dell'incidente stesso.

Ovviamente gli aspetti importanti della sicurezza di un'infrastruttura viaria sono: visibilità, leggibilità, equilibrio dinamico del veicolo, possibilità di recupero, sicurezza passiva, nonché la coerenza di tutti gli elementi della strada.

Inoltre negli ultimi anni l'aspetto della sicurezza in galleria ha assunto un'importanza sempre più maggiore, sino a trovare compimento nell'emanazione della Direttiva Europea 2004/54/CE, con il recepimento da parte del governo italiano avvenuto attraverso il D.Lgs. 5/10/2006 n.264.

Le misure di sicurezza necessarie in un tunnel, rientrano in buona sostanza all'interno di tre grandi categorie:

- *misure ed indicazioni infrastrutturali* legate alla geometria della galleria, dei suoi locali accessori e della piattaforma stradale;
- *predisposizioni e requisiti propriamente strutturali*;
- *dotazioni impiantistiche*.

Pertanto si evince che il progetto di una "strada sicura in galleria" non può che essere affrontato in un ambito fortemente multi-disciplinare che porta a concepire in modo organico il progetto, tenuto conto che gli esigui spazi a

disposizione in galleria, finiscono per legare fortemente tutte le varie componenti tecniche.

### **7.4.1 Studio trasportistico**

La tecnica adottata per la redazione dello studio è basata sulle metodologie quantitative normalmente applicate nell'ingegneria dei sistemi di trasporto.

Le fasi eseguite, per tipologia e sequenza, si possono definire "classiche":

- raccolta dei dati di base;
- specificazione, implementazione e calibrazione di un modello rappresentativo del sistema della mobilità attuale;
- specificazione, implementazione e calibrazione di un modello rappresentativo del sistema della mobilità futura;
- analisi e stima dell'evoluzione complessiva della mobilità;
- stime di traffico.

Quindi la previsione è stata compiuta in modo quantitativo e razionale, utilizzando un modello matematico del fenomeno della mobilità, che, costruito e calibrato sulla situazione attuale, è stato successivamente modificato per rappresentare le future condizioni delle infrastrutture e della domanda di mobilità.

Il reperimento dati ed informazioni ha preso avvio dagli studi precedentemente effettuati e dai dati sul traffico disponibili e reperibili. Lo studio si è basato su:

- stradario ufficiale;
- cartografia aerofotogrammetrica digitale;
- modelli del traffico;
- piano Generale del Traffico Urbano;
- conteggi di traffico urbano (vari anni a partire dall'anno 1995);
- i dati storici di traffico.



Inoltre dall'Istat sono state acquisite le particelle censuarie, popolate con i relativi dati socio-economici-demografici.

#### **7.4.1.1 Scenario di progetto**

L'ipotesi di progetto prevede la realizzazione di una galleria artificiale che, innestandosi in corrispondenza dello svincolo della tangenziale est, su via Fincato, permette di raggiungere Via Cà di Cozzi (zona "Saval") e la zona in prossimità dell'abitato di Parona. A partire da qui il tracciato, che continua a svilupparsi in galleria, chiude maggiormente verso il centro cittadino e, dopo aver attraversato l'Adige, interseca le SP5 e SR11 riaffiorando in corrispondenza di quest'ultima (a est di Via Bacilieri).

A partire dalla SR11 il tracciato prosegue in superficie disponendosi perpendicolarmente alla bretella T4-T9 alla quale va a collegarsi in corrispondenza dello svincolo di S. Massimo, che verrà potenziato con ulteriori rampe di collegamento.

L'ipotesi presentata prevede altresì la realizzazione dello svincolo a rotatoria nella zona a ridosso del casello autostradale di Verona Nord, con le medesime funzionalità riportate al punto precedente.

Lo sviluppo complessivo dell'infrastruttura di progetto è pari a 9,7 km ed è stato analizzato con riferimento a tre orizzonti temporali:

- anno 2016;
- anno 2031;
- anno 2041.

I tratti in cui è suddivisa l'infrastruttura sono riportati nella tabella 7.5 insieme con i valori di flusso ai vari orizzonti temporali.

Tratto	TGM					
	2016		2031		2041	
	Leggeri	Pesanti	Leggeri	Pesanti	Leggeri	Pesanti
Verona Nord - San Massimo	39289	3085	40699	4560	44113	4204
San Massimo - Lugagnano	20851	1000	25951	1051	25791	932
Lugagnano - SR11	20284	1237	24512	1509	22754	1509
SR11 - Saval	38810	-	42399	-	45639	-
Saval - Fincato	3.678	-	37211	-	40728	-

Tabella 7.5: TGM nei vari tratti in relazione ai tre orizzonti temporali considerati.

Uno dei principali risultati di tale studio è stato di avere messo in luce la bassa percentuale di traffico pesante sul traffico totale lungo l'intero tracciato in oggetto; tale percentuale si attesta intorno a valori di 3-5%.

#### 7.4.2 Scenario demografico e socioeconomico

L'analisi dei dati relativa al periodo 1951-2008, mostra come la popolazione residente nel Comune di Verona dopo un periodo d'incremento sia rimasta stabile a lungo, se pure con una tendenza all'incremento negli ultimi due o tre anni (statistiche dal portale web Comunale). Tutto questo è riportato nella figura 7.12.

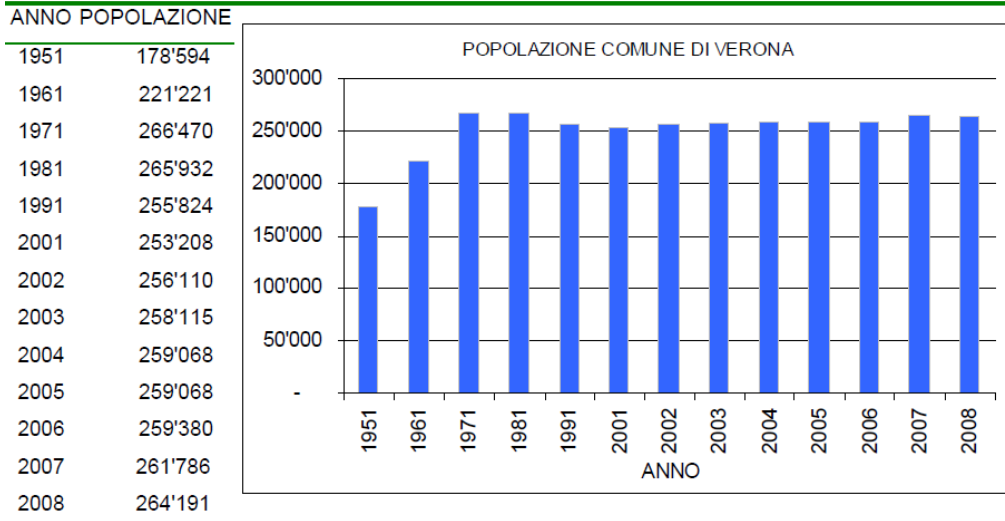


Figura 7.12: andamento demografico nel Comune di Verona.

Diverso è invece l'andamento della Provincia, per la quale si registra un costante incremento negli anni.

Ciò ovviamente porta a dare un giudizio positivo all'iniziativa infrastrutturale che si rivolge ad un'utenza che ha, appunto, rilevanza provinciale.

La figura 7.13 mostra come l'incremento dal 2002 al 2007 sia stato del +7% circa.

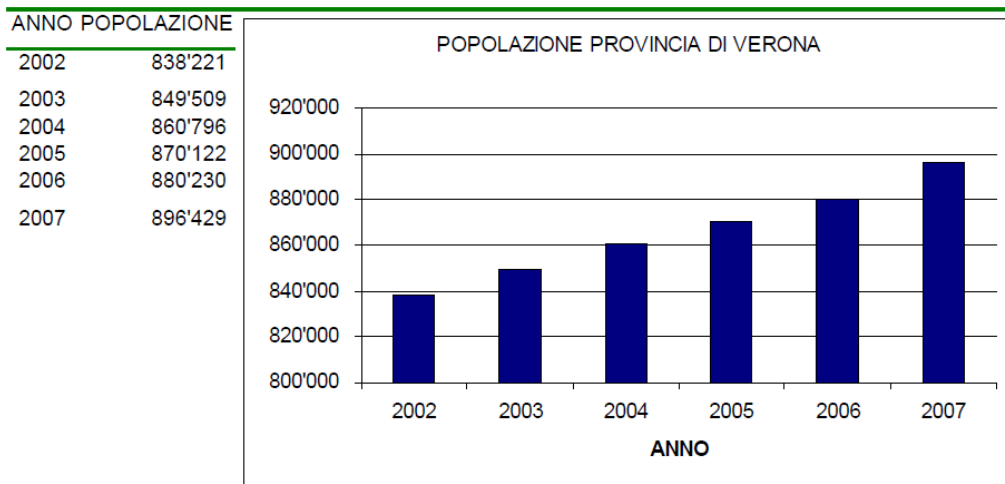


Figura 7.13: andamento demografico nella Provincia di Verona.

### 7.4.3 Studio di Fattibilità

Sulla base dell'insieme delle considerazioni svolte nel passato che hanno dato vita ad uno Studio di Fattibilità redatto dal Comune di Verona, questa proposta di collegamento, pur partendo dai risultati del precedente studio, presenta numerosi elementi "in variante". Elementi ritenuti più aderenti al quadro delle esigenze emerse durante le attività conoscitive e di sviluppo della proposta, e che sono stati criticamente analizzati nell'ambito di un attento Studio di Fattibilità, il cui scopo è stato quello di analizzare e valutare la fattibilità dell'intervento da tutti i punti di vista connessi alla costruzione di una grande infrastruttura.

In tale quadro, sono emerse alcune potenziali criticità connesse alla realizzazione dell'asse di collegamento così come previsto nello studio sviluppato dal Comune di Verona:

- mancanza di compatibilità con i piani territoriali e di settore attualmente vigenti;
- interferenze territoriali ed ambientali: in particolare nell'area in sinistra idrografica dell'Adige prima dell'imbocco della galleria Torricelle; tale zona, densamente abitata dai quartieri residenziali di Avesa e Quinzano, verrebbe infatti attraversata dall'asse viario in progetto, seppure in gran parte in galleria artificiale, con conseguenti impatti ambientali (in primo luogo acustico ed atmosferico) ed interferenze in generale con l'attuale assetto urbanistico dell'area ed in particolare con alcune strutture abitative, centri sportivi e scuole;
- interferenze in fase costruttiva: per la realizzazione dei tratti di attraversamento dei quartieri di Avesa e Quinzano, in galleria artificiale, si mettono in evidenza interferenze legate alla fase costruttiva in un'area densamente abitata: rumore, vibrazioni, polvere, passaggio di mezzi di cantiere, passaggio di camion per il trasporto degli inerti provenienti dagli scavi;
- impatto paesaggistico: legato in particolare ai tratti in superficie;
- elevata occupazione di suolo attualmente ad uso agricolo di alto pregio.

A partire da tali criticità ritenute significative, le attività di studio sono state rivolte all'individuazione di corridoi alternativi e a tipologie di opere che consentissero di limitare gli impatti sopra elencati e di dare una risposta positiva alle caratteristiche del territorio. Fra le altre caratteristiche peculiari dei corridoi esaminati, al fine di limitare gli impatti al massimo le interferenze territoriali ed ambientali sia in fase costruttiva che di esercizio, si è scelto di massimizzare la lunghezza in sotterraneo rispetto alla soluzione di base, in particolare nei tratti di attraversamento delle aree maggiormente sensibili, arrivando ad una percentuale di tratti in sotterraneo di circa il 65% su entrambi i corridoi individuati.

Al termine di questo studio è stata determinata per le tratte in sotterraneo un'innovativa sezione di galleria a due piani (un senso di marcia per ogni piano), con sezione stradale a gabarit ridotto, tale da consentire il passaggio del solo traffico leggero e che comporta la realizzazione di un'unica canna di galleria, assicurando comunque adeguati livelli di confort e sicurezza.

Tale soluzione, rappresentata in figura 7.14, circostrive il transito dei mezzi pesanti alla sola tratta in superficie, vale a dire quella compresa tra lo svincolo di Verona nord e quello S.R.11- Gardesane ed inoltre:

- risulta efficiente ed efficace da un punto di vista trasportistico;
- minimizza i costi di realizzazione consentendo l'autosostenibilità del piano economico e finanziario, che altrimenti necessiterebbe di un contributo pubblico;
- minimizza gli impatti territoriali ed ambientali.

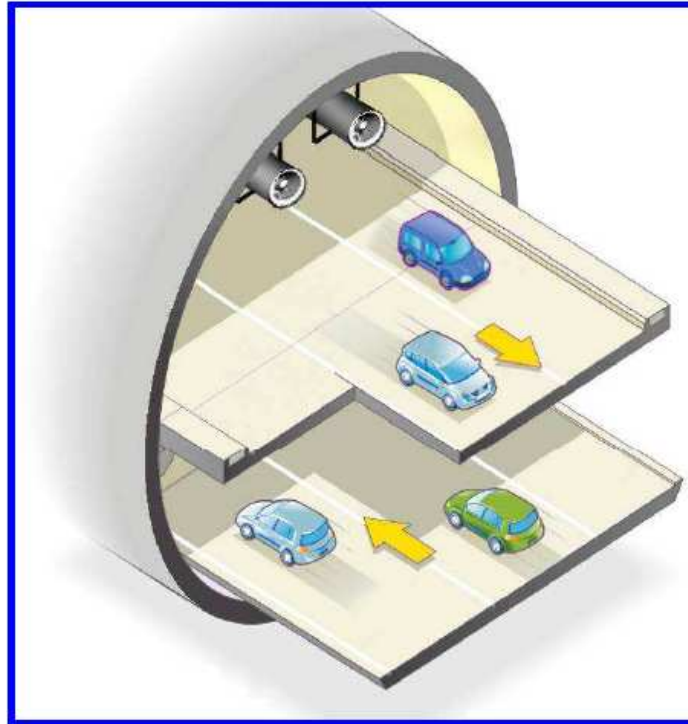


Figura 7.14: rappresentazione della soluzione innovativa adottata.

#### 7.4.4 Descrizione dell'intervento

L'infrastruttura da realizzare si compone di due parti principali: la Tangenziale Nord, che si sviluppa, secondo un tracciato a forma di L rovesciata, dallo svincolo autostradale di Verona Nord fino alla tangenziale est, e l'“Antenna nord Valpolicella”, che si stacca dall'asse principale all'altezza della via Gardesane per raggiungere, verso nord, l'imbocco della Valpolicella, come rappresentato dalla figura 7.15.

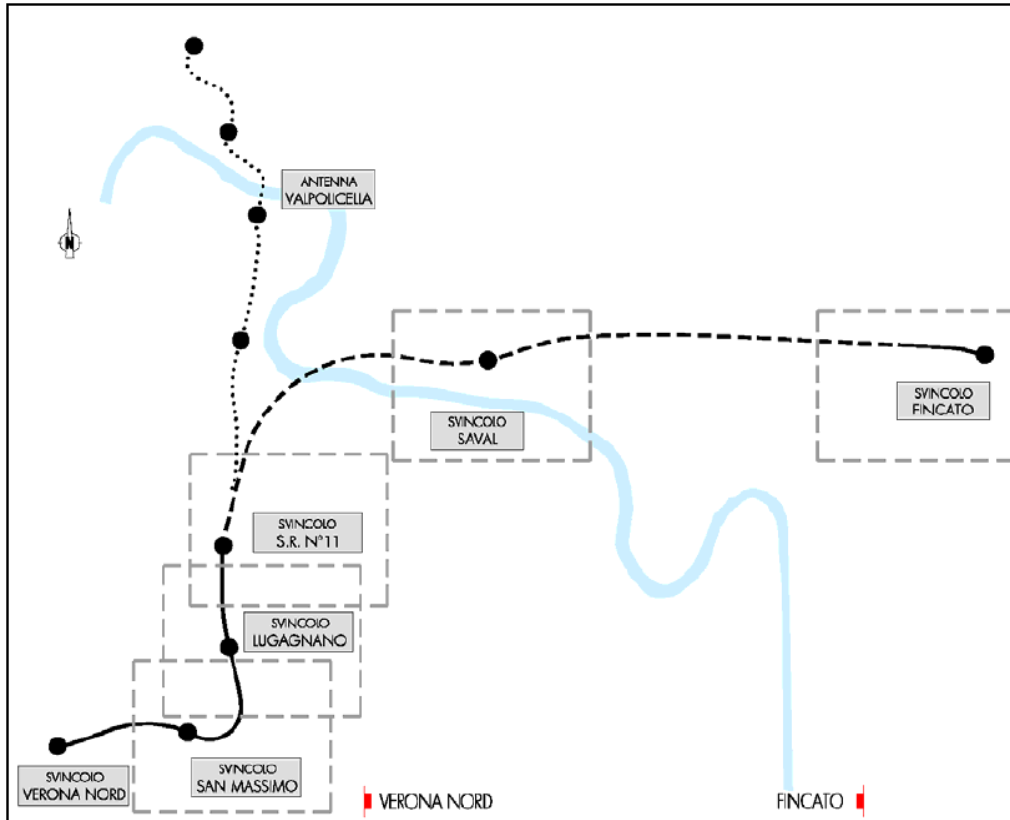


Figura 7.15: corografia dell'intervento.

Ai fini del nostro studio ci interessa considerare esclusivamente la Tangenziale Nord. Dal punto di vista planimetrico, la soluzione proposta si differenzia dal progetto posto a base di gara essenzialmente lungo la tratta iniziale orientata sull'asse nord-sud, che risulta spostata verso est di circa 2 km.

La nuova infrastruttura ha inizio in corrispondenza dello svincolo di San Massimo, per il quale il progetto prevede la connessione della nuova infrastruttura con il prolungamento della strada T4-T9 con provenienza/destinazione la stazione di Porta Nuova F.S.. Viene mantenuta la funzionalità dell'attuale svincolo di S. Massimo per la ricucitura della viabilità proveniente da sud.

La Tangenziale Nord procede quindi pressoché in rettilineo e, superati gli svincoli di Lugagnano e S.R.11, la nuova sede imbocca la prima galleria (galleria Adige), che sotto-attraversa il fiume Adige con una curva verso destra di raggio  $R = 1300$  m. A questa galleria ne segue una seconda (galleria Torricelle), il cui termine si situa in corrispondenza dello svincolo di Fincato,

che consente l'innesto sulla tangenziale Est e sulla strada che, verso nord, conduce alla Valpantena. Le due gallerie sono separate da un manufatto speciale situato in località Saval, ove viene inoltre realizzato l'omonimo svincolo.

Dal punto di vista altimetrico, lungo la tratta in adeguamento non si hanno variazioni rispetto all'attuale livelletta mentre, superato lo svincolo di San Massimo, il tracciato procede in galleria artificiale per 485 m (galleria artificiale Cason), per poi proseguire in trincea sino allo svincolo di Lugagnano, sottopassato nuovamente con una galleria artificiale (Lugagnano, L = 83 m). La tratta in trincea prosegue sino allo svincolo S.R.11, in corrispondenza del quale ha inizio la galleria artificiale Gardesane (L = 706 m), che precede l'imbocco della galleria naturale Adige, realizzata con metodo meccanizzato, di lunghezza complessiva pari a 2418 m circa, che sottoattraversa il fiume con una pendenza del 3% ed una copertura in calotta di 18 m circa. Il tracciato prosegue con il manufatto speciale di Saval (L = 673 m), a valle del quale ha inizio la galleria Torricelle, sempre realizzata con metodo meccanizzato, caratterizzata da una lunghezza complessiva di 3860 m, pendenza massima pari a 1,50% e copertura variabile da un minimo di 6 m ad un massimo di 170 m circa.

Complessivamente, la Tangenziale Nord ha una lunghezza di 11.735m, di cui 8576m circa con sviluppo in sotterraneo ed i restanti 3159m con sviluppo all'aperto.

#### **7.4.5 Le gallerie naturali Adige e Torricelle**

Il tracciato della Tangenziale Nord, quindi dell'asse principale, è sostanzialmente realizzato in sotterraneo con la netta prevalenza di gallerie naturali rispetto alle gallerie artificiali.

La tecnica di scavo prevista sarà quella dello scavo meccanizzato mediante TBM con controllo della pressione al fronte con contrasto di terra (Earth Pressure Balance - EPB machine).



Le due carreggiate stradali sono disposte su due livelli e tale organizzazione rappresenta un'innovazione assoluta per l'Italia; ciò è possibile perché agli svincoli SR. 11 (per i veicoli provenienti dallo svincolo autostradale di Verona Nord) e Fincato (per i veicoli provenienti dalla Tangenziale Est) è impedito l'ingresso in galleria ai mezzi pesanti.

In relazione al divieto imposto, è possibile adottare per l'altezza libera verticale il valore limite inferiore eccezionale di 3,20 m, in accordo con quanto contenuto al punto 5.1.2.3 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14/01/2008; “(...) *tale deroga è vincolata al parere favorevole dei Comandi Militare e dei Vigili del Fuoco competenti per territorio*”. In relazione a ciò sarà posto un limite di altezza per i veicoli pari 2.70-2.80m.

Stabilita l'altezza libera eccezionale di 3,20 m, è stata studiata anche una configurazione della piattaforma stradale specifica per le tratte in sotterraneo, con accesso inibito ai veicoli pesanti; in particolare sono state previste:

- due corsie di marcia di larghezza pari a 3,25 m;
- banchina in sinistra da 0,50 m, che garantisce un adeguato franco psicotecnico;
- banchina in destra di larghezza pari a 2,30 m che, considerata l'assenza di traffico pesante, risulta di dimensioni adeguate a fungere da corsia di emergenza per i soli veicoli leggeri, in accordo a quanto stabilito dal D.Lgs. 5/10/2006 n.264.

Le due carreggiate sovrapposte sono rappresentate nella figura 7.16.

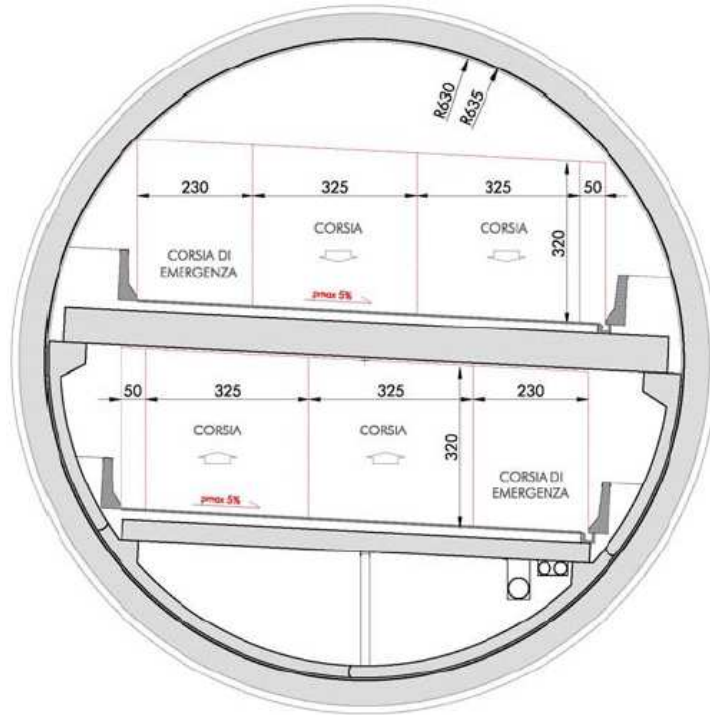


Figura 7.16: sezione tipo galleria corrente.

A fronte di tale composizione della piattaforma, ed in particolare della larghezza della corsia di marcia, un'analisi comparativa tra le sezioni tipo del D.M. 05/11/2001, quelle delle precedenti “Norme sulle caratteristiche geometriche delle strade extraurbane (CNR 78/1980)” e le indicazioni contenute nel Manuale della Capacità (HCM) consente di fissare in 80 km/h la velocità di progetto ( $V_p$ ) per la progettazione geometrica della Tangenziale Nord nei tratti in sotterraneo.

Si evidenzia, tuttavia, che il tracciato plano-altimetrico proposto è comunque predisposto, dal punto di vista cinematico e di visibilità, con caratteristiche proprie delle strade di tipo “B”, pertanto con velocità di progetto compresa tra i 70-120 km/h.

Inoltre si prevedono le dotazioni seguenti:

- *Corsia di emergenza*: consente la funzione di sosta di emergenza continua, nonché di percorso pedonale di emergenza, in senso longitudinale, tra due uscite di emergenza successive;
- *Piazzole di sosta*: non sono invece necessarie sulla base del punto 2.5.1. del D.Lgs. 5/10/2006 n.264, secondo il quale nelle nuove gallerie

bidirezionali di lunghezza superiore a 1500m e con un volume di traffico superiore a 2000 veicoli per corsia devono essere previste piazzole di sosta a distanze non superiori a 1000 m, qualora non siano previste corsie di emergenza;

- *Banchine pedonali*: non necessarie, in quanto è presente la corsia di emergenza;
- *Drenaggio dei liquidi di piattaforma*: in grado di impedire la propagazione degli incendi, nonché il propagarsi di liquidi infiammabili e tossici all'interno della galleria; nonostante non sia consentito il transito dei mezzi pesanti, tale sistema di drenaggio è stato comunque previsto; ciò perché non si può escludere in assoluto il trasporto di merci pericolose, anche in presenza di soli veicoli leggeri; questa scelta, oltre ad elevare il grado di sicurezza all'interno del tunnel, costituisce una parziale predisposizione della galleria nell'ottica di un suo possibile raddoppio, anche futuro;
- *Collegamenti pedonali ed uscite di emergenza (by-pass)*: ogni 250-500m in funzione dei risultati derivanti dall'analisi dei rischi che sarà condotta nel corso dello sviluppo della progettazione; considerata la geometria adottata per la sezione tipo corrente della galleria, tali by-pass collegano le due carreggiate mediante due rampe di scale completamente isolate rispetto alle conseguenze di un potenziale incidente mediante l'interposizione di due vani filtro; Per quanto concerne la sagoma libera dei by-pass pedonali è stata impiegata una sezione di 2,00 m di larghezza e 2,40 m di altezza, compatibile anche con il passaggio di una barella; i by-pass saranno dotati di due rampe di scale intervallate da un pianerottolo intermedio di larghezza pari 2 m;
- *Collegamenti carrabili*: non obbligatori, in accordo a quanto contenuto al punto 2.4.1 del D.Lgs. 5/10/2006 n.264.

Al fine di accomodare le due piattaforme stradali nella configurazione e tutte le dotazioni impiantistiche previste, il diametro di scavo sarà pari a 14 m, in grado, quindi, di garantire (vedi figura 7.17):

- un diametro interno funzionale pari a 12,7 m;

- uno spessore del rivestimento definitivo di 50 cm;
- un vuoto di 15 cm intasato con malta.

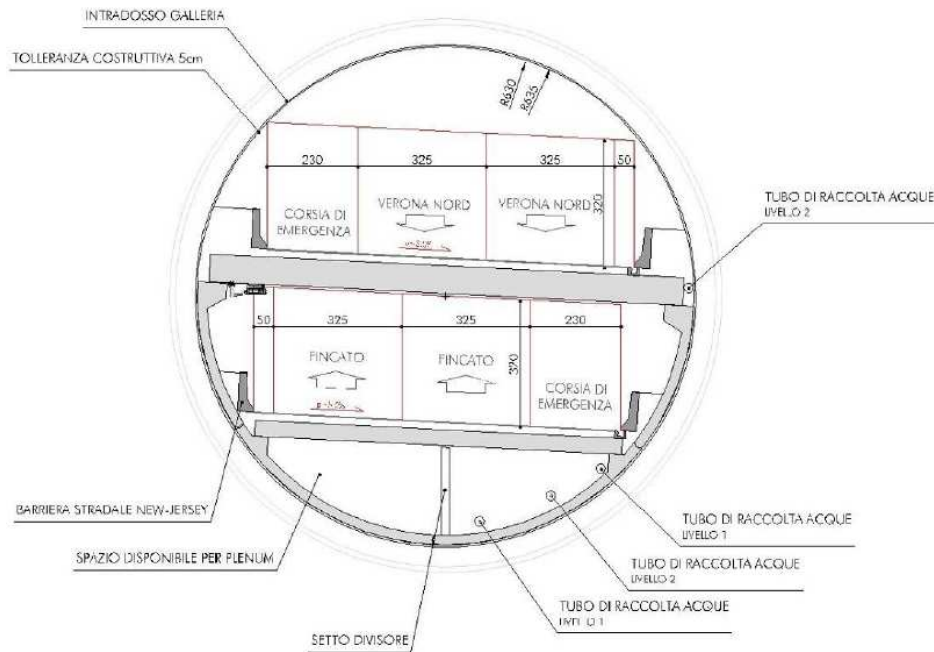


Figura 7.17: sezione delle gallerie naturali.

Dal punto di vista geologico le due opere si collocano in contesti parzialmente differenti in quanto la galleria Adige è totalmente inserita nella piana che costeggia il fiume, mentre la galleria Torricelle è inserita in questi ultimi terreni solo per il primo tratto a ridosso dello svincolo Saval, per passare quindi all'interno di un rilievo di natura calcarea. Mentre le tratte in pianura sono da ritenersi fortemente instabili e sotto falda la porzione all'interno dei calcari vedrà una scarsa circolazione idrica e una massa rocciosa con buone caratteristiche meccaniche.

Le gallerie avranno un rivestimento definitivo costituito da anelli universali (*tapered ring*) in conci prefabbricati che consentono, variando l'angolo di rotazione in fase di montaggio, di ottenere tutti i raggi di curvatura plano-altimetrici previsti dal progetto e di correggere immediatamente eventuali scostamenti di traiettoria (vedi figura 7.18).

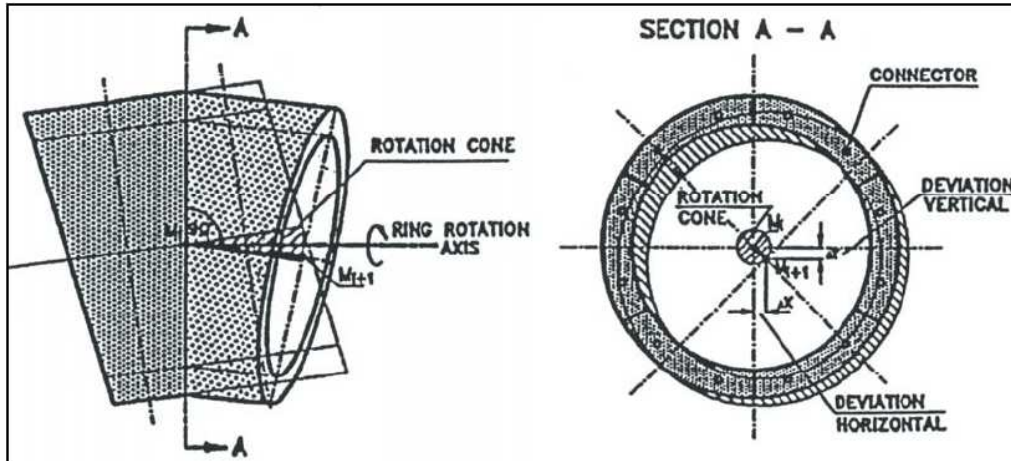


Figura 7.18: concetto dell'anello universale.

Le caratteristiche geometriche salienti dell'anello di rivestimento sono:

- diametro esterno  $D_E = 13,7 \text{ m};$
- diametro interno  $D_I = 12,7 \text{ m};$
- spessore  $s = 0,5 \text{ m};$
- lunghezza media  $L = 1800 \text{ mm};$
- lunghezza minima  $L_{\min} = 1788 \text{ mm};$
- lunghezza massima  $L_{\max} = 1812 \text{ mm};$
- numero di conci  $n = 9 \text{ (}8+1 \text{ chiave);}$
- connessioni tramite bulloni.

L'impermeabilità dell'opera sarà ottenuta mediante l'applicazione di guarnizioni poste in prossimità dell'estradosso di ogni concio.

#### 7.4.6 Impianti tecnologici

Di fatto, le gallerie in oggetto, dal punto di vista impiantistico, possono essere assimilate ad un unico sistema, dove la galleria, a singolo fornice, è di tipo unidirezionale con transito consentito esclusivamente al traffico veicolare leggero. Il fornice è suddiviso in due livelli, uno superiore ed uno inferiore, per mezzo di una soletta.

Il livello inferiore ingloba in continuità la galleria artificiale Gardesane, le gallerie naturali Adige e Torricelle e la galleria artificiale Fincato, costituendo di fatto un'unica galleria di circa 8.000 m.

Il livello superiore, viceversa, presenta due tratti scoperti di circa 100m ciascuno presso lo svincolo di Saval, quindi all'incirca in posizione baricentrica rispetto al tracciato in galleria, spezzando quindi la continuità del sistema in sotterraneo.

#### **7.4.6.1 Impianto di illuminazione in galleria**

L'impianto di illuminazione proposto è stato dimensionato secondo quanto prescritto dalla norma UNI 11095, così come modificata dal vigente D.M. 14 settembre 2005. Tale impianto prevede due differenti configurazioni per il livello superiore ed il livello inferiore della galleria.

##### *7.4.6.1.1 Impianto di illuminazione di rinforzo - livello inferiore*

Per il livello inferiore della galleria è stato previsto un impianto di illuminazione di rinforzo con i corpi illuminanti installati su due file affacciate e posizionati lateralmente, in corrispondenza delle pareti della galleria. I corpi illuminanti, previsti con ottica di tipo asimmetrico, saranno equipaggiati con lampade del tipo al sodio alta pressione, con potenza compresa tra 400 W e 150 W e struttura metallica in acciaio inox AISI 316L. L'altezza di installazione sarà pari a circa 3 m. Il livello illuminotecnico prodotto sarà compreso tra un valore massimo di 79 cd/m<sup>2</sup> e minimo di 12 cd/m<sup>2</sup>.

##### *7.4.6.1.2 Impianto di illuminazione di rinforzo - livello superiore*

Per il livello superiore della galleria è stato previsto un impianto di illuminazione di rinforzo con i corpi illuminanti installati su due file affacciate e posizionati in corrispondenza della mezzeria delle corsie di marcia. I corpi illuminanti, previsti con ottica di tipo asimmetrico, saranno equipaggiati con lampade del tipo al sodio alta pressione, con potenza compresa tra 400 W e 150

W e struttura metallica in acciaio inox AISI 316L. L'altezza di installazione sarà pari a circa 3,85 m. Il livello illuminotecnico prodotto sarà compreso tra un valore massimo di 79 cd/m<sup>2</sup> e minimo di 12 cd/m<sup>2</sup>.

#### *7.4.6.1.3 Impianto di illuminazione permanente*

Sia per il livello superiore che per quello inferiore è stato proposto un impianto di illuminazione permanente caratterizzato da corpi illuminanti, installati su due file affacciate e posizionati lateralmente, in corrispondenza delle pareti della galleria. I corpi illuminanti, previsti con ottica di tipo simmetrico, saranno equipaggiati con lampade del tipo fluorescente, con potenza pari a 2x54 W e struttura metallica in acciaio inox AISI 316L. L'altezza di installazione sarà pari a circa 3,85 m per il livello inferiore e pari a circa 3 m per quello superiore. Il livello illuminotecnico prodotto, in relazione al valore minimo della luminanza media mantenuta indicato nella norma UNI 11248 per la classe relativa al tipo di strada di accesso alla galleria ed in relazione alle particolari caratteristiche geometriche della galleria in progetto, sarà pari a circa 5 cd/m<sup>2</sup>.

#### *7.4.6.1.4 Impianto di illuminazione di emergenza*

In caso di mancanza di energia elettrica, sarà previsto un adeguato ed efficiente impianto di illuminazione di emergenza in grado di fornire la necessaria illuminazione ausiliaria che, unita ad una corretta segnalazione di sicurezza, assicura la salvaguardia delle persone permettendone un'ordinata e rapida evacuazione. Tale impianto sarà derivato dall'impianto di illuminazione permanente, alimentando il 50% delle lampade (una ogni due), tramite un circuito elettrico separato di sicurezza ed alimentato, in caso di assenza della tensione di rete, da UPS con autonomia di 30 minuti. Ciò permetterà alle lampade di non spegnersi e di fornire comunque un livello minimo di illuminazione, in attesa che il gruppo elettrogeno entri in funzione. L'illuminazione prodotta sarà di circa 2,5 cd/m<sup>2</sup> e fornirà una guida luminosa per gli utenti, durante le fasi di esodo.

#### 7.4.6.1.5 Impianto di illuminazione di evacuazione

Sia per il livello superiore che per quello inferiore è stato previsto un impianto di illuminazione di evacuazione caratterizzato da un sistema di segnalazione ottico a LED, di colore bianco.

Tale impianto, in condizioni di esercizio normale e di emergenza, dovrà indicare all'utente lo sviluppo longitudinale della carreggiata fino all'uscita di emergenza più vicina.

L'impianto prevede l'installazione delle unità di segnalazione, ai bordi della carreggiata, alla base del profilo ridirettivo, con passo di installazione pari a 10 m e di centraline di comando e controllo, ubicate in galleria ogni 500 m.

#### 7.4.6.2 Impianto di ventilazione in galleria

L'impianto di ventilazione proposto per il tunnel Adige e Torricelle dovrà assolvere a due importanti funzioni:

- in caso di *esercizio normale* dovrà provvedere alla diluizione della concentrazione di inquinanti, in condizioni di traffico congestionato, che potrebbero recare danno alla salute degli utenti e diminuirne la visibilità all'interno del tunnel;
- in caso di *emergenza* l'impianto dovrà controllare l'evoluzione, dal punto di vista fluidodinamico, dei fumi da incendio, in modo da creare la stratificazione dei fumi nella parte alta della galleria ed una zona di aria fresca, per un'altezza di circa 2 m sul piano stradale, che possa consentire agli utenti di raggiungere in sicurezza l'uscita della galleria e gli accessi alle vie di esodo.

A causa delle differenti caratteristiche geometriche dei livelli inferiore e superiore del traforo, sono state previste due diverse tipologie di impianto di ventilazione.



#### *7.4.6.2.1 Impianto di ventilazione longitudinale - livello superiore*

Il tunnel, che si sviluppa quasi interamente in sotterraneo, presenta due tratti scoperti, ciascuno dei quali di lunghezza pari a 100 m. Ciò consente di suddividere il tunnel in un tratto sotterraneo di lunghezza inferiore ai 4000 m, in un tratto scoperto di circa 300 m ed in un ultimo tratto in sotterraneo di lunghezza inferiore ai 4000 m.

Per tunnel caratterizzati da tali lunghezze, interessati da traffico unidirezionale è possibile adottare un impianto di ventilazione longitudinale che, in caso di emergenza incendio, stratifichi efficacemente i fumi, evitando il fenomeno del “back-layering” ed assicurando l'esodo in sicurezza degli utenti dalla galleria; la normativa consente, inoltre, l'utilizzo di un sistema di ventilazione di tipo longitudinale per gallerie unidirezionali aventi lunghezza inferiore ai 4000 m.

Tale sistema, proposto per il traforo in progetto, prevede l'impiego di 40 ventilatori assiali (jet-fan), installati a coppie in corrispondenza della volta della galleria. Il funzionamento del suddetto impianto, in caso di incendio, sarà caratterizzato da due fasi distinte:

- una prima fase di “evacuazione” durante la quale l'impianto dovrà realizzare la stratificazione dei fumi, prodotti dall'incendio, nella zona superiore della galleria, con una velocità dell'aria non superiore ai 2 m/s. Ciò per consentire agli utenti in galleria di raggiungere in sicurezza le uscite di emergenza e consentire, nel contempo, il regolare svolgimento delle operazioni di soccorso da parte delle squadre di emergenza;
- una seconda fase di “lavaggio” durante la quale l'impianto dovrà provvedere all'eliminazione completa dei fumi dalla galleria, in modo da consentire ai mezzi di soccorso di provvedere alle operazioni di spegnimento dell'incendio.

#### 7.4.6.2.2 Impianto di ventilazione trasversale - livello inferiore

Il livello inferiore del tunnel, caratterizzato da un'altezza libera di circa 3,20 m, è interessato da traffico di tipo unidirezionale e presenta uno sviluppo longitudinale complessivo di lunghezza pari a 8023 m.

Dal punto di vista geometrico, le ridotte dimensioni della sagoma limite non consentono di realizzare la stratificazione dei fumi verso la parte alta della galleria e pertanto, in caso di incendio, si raggiungerebbero rapidamente temperature molto elevate con grave pericolo durante le operazioni e la gestione delle fasi di esodo degli utenti in galleria.

Tutto ciò premesso, si propone di adottare, per il livello inferiore del tunnel, un impianto di ventilazione trasversale caratterizzato da:

- *plenum* ricavato al di sotto della carreggiata, suddiviso in due canali, il primo per l'estrazione dell'aria viziata (fumi) ed il secondo per l'immissione di aria fresca;
- *canali di aerazione*, di dimensioni 1700x300 mm, ubicati lungo le pareti della galleria e di altezza pari a circa 2,5 m, con passo di 30 m;
- *5 centrali di ventilazione* per l'estrazione dell'aria viziata e l'immissione dell'aria fresca in galleria, caratterizzate ciascuna da 4 ventilatori assiali monostadio di potenza pari a 460 kW, di cui 2 di riserva.

In condizioni di *esercizio normale*, l'impianto di ventilazione provvederà alla diluizione degli inquinanti presenti all'interno del tunnel e sarà comandato dall'impianto di gestione e controllo, sulla base dei parametri ambientali rilevati dall'impianto di monitoraggio dell'aria in galleria (rilevatori di monossido di carbonio, misuratori del livello di opacità). Per mezzo dei canali di aerazione, l'impianto provvederà ad immettere aria fresca nel tunnel e ad estrarne l'aria esausta.

In condizioni di *emergenza*, tramite le informazioni fornite dall'impianto di rilevazione incendi, il sistema di telegestione sarà in grado di individuare il tratto di tunnel interessato dall'evento e di gestire l'impianto di ventilazione circoscrivendone l'intervento, complessivamente, ad una zona di circa 300 m.

L'estrazione dei fumi prodotti dall'incendio richiamerà aria dai portali con una velocità che non dovrà essere superiore ai 2 m/s.

#### *7.4.6.2.3 Impianto di ventilazione dei locali tecnici*

I locali tecnici, nei quali sono installati i quadri MT, i quadri BT, i trasformatori, i gruppi elettrogeni ed i gruppi di continuità assoluti (UPS) sono dotati di impianti di ventilazione che hanno lo scopo di smaltire il calore prodotto dalle apparecchiature elettriche ed elettroniche.

Utilizzando come fluido termovettore l'aria prelevata dall'esterno, l'impianto sarà in grado di mantenere la temperatura interna degli ambienti a valori non superiori ai 35°C. Tale temperatura costituisce il valore ottimale di funzionamento per le suddette apparecchiature elettriche.

L'impianto di ventilazione nei vari locali tecnici sarà attivato automaticamente, mediante sonde di temperature, che rilevano la temperatura interna dei locali; se la temperatura interna dei locali tecnici supera il valore prefissato (35°C) viene attivato il ventilatore centrifugo.

#### *7.4.6.2.4 Impianto di ventilazione uscite di emergenza*

Per le uscite di emergenza, previste per la galleria in progetto, sarà previsto un impianto di pressurizzazione delle zone filtro con l'obiettivo di impedire infiltrazioni di fumi dalla carreggiata interessata dall'evento incendio a quella non interessata, in condizioni di emergenza.

### **7.4.6.3 Impianto SOS**

Per facilitare le operazioni di soccorso saranno previsti, in entrambi i livelli, stazioni di emergenza SOS costituite da armadi, posizionati sul lato destro della carreggiata, con interdistanza di 125 m. Tali armadi saranno disposti orizzontalmente a parete, ad un'altezza di circa 1,40 m al di sopra del profilo del new-jersey.

Ciascun armadio sarà equipaggiato con:

- telefono di emergenza;
- pulsanti di allarme;
- n.2 estintori (a polvere ed a schiumogeno);
- idrante con attacco UNI45 collocati in idonee cassette con relativo corredo di lancia e manichetta.

#### **7.4.6.4 Impianto semaforico**

Attraverso l'impiego di un impianto semaforico, saranno fornite agli utenti una serie di informazioni relative allo stato di funzionalità e di traffico della galleria nonché eventuali prescrizioni quali deviazioni del traffico ecc. I semafori saranno del tipo a tre luci (verde, giallo e rosso) e saranno previsti in corrispondenza degli imbocchi della galleria. L'operatore presso il centro di controllo, potrà attivare/disattivare la segnaletica.

In caso di anomalia il sistema proporrà all'operatore un certo "scenario" ovvero una procedura di deviazione del traffico in base all'evento ma sarà sempre e in ogni modo l'operatore che dovrà decidere se procedere o meno.

Le finalità di tali sistemi è strettamente correlata alla capacità di indicare tempestivamente, mediante procedure automatiche, condizioni critiche in galleria, come veicoli fermi in carreggiata o anche situazioni di congestione che potrebbero consigliare agli utenti di effettuare variazioni sul percorso scelto.

#### **7.4.6.5 Segnaletica di sicurezza**

In entrambi i livelli della galleria sarà previsto un impianto di segnaletica verticale di emergenza, del tipo retroilluminato, caratterizzato dai seguenti segnali:

- segnali retroilluminati di indicazione distanza uscita di emergenza, ubicati alternativamente sui due piedritti di ciascun livello della galleria, ogni 125 m, in modo da indicare le uscite di emergenza più vicine e la relativa distanza;

- segnali retroilluminati di indicazione presenza uscita di emergenza, ubicati in corrispondenza di ciascun ingresso dell'uscita di emergenza;
- segnali retroilluminati di presenza stazione di emergenza (SOS), idrante ed estintori, ubicati sul lato destro della carreggiata di ciascun livello della galleria, ogni 125 m.

#### **7.4.6.6 Impianto di rilevazione incendi**

Il sistema di rivelazione incendi, proposto per la galleria in progetto, sarà del tipo lineare, basato sull'impiego di un cavo termosensibile. Il cavo sarà suddiviso in cinque tratti, distribuiti tra i due livelli della galleria, ciascuno dei quali gestito da ciascuna delle cinque centraline previste all'interno delle cabine CT1, CT2, CT3, CT4 e CT5. Il sistema è caratterizzato dai seguenti componenti:

- cavo termosensibile;
- centraline di gestione e controllo;
- unità di inizio e fine linea.

L'impianto, che prevede il monitoraggio di settori incendio in galleria di circa 2000 m, sarà in grado di acquisire le informazioni fornite dal cavo termosensibile.

#### **7.4.6.7 Impianto di estinzione incendi**

##### *7.4.6.7.1 Impianto idrico antincendio con tecnologia "water-mist" - livello inferiore*

L'intera lunghezza della carreggiata inferiore del traforo delle Torricelle sarà protetta mediante un impianto idrico antincendio con tecnologia "water-mist". Dal punto di vista geometrico, il livello inferiore della galleria è caratterizzata da una carreggiata avente larghezza pari a 9,5 m, altezza pari a 3,4 m e copertura piana (soletta). In caso di incendio, nel livello inferiore della galleria, a causa dell'altezza limitata, si verrebbero a creare rapidamente

temperature molto elevate, per effetto della mancata stratificazione dei fumi, con gravi conseguenze durante le fasi di esodo degli utenti.

L'utilizzo di un impianto antincendio con sistema "water-mist" si prefigge l'obiettivo di realizzare il confinamento dei fumi di incendio e di controllare la dinamica delle temperature nella zona interessate dall'evento incendio.

Tale impianto è in grado di erogare getti di acqua nebulizzata ad alta pressione, circa 70 bar, nella zona interessata dall'evento incendio. L'acqua, evaporando, produce due effetti distinti sull'incendio:

- sensibile diminuzione della temperatura;
- riduzione del tenore di ossigeno nella zona interessata dall'incendio.

L'impianto, durante il suo funzionamento, non interferisce con gli effetti prodotti dall'impianto di ventilazione trasversale il quale, in condizioni di emergenza, dovrà realizzare velocità di trascinamento dei fumi pari a circa 2 m/s.

Sarà previsto un collettore principale di alimentazione, di diametro 76,1 mm, che si svilupperà lungo il livello superiore del tunnel, con stacchi in corrispondenza dei cabinets, anch'essi disposti lungo la parte superiore del tunnel, di diametro 60 mm e 25 mm.

La configurazione dell'impianto di estinzione incendi, previsto per la carreggiata inferiore, prevede circa 3600 erogatori suddivisi in 300 zone indipendenti da 24 m ciascuna.

Il flusso di acqua previsto, durante il funzionamento a scarica contemporaneo di 3 zone da 24 m ciascuna, sarà di 1490 lpm, calcolato in corrispondenza dell'area idraulicamente più sfavorevole del livello inferiore del tunnel.

In caso incendio l'impianto sarà in grado di produrre getti di acqua nebulizzata ad alta pressione, in 3 settori contemporaneamente, in modo tale da proteggere un tratto di galleria di lunghezza complessiva pari a 72 m. Il getto di acqua è attivato da un'elettrovalvola la quale è integrata, attraverso il sistema di gestione e controllo, all'impianto di rilevazione incendi in galleria.

Il sistema di estinzione incendi proposto, sarà caratterizzato da 2 stazioni di pressurizzazione, ciascuna delle quali ubicata in corrispondenza del portale di ingresso del tunnel e da un collettore principale, ad alta pressione, che si svilupperà lungo la parte superiore del tunnel. Esso sarà interfacciato al sistema di controllo ed azionamento automatico elettronico mediante 38 cabinets.

*7.4.6.7.2 Impianto idrico antincendio a idranti - livello superiore e livello inferiore*

L'intera lunghezza delle carreggiate superiore e inferiore delle gallerie sarà protetta mediante un impianto idrico antincendio caratterizzata da una rete di distribuzione idrica collegata ad anello, installata all'interno della galleria, allo scopo di fornire acqua in quantità adeguata per contrastare, tramite gli idranti ed i naspi ad essa collegati, l'incendio di maggiore entità ragionevolmente prevedibile nell'area protetta della galleria. Gli idranti saranno previsti in uno spazio predisposto, all'interno degli armadi SOS.

Saranno previste 2 centrali antincendio (gruppi di pressurizzazione, vasca di accumulo idrico), ubicate nei manufatti tecnici previsti in corrispondenza degli imbocchi della galleria scavata in naturale. Ogni centrale antincendio sarà composta da una vasca di accumulo da 150 m<sup>3</sup>, di cui 75 m<sup>3</sup> a disposizione dell'impianto a idranti e 75 m<sup>3</sup> a servizio dell'impianto con tecnologia "water-mist" e da un gruppo di pressurizzazione costituito da una pompa principale e da una di riserva.

L'impianto antincendio ad idranti comprenderà in sintesi:

- 2 vasche di accumulo idrico da 75 m<sup>3</sup> in cls;
- 2 gruppi di pressurizzazione;
- rete di tubazioni fisse, chiuse ad anello, permanentemente in pressione, ad uso esclusivo antincendio;
- valvole di intercettazione;
- cassette con idranti ad interasse medio di 125 m e naspi alloggiati all'interno degli armadi SOS posti in galleria.

#### **7.4.6.8 Impianto di trasmissione segnali radio**

Per facilitare il coordinamento delle operazioni di soccorso e garantire la continuità di informazione radio agli utenti (canale broadcasting), sarà previsto, all'interno delle gallerie, un impianto per la ritrasmissione dei segnali radio, che dovrà consentire la copertura radio del piano stradale delle due carreggiate per la lunghezza dell'intera galleria.

La rete di radiocomunicazione sarà progettata in modo da garantire in tutti i punti delle gallerie la copertura radio anche con apparati portatili. Le comunicazioni potranno avvenire tra apparati all'interno della galleria e con apparati all'esterno.

L'impianto prevede un centro operativo, posto nella sala di controllo, dal quale sarà possibile sia comunicare e monitorare tutte le comunicazioni radio, sia intervenire e coordinare tutte le operazioni in caso di necessità, compresa la possibilità di inviare comunicazione sul canale broadcasting per informazioni all'utenza.

Nel centro operativo del Centro di Controllo sarà previsto un sistema di supervisione. Questo sistema dovrà permettere di visualizzare tutti i principali parametri delle due stazioni satellite installate all'interno della galleria e della stazione master presente nella sala apparati del Centro Operativo.

#### **7.4.6.9 Impianto di supervisione**

Al fine di avere un controllo completo e puntuale sul funzionamento dell'intero sistema impiantistico elettromeccanico a servizio del traforo delle gallerie, sarà previsto un impianto di supervisione completo di software di gestione per l'analisi dei segnali provenienti dai sistemi interfacciati a distanza, sia nelle condizioni di esercizio normale che nelle condizioni di emergenza.

Tale sistema prevede la realizzazione di un centro di controllo "locale Master" ubicato nel manufatto di alloggiamento delle apparecchiature di trasformazione in cabina denominata CT1, dal quale sarà possibile controllare il funzionamento di tutti gli impianti; il centro di controllo locale sarà



predisposto per essere interfacciato con un centro di controllo remoto dell'Ente gestore della galleria.

Nelle altre cabine elettriche saranno ricavate sale di controllo "Slave" dalle quali sarà possibile monitorare il funzionamento degli impianti.

L'impianto di supervisione, nella sua configurazione finale, controllerà il regolare funzionamento degli impianti raccogliendo le segnalazioni di stato, le misure provenienti dal campo ed impartendo gli appropriati telecomandi; inoltre, segnalerà le eventuali anomalie, registrandole su un apposito diario, e potrà fornire ausilio nelle operazioni di manutenzione.

Il sistema proposto sarà caratterizzato da un sistema gerarchico di controllo sui singoli sottosistemi che permetterà la completa telegestione, lasciando la possibilità, in futuro, di essere integrato e ampliato/aggiornato con altri sottosistemi.

## **7.5 Applicazione del software QRAM ai progetti proposti**

### **7.5.1 I periodi temporali**

In entrambi i progetti proposti per il completamento dell'anello circonvallatorio della città di Verona, i dati relativi alla popolazione ed al traffico, riguardanti l'area in esame, sono valori medi annui e quindi è stato considerato un unico periodo temporale denominato "normal" all'interno del QRAM.

### **7.5.2 La zona d'impatto**

L'area di Verona ha le caratteristiche di un'area urbana, perciò nel software è stata definita come unica area d'impatto, l'area urbana.

### 7.5.3 Rete stradale

#### 7.5.3.1 Rappresentazione della rete stradale

Per entrambi gli interventi presentati la strada è stata schematizzata mediante 3 tratti rettilinei, uno rappresentante il tratto in galleria, e due che rappresentano i tratti all'aperto che precedono e seguono la galleria; ovviamente le lunghezze dei vari percorsi variano in relazione al progetto preso in considerazione, come mostrato dalle figure 7.19 e 7.20.

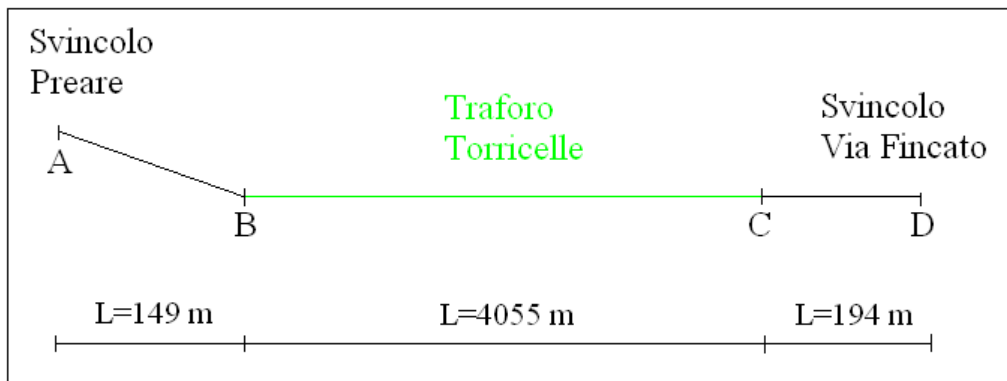


Figura 7.19: schematizzazione rete stradale relativa al primo progetto.

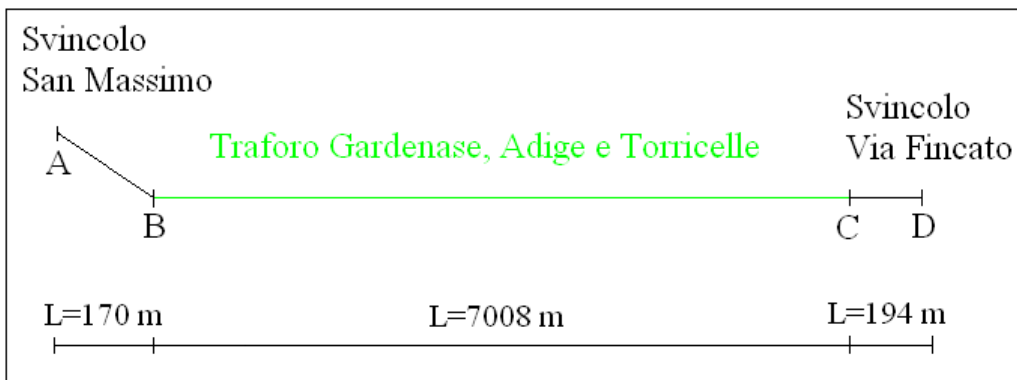


Figura 7.20: schematizzazione rete stradale relativa al secondo progetto.

Ogni tratto è stato definito specificando le coordinate del suo punto iniziale e finale (tabelle 7.6 e 7.7, figure 7.21 e 7.22).

Punto	x	y
A	0	2000
B	149	1908
C	4204	1908
D	4398	1908

Tabella 7.6: caratteristiche delle tratte relative al primo progetto.

Punto	x	y
A	0	2000
B	170	1908
C	7178	1908
D	7372	1908

Tabella 7.7: caratteristiche delle tratte relative al secondo progetto.

2) Data that are modifiable as a function of the route, the time period and the travel direction							
Route characteristics	Section #	Tunnel? (0=NO) (1=YES)	X (m)	Y (m)	Straight line (m)	User defined length (m)	Urban / Rural?
	0		0	2000			
	1	0	149	1908	175	175	Urban
	2	1	4204	1908	4055	4055	Urban
	3	0	4398	1908	194	194	Urban

Figura 7.21: definizione della rete stradale e della zona d'impatto relative al primo progetto.

2) Data that are modifiable as a function of the route, the time period and the travel direction							
Route characteristics	Section #	Tunnel? (0=NO) (1=YES)	X (m)	Y (m)	Straight line (m)	User defined length (m)	Urban / Rural?
	0		0	2000			
	1	0	170	1908	193	193	Urban
	2	1	7178	1908	7008	7008	Urban
	3	0	7372	1908	194	194	Urban

Figura 7.22: definizione della rete stradale e della zona d'impatto relative al secondo progetto.

Si è deciso di descrivere univocamente le due direzioni di traffico per omogeneità del tracciato e perché ai fini del calcolo del rischio dell'area è

irrilevante distinguere il traffico delle sostanze pericolose nelle due direzioni, in quanto il rischio è indipendente dalla direzione di transito dei veicoli.

### 7.5.3.2 Caratteristiche della rete stradale relative al primo progetto preso in esame

Come illustrato nel paragrafo 7.2.3.1, l'asse principale appartiene alla categoria B "Strada extra-urbana principale", e perciò caratterizzato da:

- una velocità di progetto  $v_p = 90/120$  Km/h; nel software è stato inserito il valore di  $v_p = 120$  Km/h per i veicoli leggeri, e di 80Km/h per quelli pesanti;
- 2 corsie per senso di marcia.

Le valutazioni TGM per il traffico non ADR forniscono come risultati:

- 51856 veicoli leggeri/giorno (93,06%);
- 3867 veicoli pesanti/giorno (6,94%).

Per un totale di 55'723 veicoli/giorno. I valori riportati nel software sono quelli mostrati in figura 7.23.

Total traffic (veh/h)	HGV ratio (adim)	Bus / coaches Ratio (adim)	Light vehicles speed (km/h)	HGV/Bus speed (km/h)	Delay (s) for stopping approaching traffic	Number of lanes	First run: User defined or Default frequency?	Accident frequency (/veh.km)	DG transport correction factor	Density of population (inhab/km <sup>2</sup> )	Country
2322	0.0694	0.00001	120	80	9999	2	2	1.52E-06	3.85E-01	2.67E+02	Italy
2322	0.0694	0.00001	120	80	9999	2	2	5.38E-07	3.85E-01	2.67E+02	Italy
2322	0.0694	0.00001	120	80	9999	2	2	1.52E-06	3.85E-01	2.67E+02	Italy

Figura 7.23: caratteristiche della rete stradale.

### 7.5.3.3 Caratteristiche della rete stradale relative al secondo progetto preso in esame

Anche in questo caso l'asse principale appartiene alla categoria B "Strada extra-urbana principale", ma in galleria è impedito l'ingresso ai mezzi pesanti e pertanto è possibile adottare per l'altezza libera verticale il valore limite inferiore eccezionale di 3,20 m ed a fronte di tale composizione della

piattaforma la velocità di progetto è fissata ad un valore pari a  $v_p = 80$  Km/h, mantenendo 2 corsie per senso di marcia.

Si considerano le valutazioni TGM esclusivamente per il traffico leggero e queste forniscono un valore pari a 45639 veicoli al giorno.

Il software QRAM, però, non consente di modellare tunnel caratterizzati da una sezione trasversale a carreggiate sovrapposte ed inoltre non permette neppure l'introduzione di un setto che schematizzi la soletta interposta tra le due carreggiate.

Pertanto, non è il programma ideale per calcolare il rischio relativo al secondo progetto presentato.

Nel nostro studio abbiamo ipotizzato di considerare, per il tratto in galleria, un valore pari al doppio del traffico stimato, per tener conto del fatto che se si verifica un incidente al livello superiore, con lo sviluppo di un incendio o un'esplosione, allora verrà coinvolto anche il traffico al livello inferiore, e viceversa (figura 7.24).

Total traffic (veh/h)	HGV ratio (adim)	Bus / coaches Ratio (adim)	Light vehicles speed (km/h)	HGV/Bus speed (km/h)	Delay (s) for stopping approaching traffic	Number of lanes	First run: User defined or Default frequency?	Accident frequency (/veh.km)	DG transport correction factor	Density of population (inhab/km <sup>2</sup> )	Country
1902	1E-14	1E-14	80	80	9999	2	2	1.52E-06	3.85E-01	2.89E+02	Italy
3804	1E-14	1E-14	80	80	9999	2	2	3.43E-07	3.85E-01	2.89E+02	Italy
1902	1E-14	1E-14	80	80	9999	2	2	1.52E-06	3.85E-01	2.89E+02	Italy

Figura 7.24: caratteristiche della rete stradale.

### 7.5.3.4 Caratteristiche della galleria

Anche il tratto in galleria appartiene alla categoria B "Strada extra-urbana principale".

Le caratteristiche geometriche del tunnel, le proprietà del terreno in cui si è inserita l'infrastruttura, le specifiche degli impianti di ventilazione, drenaggio ed antincendio, che sono state inserite nel software, sono quelle descritte nei paragrafi precedenti, tratte dalle relazioni tecniche ed illustrative dei due progetti.

### **7.5.4 Le sostanze pericolose**

Non avendo a disposizione i dati relativi al traffico di merci pericolose nell'area di studio, sono stati utilizzati i risultati ottenuti dal censimento effettuato dalla Regione Emilia Romagna sull'autostrada A1 nel 2005 (E. Lischi, 2007).

La stima diretta dei flussi di traffico delle merci pericolose trasportate su gomma risulta generalmente difficoltosa, a causa dell'elevato numero di trasporti effettuati giornalmente; perciò il reperimento delle informazioni riguardanti il trasporto di merci pericolose trasportate su gomma avviene attraverso un censimento delle merci in ingresso ed in uscita dalle singole aziende presenti nel territorio.

Per le aziende interessate al censimento, sono state specificate le tipologie di sostanze pericolose, le quantità trasportate, il numero di vettori interessati al trasporto, e le rotte seguite dai vettori.

I risultati del censimento sono stati organizzati sotto forma di tabelle, specificando per ogni direzione:

- sostanza pericolosa trasportata, identificata dal codice ONU;
- la quantità trasportata, sia in termini di numero di vettori che di tonnellate per anno;
- il nodo di arrivo e il nodo di partenza della spedizione riguardante la sostanza pericolosa.

Un censimento a parte è stato effettuato per i flussi di GPL, considerando esclusivamente le quantità in ingresso ai maggiori depositi della regione, in quanto le quantità in uscita da tali depositi sono dirette verso un numero elevato di destinazioni finali, delle quali è difficile tener conto.

Non è stato effettuato alcun censimento per i flussi di carburanti, in quanto la loro distribuzione è gestita esternamente dalla regione Emilia Romagna.

Nel censimento sono state trascurate, per tutte le sostanze pericolose, le spedizioni trans-regionali, ovvero quelle spedizioni che attraversano la Regione Emilia Romagna, ma non hanno né il nodo di arrivo, né il nodo di partenza

all'interno di tale regione; però è necessario considerare che tali flussi potrebbero essere significativi.

Nelle tabelle 7.8 e 7.9 si riporta, in riferimento alle due principali direzioni di traffico dell'autostrada A1 (direzione Sud e Nord) e alle tipologie di mezzo di contenimento (autobotte o cylinders):

- 1) nella prima colonna il numero ONU che identifica la sostanza pericolosa;
- 2) nella seconda colonna la denominazione della sostanza pericolosa;
- 3) nella terza colonna il flusso della sostanza pericolosa, in termini di veicoli/anno e tonnellate/anno;
- 4) nella quarta colonna il numero e la denominazione della classe di rischio della guida ERG, 2004 alla quale la sostanza pericolosa appartiene.

Dallo studio emerge che sul tratto autostradale d'interesse sono trasportate 92 sostanze pericolose differenti, per un totale di:

- 9230,86 veicoli/anno e 116949.09 t/anno in direzione Sud, tra trasporto in autobotte ed in cylinders;
- 2891,34 veicoli/anno e 70063.88 t/anno in direzione Nord, tra trasporto in autobotte ed in cylinders.

Se si considera esclusivamente il trasporto in autobotte, come riportato nelle tabelle 7.8 e 7.9, le sostanze pericolose sono 22:

<b>Trasporto in autobotte(Direzione Nord)</b>					
<b>Sostanza pericolosa</b>		<b>Flusso</b>		<b>Classe di rischio</b>	
<b>Nro ONU</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Veicoli/anno</b>	<b>t/anno</b>		
1951	Argon liquido refrigerato	241	5273.0	120	Gas inerti(inclusi i liquidi refrigerati)
1977	Azoto liquido refrigerato	540	15'120.0	120	Gas inerti(inclusi i liquidi refrigerati)
1073	Ossigeno liquido refrigerato	797	18'966.0	122	Gas ossidanti(inclusi i liquidi refrigerati)
1005	ammoniaca	123	3073.0	125	Gas- corrosivi

1170	Etanolo	1347	28'887.0	127	Liquidi infiammabili(Polari/Miscibili in acqua)
1193	Etilmetil acetone	35	945.0	127	Liquidi infiammabili(Polari/Miscibili in acqua)
3065	Bevande alcoliche	23	529.0	127	Liquidi infiammabili(Polari/Miscibili in acqua)
1208	Esano	6	150.0	128	Liquidi infiammabili(Non Polari/Miscibili in acqua)
1301	Acetato di vinile stabilizzato	60	1620.0	129	Liquidi infiammabili(Polari/Miscibili in acqua/nocivi)
1294	Toulene	35	612.5	130	Liquidi infiammabili(Non Polari/Miscibili in acqua/nocivi)
1307	Xilene	24	562.5	130	Liquidi infiammabili(Non Polari/Miscibili in acqua/nocivi)
1230	Metanolo	40	1080.0	131	Liquidi infiammabili/Tossici
2789	Acido acetico glaciale o in soluzione contenente più del 80% di acido	5	130.0	132	Liquidi infiammabili/Corrosivi
2067	Fertilizzanti con nitrato d'ammonio	665	18'620.0	140	LiquiOssidanti
2072	Ammoniaca in soluzione acquosa,contenente minimo 10% e max 35% di ammoniaca	110	3'191.2	154	Sostanze tossiche e/o corrosive (Non combustibili)
2078	Diisocianato di toulene	15	330.0	156	Sostanze tossiche e/o corrosive (combustibili/sensibili all'acqua)

Tabella 7.9: trasporto in autobotte in direzione Nord dell'A1.



<b>Trasporto in autobotte(Direzione Sud)</b>					
<b>Sostanza pericolosa</b>		<b>Flusso</b>		<b>Classe di rischio</b>	
<b>Nro ONU</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Veicoli/anno</b>	<b>t/anno</b>		
1075	GPL	1'857	142'825.3	115	Gas infiammabili(inclusi i liquidi refrigerati)
1977	Azoto liquido refrigerato	50	1'400.0	120	Gas inerti(inclusi i liquidi refrigerati)
1170	Etanolo	59	1616.0	127	Liquidi infiammabili(Polari/Miscibili in acqua)
3065	Bevande alcoliche	515	13'907.6	127	Liquidi infiammabili(Polari/Miscibili in acqua)
1294	Toulene	5	110.5	130	Liquidi infiammabili(Non Polari/Miscibili in acqua/nocivi)
1307	Xilene	1	27.5	130	Liquidi infiammabili(Non Polari/Miscibili in acqua/nocivi)
1830	Acido solforico contenente minimo il 51% di acido	145	4'029.5	137	Sostanze –Reattive con l'acqua-Corrosive
2014	Perossido di idrogeno(20/60%)	217	5'642.0	140	LiquiOssidanti
3105	Perossido organico di tipo D, liquido	1	13.0		
1814	Idrossido di potassio in soluzione	2	55.6	154	Sostanze tossiche e/o corrosive (Non combustibili)
2072	Ammoniaca in soluzione acquosa,contenente minimo 10% e max 35% di ammoniaca	7	140.0	154	Sostanze tossiche e/o corrosive (Non combustibili)

Tabella 7.9: trasporto in autobotte in direzione Sud dell'A1.

Le 22 sostanze pericolose trasportate in autobotte, appartengono a 15 classi di rischio; effettuando la somma dei flussi delle sostanze pericolose appartenenti alla stessa classe di rischio è possibile ottenere i dati riportati nelle tabelle 7.10 e 7.11.

<b>Classe di rischio</b>		<b>Flusso delle sostanze pericolose (veicoli/anno)</b>
120	Gas inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	781
122	Gas ossidanti (inclusi i liquidi refrigerati)	797
125	Gas corrosivi	123
127	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua	1405
128	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua	6
129	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua e nocivi	60
130	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua e nocivi	59
131	Liquidi infiammabili e tossici	40
132	Liquidi infiammabili e corrosivi	5
140	Ossidanti	665
154	Sostanze tossiche e/o corrosive non combustibili	110
156	Sostanze tossiche e/o corrosive sensibili all'acqua e combustibili	15
<b>Totale</b>		<b>4066</b>

Tabella 7.10: flusso delle sostanze pericolose in relazione alla classe di rischio per direzione Sud.

<b>Classe di rischio</b>		<b>Flusso delle sostanze pericolose (veicoli/anno)</b>
115	Gas inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	1857
120	Gas ossidanti (inclusi i liquidi refrigerati)	50
127	Gas corrosivi	574
130	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua	6
137	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua	145
140	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua e nocivi	217
145	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua e nocivi	1
154	Liquidi infiammabili e tossici	9
<b>Totale</b>		<b>2859</b>

Tabella 7.11: flusso delle sostanze pericolose in relazione alla classe di rischio per direzione Nord.

Ai fini di una prima valutazione del rischio, quale è quella effettuata nel presente studio, sono state escluse:

- le sostanze tossiche e corrosive reattive con l'acqua, sia combustibili che non combustibili (appartenenti alle classi di rischio 137,156);
- gli ossidanti (appartenenti alla classe di rischio 140);
- i perossidi (appartenenti alla classe di rischio 145);
- le sostanze tossiche non combustibili (appartenenti alla classe di rischio 154).

Escludendo le sostanze pericolose appartenenti alle classi di rischio precedentemente citate, è possibile ottenere i dati riportati nelle tabelle 7.12 e 7.13.

<b>Classe di rischio</b>		<b>Flusso delle sostanze pericolose (veicoli/anno)</b>
120	Gas inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	781
122	Gas ossidanti (inclusi i liquidi refrigerati)	797
125	Gas corrosivi	123
127	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua	1405
128	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua	6
129	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua e nocivi	60
130	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua e nocivi	59
131	Liquidi infiammabili e tossici	40
132	Liquidi infiammabili e corrosivi	5
<b>Totale</b>		<b>3276</b>

Tabella 7.12: flusso delle sostanze pericolose in relazione alla classe di rischio per direzione Sud.

<b>Classe di rischio</b>		<b>Flusso delle sostanze pericolose (veicoli/anno)</b>
115	Gas inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	1857
120	Gas ossidanti (inclusi i liquidi refrigerati)	50
127	Gas corrosivi	574
130	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua	6
<b>Totale</b>		<b>2488</b>

Tabella 7.13: flusso delle sostanze pericolose in relazione alla classe di rischio per direzione Nord.

L'autostrada A1, però, presenta notevoli differenze rispetto all'anello circonvallatorio delle Tangenziali di Verona a cui appartiene il traforo delle Torricelle in termini di:

- analogia funzionale dell'infrastruttura svolta all'interno della rete stradale nazionale;
- specifiche geometriche di tracciato;

- tipologie e flussi di traffico circolanti sia ordinari, sia di merci pericolose;
- tipologia ed urbanizzazione del territorio attraversato dal collegamento.

Per ovviare a questa lacuna, nell'impossibilità di poter disporre dei flussi ADR specifici per il caso in esame, il flusso di merci pericolose è stato assunto pari al 30% ed al 60% di quello emerso dal censimento dell'autostrada A1:

$$3276 + 2488 = 5764 \text{ veic/anno} = 15,79 \text{ veic/giorno}$$

$$\rightarrow 60\% = 9,47 \text{ veic/giorno}$$

$$\rightarrow 30\% = 4,74 \text{ veic/giorno}$$

Ai fini della valutazione del rischio, è opportuno effettuare un ulteriore raggruppamento delle tipologie di sostanze pericolose oggetto di trasporto.

In tabella 7.14 si riportano le macrocategorie considerate e le sostanze chiave assunte come rappresentative di ogni macrocategoria.

<b>Macrocategoria di rischio</b>	<b>Sostanze chiave</b>	<b>Possibile evento incidentale</b>
Gas liquefatti infiammabili	GPL	Esplosione e/o incendio
Gas liquefatti non infiammabili	Anidride carbonica	Esplosione
Gas tossici	Ammoniaca	Nube tossica
Liquidi infiammabili	Benzina	Incendio
Liquidi infiammabili e tossici	Acrilonitrile	Incendio e/o nube tossica
	Acroleina	

Tabella 7.14: macrocategorie di rischio.

Nelle tabelle 7.15 e 7.16 si riportano gli accorpamenti delle classi di rischio in macrocategorie, e il valore di flusso riferito alla macrocategoria.

<b>Macrocategoria di rischio</b>	<b>Sostanza chiave</b>		<b>Classe di rischio</b>	<b>Flusso (veic/anno)</b>
Gas liquefatti non infiammabili	Anidride carbonica	120	Gas inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	1578
		122	Gas ossidanti inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	
Gas tossici	Ammoniaca	125	Gas corrosivi	123
Liquidi infiammabili	Benzina	127	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua	1535
		128	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua	
		129	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua e nocivi	
		130	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua e nocivi	
		132	Liquidi infiammabili e corrosivi	
Liquidi infiammabili e tossici	Acilonitrile/ Acroleina	131	Liquidi infiammabili e tossici	40
<b>Totale</b>				<b>3276</b>

Tabella 7.15: flusso delle sostanze pericolose in relazione alla macrocategoria di appartenenza in direzione Sud.

<b>Macrocategoria di rischio</b>	<b>Sostanza chiave</b>		<b>Classe di rischio</b>	<b>Flusso (veic/anno)</b>
Gas liquefatti infiammabili	GPL	115	Gas infiammabili (inclusi i liquidi refrigerati)	1857
Gas liquefatti non infiammabili	Anidride carbonica	120	Gas inerti (inclusi i liquidi refrigerati)	50
		122	Gas ossidanti (inclusi i liquidi refrigerati)	
Liquidi infiammabili	Benzina	127	Liquidi infiammabili polari/miscibili in acqua	581
		130	Liquidi infiammabili non polari/non miscibili in acqua e nocivi	
<b>Totale</b>				<b>2848</b>

Tabella 7.16: flusso delle sostanze pericolose in relazione alla macrocategoria di appartenenza in direzione Nord.

In definitiva, i valori di flusso inseriti nel software sono quelli riportati in tabella 7.17.

<b>Macrocategorie di rischio</b>	<b>Sostanze chiave</b>	<b>Traffico 30% A1</b>	<b>Traffico 60% A1</b>	<b>DGi/DG 30% A1</b>	<b>DGi/DG 60% A1</b>
Gas liquefatti infiammabili	GPL	0.00043	0.00085	1.52	3.03
Gas tossici	Ammoniaca	0.000025	0.000053	0.09	0.19
Liquidi infiammabili	Benzina	0.00049	0.00098	1.75	3.50
Liquidi infiammabili e tossici	Acroleina	0.000011	0.000025	0.04	0.09

Tabella 7.17: flussi inseriti nel software.

### 7.5.5 Le tipologie di mezzo di contenimento

Sono state considerate esclusivamente le sostanze pericolose trasportate in autobotte, poiché ai fini del calcolo del rischio, le sostanze pericolose trasportate in cylinders sono trascurabili. La maggioranza degli studi di rischio ha dimostrato che:

- pur non essendo trascurabile in termini di traffico, cioè di numero di veicoli all'anno, il flusso delle sostanze pericolose trasportate in cylinders, non è altrettanto rilevante in termini di quantità;
- le sostanze pericolose trasportate in cylinders originano scenari incidentali con conseguenze trascurabili rispetto agli stessi scenari incidentali originati da sostanze pericolose trasportate in autobotte.

Nella valutazione del rischio si considerano le sostanze pericolose trasportate in autobotti aventi le capacità previste di default dal software (tabella 7.18).

<b>Macrocategorie di rischio</b>	<b>Sostanze chiave</b>	<b>Capacità dell'autobotte</b>
Gas liquefatti infiammabili	GPL	18
Gas tossici	Ammoniaca	20
Liquidi infiammabili	Benzina	28
Liquidi infiammabili e tossici	Acroleina	25

Tabella 7.18: caratteristiche delle autobotti considerate nel software QRAM.

### 7.5.6 Categorie di rottura ed eventuali scenari incidentali

Al fine di sfruttare al massimo le potenzialità del software, per effettuare l'analisi di rischio del caso in esame, sono stati considerati solo alcuni scenari incidentali (vedi figura 7.25) e le rispettive categorie di rottura previste di default dal software per le sostanze pericolose definite (vedi tabella 7.19).



Scenario 1 (HGV fire 20 MW):	Yes
Scenario 2 (HGV fire 100 MW):	Yes
Scenario 3 (BLEVE of a 50kg LPG cylinder):	No
Scenario 4 (Motor spirit pool fire):	Yes
Scenario 5 (VCE of motor spirit):	Yes
Scenario 6 (Chlorine release from a 20 tons tank):	No
Scenario 7 (BLEVE of an 18 tons LPG tank):	Yes
Scenario 8 (VCE from an 18 tons LPG tank):	Yes
Scenario 9 (Torch fire from an 18 tons LPG tank):	No
Scenario 10 (Ammonia release from an 18 tons tank):	Yes
Scenario 11 (Acrolein release from a 25 tons tank):	Yes
Scenario 12 (Acrolein release from a 100 l cylinder):	No
Scenario 13 (BLEVE of a 20 ton liquefied CO2 tank):	Yes

Figura 7.25: scelta degli scenari incidentali.

Macrocategoria di rischio	Sostanza pericolosa	Categoria di rottura
Gas liquefatti infiammabili	GPL	Rilascio continuo $\Phi = 50\text{mm}$ Rottura catastrofica
Gas tossici	Ammoniaca	Rilascio continuo $\Phi = 50\text{mm}$
Liquidi infiammabili	Benzina	Rilascio continuo $\Phi = 100\text{mm}$
Liquidi infiammabili e tossici	Acroleina	Rilascio continuo $\Phi = 100\text{mm}$

Tabella 7.19: categorie di rottura.

### 7.5.7 Descrizione della popolazione

L'unico dato relativo alla popolazione che è stato inserito è la densità di popolazione, il cui valore stimato nello studio di fattibilità dei due progetti, è pari a 267 abitanti ogni  $\text{km}^2$  nel primo caso, e 289 abitanti ogni  $\text{km}^2$  nel secondo.

### 7.5.8 Risultati forniti dal software QRAM

Il software effettua il calcolo del rischio sociale, ovvero esprime l'impatto di un singolo evento su un'intera comunità, rappresentato da curve F-N riferite agli scenari incidentali considerati.

Come già descritto nel capitolo 4, si tratta di grafici che riportano in ordinata la frequenza cumulata  $F$  con la quale, a seguito di tutti gli incidenti ipotizzabili a causa di un'attività, si ha nell'area considerata un numero di morti maggiore o uguale a  $N$ , riportato in ascissa.

Il QRAM fornisce inoltre il valore del numero atteso di vittime che viene graficamente corrisponde, nel diagramma  $F-N$ , all'area sottesa dalla curva.

#### **7.5.8.1 Risultati relativi al progetto preliminare proposto da Technital S.p.A., Girpa S.p.A. e Verona Infrastrutture Consorzio Stabile**

Per quanto concerne il primo progetto esaminato, il calcolo è stato effettuato prendendo in considerazione:

- i valori di traffico ADR pari al 60% di quello ricavato dal censimento effettuato dalla Regione Emilia Romagna sull'autostrada A1 nel 2005;
- i valori di traffico ADR pari al 30% di quello ricavato dal censimento effettuato dalla Regione Emilia Romagna sull'autostrada A1 nel 2005.

Pertanto il software ha elaborato due curve mostrate rispettivamente nelle figure 7.26 e 7.27.

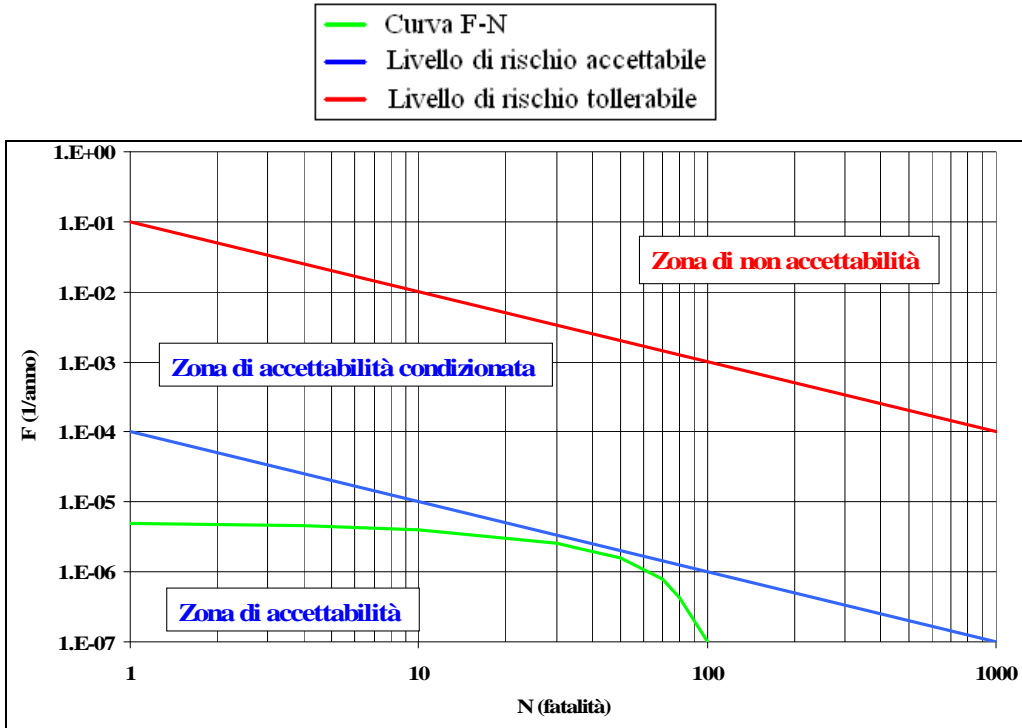


Figura 7.26: curva F-N cumulata complementare complessiva corrispondente al 60% del traffico ADR sull'A1.

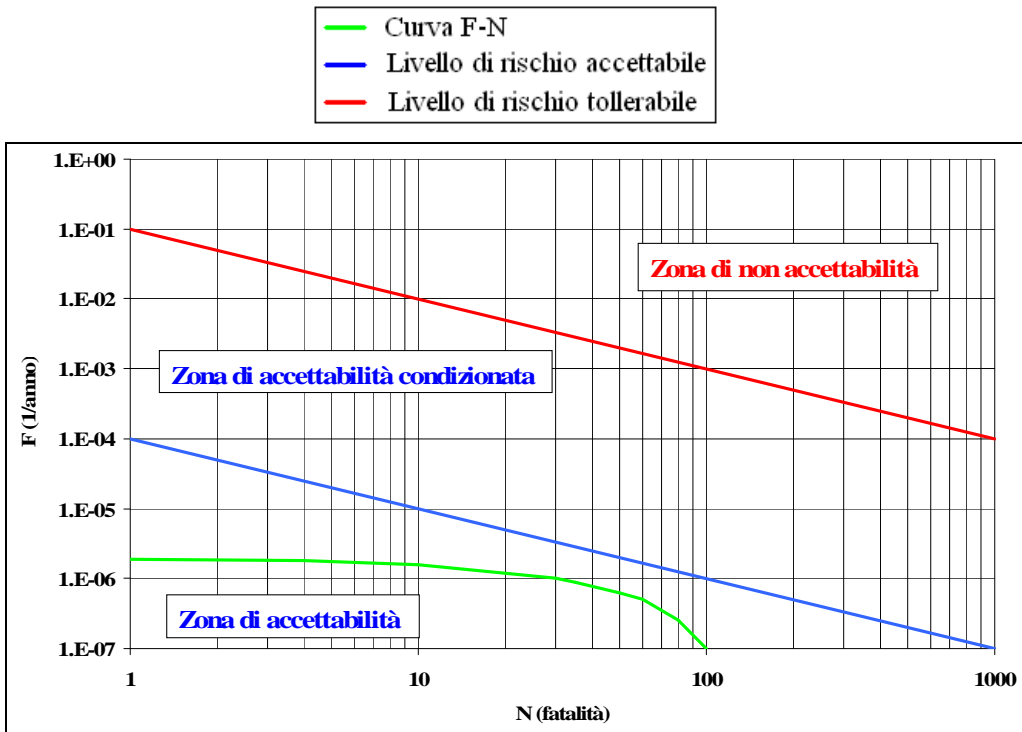


Figura 7.27: curva F-N cumulata complementare complessiva corrispondente al 30% del traffico ADR sull'A1.

Per poter confrontare al meglio le due curve ottenute le abbiamo riportate in uno stesso diagramma rappresentato nella figura 7.28.

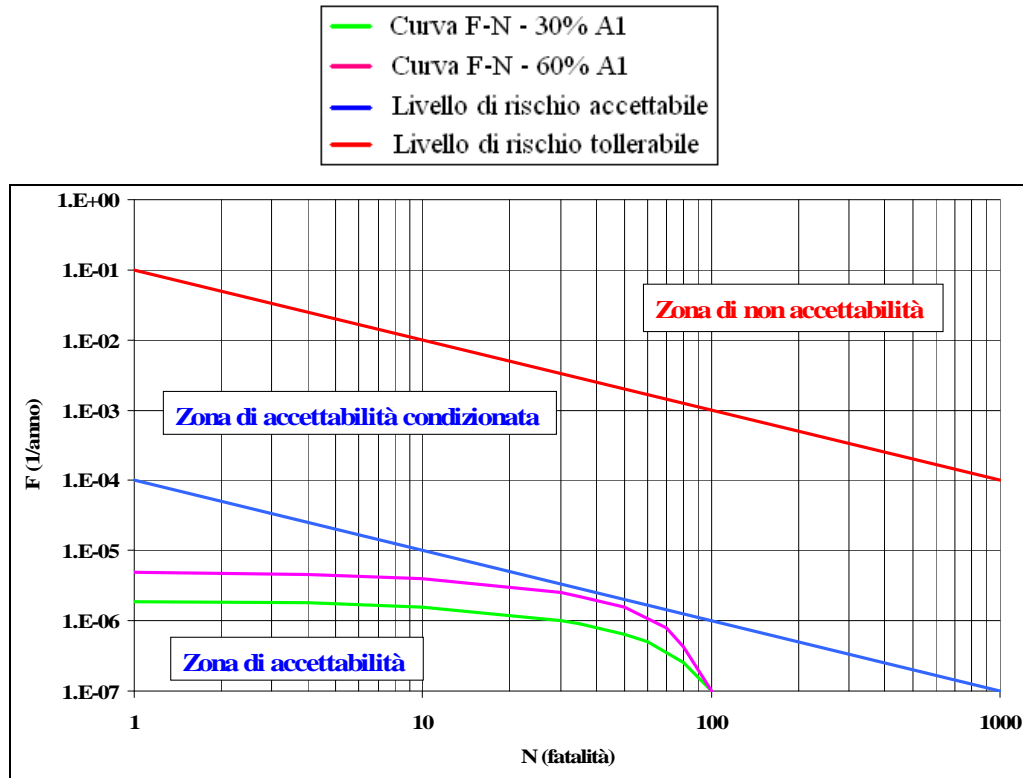


Figura 7.28: curve F-N a confronto.

I risultati ottenuti evidenziano che entrambe le curve F-N si trovano all'interno della zona di rischio accettabile, poiché si attestano al di sotto della soglia limite, restando pertanto sempre conformi allo standard ANAS.

I valori del numero atteso di vittime forniti dal QRAM, corrispondenti alle due curve rappresentate sopra, sono riportati nella tabella 7.20.

Caso in esame	Valore atteso del danno [fatalità/anno]
30% del traffico ADR sull'A1	$1,356 \cdot 10^{-4}$
60% del traffico ADR sull'A1	$2,746 \cdot 10^{-4}$

Tabella 7.20: valore atteso del danno per i due casi presi in esame.

Ovviamente, sia dal grafico che dalla tabella, si evince che considerando il 60% del traffico ADR sull'A1, anziché il 30%, il rischio è maggiore. Nella realtà, però, questa condizione è difficile che si verifichi in quanto, come già spiegato, l'autostrada in esame presenta notevoli differenze rispetto all'anello circonvallatorio a cui appartiene il traforo delle Torricelle e per il quale è quindi più probabile un traffico pari circa al 30% dell'A1. In ogni modo abbiamo considerato anche la situazione più gravosa per mantenersi a favore di sicurezza.

#### **7.5.8.2 Risultati relativi al progetto preliminare proposto da Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A..**

Abbiamo applicato anche al secondo progetto preso in esame il software QRAM per effettuare la valutazione quantitativa del rischio associato a tale intervento.

Come per il caso precedente, il programma ci ha fornito i risultati in termini di numero atteso di vittime all'anno e curva F-N cumulata complementare complessiva.

Per il caso in esame il valore atteso del danno è quello riportato nella tabella 7.21.

<b>Caso in esame</b>	<b>Valore atteso del danno [fatalità/anno]</b>
Progetto Geodata	$2,547 \cdot 10^{-3}$

Tabella 7.21: valore atteso del danno per il caso preso in esame.

Mentre la curva F-N ottenuta dall'applicazione è rappresentata nel diagramma di figura 7.29.

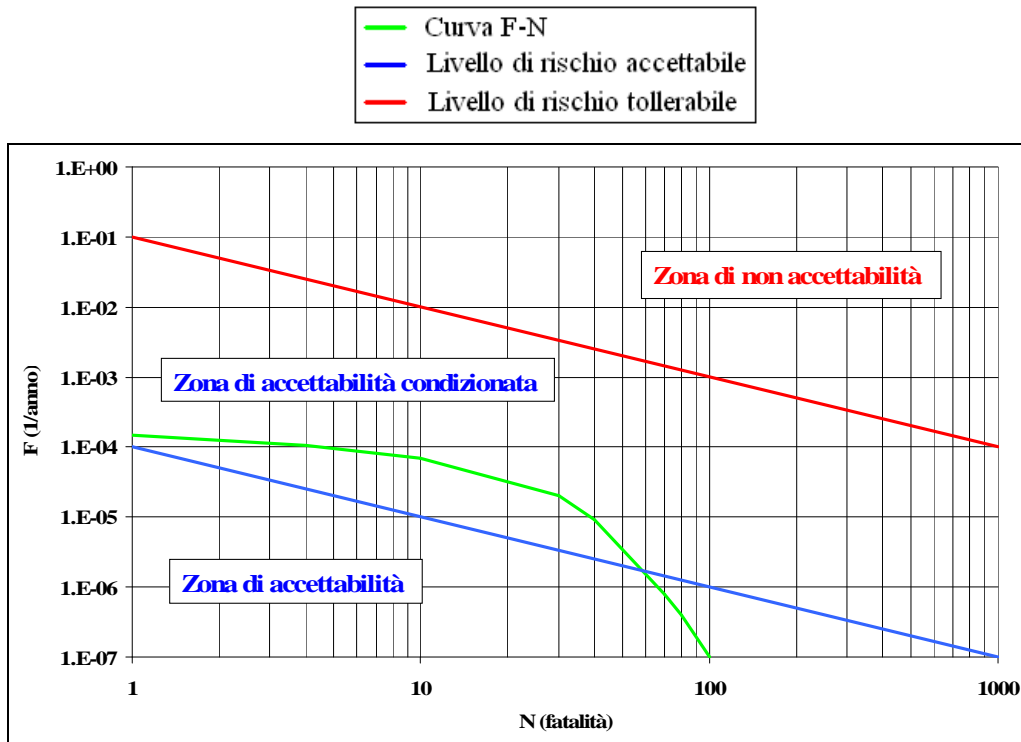


Figura 7.29: curva F-N cumulata complementare complessiva.

In questo caso la curva è al di sopra della soglia di rischio accettabile, ovvero si trova nella cosiddetta zona di *accettabilità condizionata*. Si può notare quindi che il rischio corrispondente a tale proposta è molto elevato e trattandosi di un progetto preliminare per una galleria di nuova formazione non è accettabile.

### 7.5.8.3 Confronto tra i risultati ottenuti e relativi alle due proposte di intervento

Abbiamo riportato in un unico grafico tutte le curve F-N relative ai due progetti presentati per rendere ancora più evidenti le differenze tra le due proposte di intervento in termini di rischio.

La figura 7.30 riassume i grafici mostrati sopra in un unico diagramma.

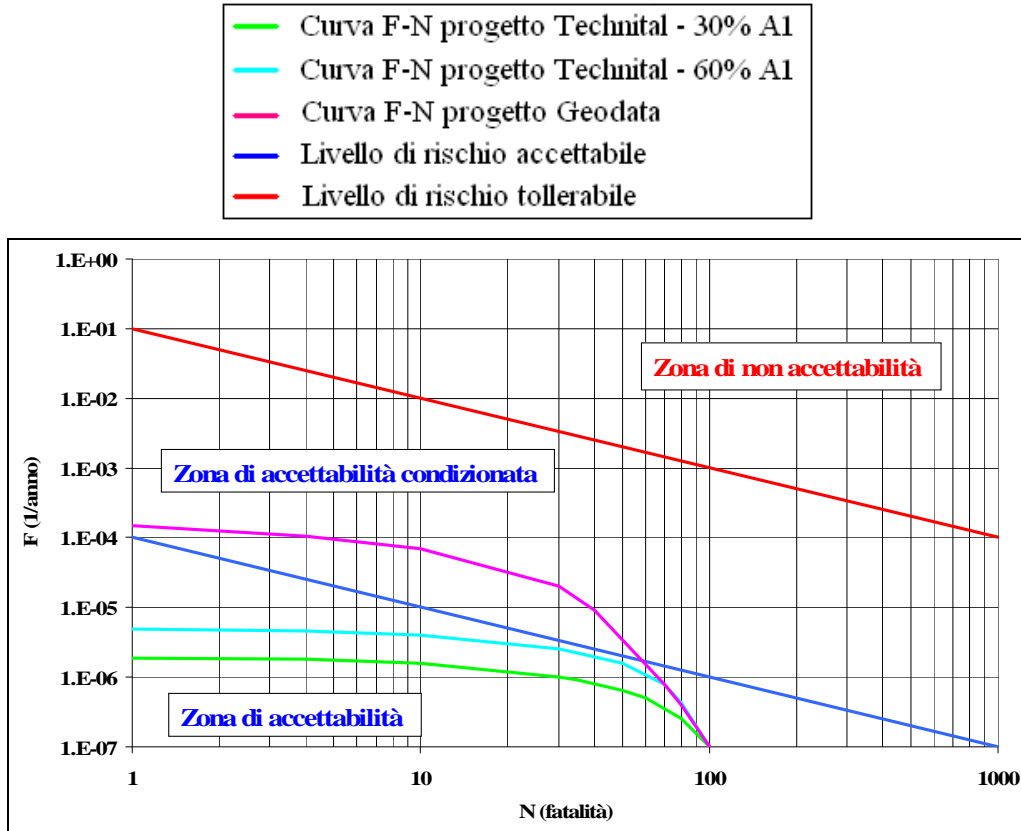


Figura 7.30: curve F-N cumulate complementari complessive, relative ai due progetti, a confronto.

Come si può notare il software ha fornito per il secondo progetto esaminato una curva F-N nettamente superiore rispetto alle altre, rappresentata in fucsia.

Tale risultato ce lo saremmo potuti aspettare anche prima dell'applicazione del QRAM poiché in questa proposta di intervento viene presa in considerazione una galleria costituita da un'unica canna in cui le due carreggiate stradali sono disposte su due livelli e separate da una soletta.

Questo implica, per ogni senso di marcia, una sezione trasversale molto ridotta con il conseguente aumento delle conseguenze fisiche che si possono generare in caso di incidente. Infatti l'ambiente è molto più confinato rispetto ai tradizionali tunnel e pertanto gli effetti termici, tossici e dovuti alla sovrappressione in caso di incendi, esplosioni o altri eventi critici vengono notevolmente amplificati. Si deve anche tenere conto del fatto che le due carreggiate dipendono fortemente l'una dall'altra, poiché i possibili scenari

incidentali che si verificheranno lungo uno dei due livelli probabilmente provocheranno danni anche nell'altro.

Inoltre è importante considerare anche l'aspetto psicologico degli utenti che percorrono l'infrastruttura. Infatti se i tunnel con sezioni usuali rappresentano un forte condizionamento nella guida degli automobilisti, a maggior ragione all'interno di un manufatto di questo tipo, con un'altezza libera pari a 3,20m, saranno ancora più probabili manovre pericolose che aumentano la probabilità di accadimento dei possibili eventi incidentali.

Queste considerazioni ci hanno portato stabilire che la proposta presentata da Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A. non è accettabile proprio per motivi legati alla sicurezza. Pertanto l'analisi di rischio è stato uno strumento analitico fondamentale nello studio di questi progetti.





# Capitolo 8

## Conclusioni

### 8.1 Obbiettivi

L'analisi proposta da questo lavoro pone l'attenzione circa la sicurezza in tema di gallerie stradali. Una gran parte di opere sotterranee oggi presenti sulla rete italiana risultano vecchie e troppo spesso non adeguate agli odierni carichi di traffico. Andrebbero riviste sia da un punto di vista della sicurezza, ma anche della struttura vera e propria. Spesso l'opinione pubblica si rende conto di questo fatto dalle notizie di cronaca, magari di qualche incidente in galleria con esiti catastrofici.

Pertanto assume un'importanza fondamentale il concetto di "rischio", che deve essere definito da un punto di vista quantitativo, poiché è necessario poterlo misurare e valutare oggettivamente nella progettazione di un tunnel in sicurezza.

L'obiettivo del presente elaborato è stato quello, innanzitutto, di spiegare tutte le fasi da sviluppare per eseguire correttamente l'"analisi di rischio" di un qualunque sistema. Il punto più ostico è rappresentato dalla valutazione delle frequenze di accadimento degli eventuali scenari incidentali, poiché deriva dalla combinazione di due ulteriori analisi: quella ad "albero degli eventi" (*Event Tree Analysis, ETA*) e quella ad "albero delle cause" (*Fault Tree Analysis, FTA*). Lo scopo è quello di identificare le condizioni che possono innescare un determinato evento considerato pericoloso per il sistema in esame. Nei sistemi coerenti l'analisi ETA consiste nel prodotto tra la frequenza dell'evento iniziatore e la probabilità di passaggio lungo ogni ramo che attraversa il diagramma che si ottiene quantificando il relativo albero delle cause. Se invece si presentano dipendenze tra i punti di diramazione dell'albero degli eventi, l'analisi si complica poiché il sistema non è più coerente. Questa è

la condizione sulla quale ci siamo concentrati maggiormente e per la quale abbiamo presentato diversi tipi di approccio.

In un secondo momento sono stati studiati tutti i modelli da utilizzare per calcolare le conseguenze fisiche degli scenari incidentali ritenuti critici per l'ambiente confinato della galleria stradale e che si possono verificare all'interno dell'infrastruttura, in cui ovviamente transitano, oltre alle merci generiche, anche le sostanze pericolose.

Queste tecniche analitiche permettono quindi di progettare la sicurezza, non lasciando più spazio al caso, ma affrontando il problema da un punto di vista squisitamente ingegneristico.

Successivamente è stato presentato nel dettaglio il software QRAM che viene utilizzato per la valutazione quantitativa del rischio legato alla rete stradale, tenendo conto di percorsi sia all'aperto che in galleria, e che fornisce come risultato finale la valutazione del rischio sociale, espresso tramite curve F/N valutando il rischio per l'uomo ed assumendo come danno di riferimento la morte o il ferimento di un individuo.

## **8.2 Applicazione del software QRAM**

Secondo quanto indicato nel D.L. n. 264 del 5 ottobre 2006 e nella circolare ANAS n. 17 del 2006, nel presente studio è stata condotta l'analisi di rischio di due progetti preliminari presentati per il completamento dell'anello circonvallatorio a Nord della città di Verona. La prima proposta di intervento presa in esame prevede la realizzazione di una galleria a doppio fornice, mentre la seconda prevede l'esecuzione di un unico tunnel in cui le due carreggiate stradali sono disposte su due livelli e separate da una soletta.

In entrambi i casi quindi è necessaria la realizzazione di una galleria e pertanto sono stati considerati, in particolare, nove scenari incidentali, riferiti esclusivamente ad eventi considerati critici nell'ambiente confinato dell'infrastruttura da realizzare, quali incendio, collisioni con incendio, sversamento di sostanze infiammabili e rilascio di sostanze tossiche e nocive. Sono stati esclusi dall'analisi gli eventi incidentali che non comportano rischi

aggiuntivi all'utenza in galleria e quelli connessi con la circolazione stradale e la regolamentazione del traffico.

Per effettuare l'analisi è stato necessario stimare i flussi di traffico che interesseranno il tunnel, compreso quello relativo alle merci pericolose, e non essendo disponibile un censimento delle merci in ingresso ed in uscita dai singoli stabilimenti presenti sul territorio nell'intorno dell'opera in esame, sono stati utilizzati i dati riportati in quello realizzato dalla Protezione Civile in collaborazione con la Regione Emilia Romagna per l'autostrada A1 Milano – Napoli.

Abbiamo quindi applicato il software QRAM che ci ha fornito la valutazione del rischio sociale attraverso la curva cumulata complementare complessiva ed il valore atteso del danno.

I risultati ottenuti evidenziano che il primo progetto è significativamente migliore del secondo in termini di sicurezza, in quanto le curve F-N ottenute rappresentano un rischio minore. Infatti tali curve, come mostrato nel capitolo 7, si trovano all'interno della zona di rischio accettabile, poiché si attestano al di sotto della soglia limite, restando pertanto sempre conformi allo standard ANAS. Mentre nel secondo progetto la curva è nettamente al di sopra della soglia di rischio accettabile, ovvero si trova nella cosiddetta zona di *accettabilità condizionata*. Si può notare quindi che il rischio corrispondente a tale proposta è molto elevato e trattandosi di un progetto preliminare per una galleria di nuova formazione non è accettabile.

Questo risultato è dovuto al fatto che nel secondo progetto proposto la sezione trasversale della galleria è ridotta e quindi vengono amplificate le conseguenze fisiche originate da incendi, esplosioni o rilasci di sostanze nocive in termini di effetti termici, tossici e dovuti alla sovrappressione.

Inoltre è importante mettere in evidenza che spesso gli incidenti sono causati da distrazioni, cattive condotte, inosservanza delle comuni regole del codice della strada. Quindi un comportamento corretto alla guida, un rispetto delle segnaletiche, un uso responsabile della strada contribuirebbe in maniera sensibile alla diminuzione degli eventi causati dall'atteggiamento sbagliato delle persone alla guida. Ma una galleria come quella proposta nel secondo

progetto rappresenta un fortissimo condizionamento psicologico sull'utente poiché presenta un'altezza libera pari a 3,20m. Pertanto in questo caso saranno ancora più probabili manovre pericolose che aumentano la probabilità di accadimento dei possibili eventi incidentali.

### **8.3 Potenzialità e limiti del software QRAM**

Dall'impiego pratico del QRAM sono emersi i maggiori vantaggi, ma soprattutto limiti, del software.

Il principale aspetto positivo si incentra sul fatto che il QRAM viene avviato come un foglio elettronico di *Microsoft Windows Excel* e pertanto i risultati che si ottengono sono facilmente esportabili.

Inoltre prevede un'ampia casistica di eventi critici, infatti prende in considerazione 13 casi variabili in funzione del tipo di scenario e della sostanza che lo genera, ovvero:

- incendio, con potenza pari a 20 MW, di un mezzo che trasporta merci non pericolose;
- incendio, con potenza pari a 100 MW, di un mezzo che trasporta merci pericolose;
- esplosione fisica seguita da un incendio (BLEVE) di GPL o di anidride carbonica trasportata come gas liquefatto in pressione;
- incendio di una pozza liquida (pool fire) di benzina;
- esplosione di una nube tossica miscelata con aria (VCE) di benzina o GPL;
- incendio di un getto fluido (torch fire) di GPL;
- rilascio di una nube tossica di cloro, acroleina o GPL;

Un'ulteriore potenzialità significativa è data dal fatto che, per le sezioni in galleria, consente una valutazione dettagliata delle conseguenze che si generano in seguito ai vari eventi critici, poiché permette di stimare il numero di morti e feriti dovuti all'incidente, ma anche i danni alla struttura e gli effetti sull'ambiente circostante.

D'altra parte, per le sezioni in assenza di tunnel questa valutazione delle conseguenze non viene eseguita, infatti il software utilizza semplicemente i risultati di strumenti e modelli non incorporati in esso.

Un altro limite importante è che non consente di modellare gallerie caratterizzate da un tracciato curvilineo, poiché la schematizzazione di una galleria si effettua mediante la definizione delle coordinate iniziali e finali di un segmento rettilineo ed il software non prevede la possibilità che siano presenti due sezioni in sotterraneo consecutive. Il programma, infatti, ci riconosce la facoltà di suddividere il tunnel in tante "sottosezioni", per le quali possono variare la pendenza carreggiata ed i regimi di ventilazione, sia longitudinale che trasversale, ma l'intero segmento rimane sempre rettilineo.

Non consente di modellare tunnel formati da tratti con sezioni trasversali differenti, poiché non prevede la possibilità che siano presenti due sezioni in sotterraneo diverse e consecutive.

Inoltre il QRAM non permette neppure di modellare gallerie che presentano sezioni trasversali a carreggiate sovrapposte, come quella che caratterizza uno dei due progetti sui quali abbiamo lavorato. Pertanto per poter ottenere risultati il più possibile compatibili con la configurazione stradale studiata sono state necessarie una serie di ipotesi, spiegate ampiamente nel settimo capitolo.

Il software distingue il trasporto delle sostanze pericolose, che può avvenire in piccoli contenitori chiamati "*cylinder*", oppure nelle autobotti, ma la capacità di questi mezzi di contenimento è definita di default e non è modificabile dall'utente.

Infine, il limite più rilevante del programma l'abbiamo scoperto studiando il manuale, nel quale viene descritta l'analisi utilizzata per calcolare il valore della probabilità di accadimento dei vari scenari incidentali, che però non è quella prevista dalla normativa. Infatti si evince che per ogni evento critico viene associato un "albero delle cause" definito erroneamente "*event tree*", e pertanto l'"albero degli eventi" vero e proprio non viene preso in considerazione.

Inoltre il QRAM non ci permette di modificare o correggere gli alberi appena descritti, per i quali non vengono specificate le modalità attraverso le quali sono creati, ma ci consente di variare solo il valore finale della probabilità, che altrimenti è definito di default.

## Bibliografia

- A. Karen Reay e D. John Andrews, “*A fault tree analysis strategy using binary decision diagrams*”, 2002.
- P. A.Cubbage e W. A. Simmonds, “*An Investigation of Explosion Reliefs for Industrial Drying Ovens*”, 1995.
- Mara Lombardi e Massimo Guarascio, “*Analisi di rischio*”, 2008.
- D. Kennedy, “*Critical Velocity: Past, Present and Future*”, 1996.
- H. Morgan, “*Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation*”, 1999.
- Sarah Bonvicini, “*Elaborazione dati studio*”, 2005.
- CETU (Centre d’Etudes des Tunnels), “*Essais hydrauliques des systèmes de recueil des liquides répandus sur la chaussée des tunnels routiers*”, 1994.
- D. John Andrews e J. Sarah Dunnett, “*Event-Tree Analysis Using Binary Decision Diagrams*”, 2000.
- BSI (British Standards Institute), “*Fire Safety engineering in buildings*”, 1997.
- Sascia Canale, Salvatore Leonardi e Cinzia Fabiano, istituto strade, ferrovie e aeroporti, Università di Catania, “*Il concetto di rischio e gli ambiti applicativi dell'analisi del rischio*”, 2008.
- Tesi di Roberto Toccaceli Blasi, “*Il rischio nel trasporto di merci pericolose in galleria*”, 2006.
- R. M. Sinnamon e J. D. Andrews, “*Improved accuracy in quantitative fault tree analysis*”, 1997.
- F. Nuti, “*L’analisi costi benefici*”, 1987.
- Tesi di Emanuela Lischi, “*L’analisi di rischio nel trasporto stradale di merci pericolose: due software a confronto*”, 2007.
- R. Borchiellini, F.Colella e V.Verda, “*L’applicazione di modelli numerici per lo studio delle logiche di ventilazione in galleria in caso di incendio*”, 2007.



- S. Lees, *“Loss Prevention in the Process Industries”*, 1980.
- P. Kinsman, *“Major hazard assessment: A survey of current methodology and information sources”*, 1991.
- Stanley Kaplan e B. John Garrick, *“On The Quantitative Definition of Risk”*, 1980.
- Massimo Guarascio, *“Principi base di Ingegneria della Sicurezza”*, 2008.
- Athanasios Papoulis, *“Probabilità, variabili aleatorie e processi stocastici”*, 1997.
- Dottorato di ricerca del dottor Maria Luisa De Guglielmo, *“Rischio di incidente nelle gallerie stradali: applicazione della Probabilistic Risk analysis”*, 2007.
- PIARC Technical Committee, *“Risk analysis for road tunnels”*, 2008.
- M. Considine, S. T. Parry e K. Blything, *“Risk assessments of the transportation of hazardous substances through road tunnels in the United Kingdom”*, 1989.
- H. Ingason, *“Small Scale test of a Road Tanker Fire”*, 1994.
- M. Heselden, *“Studies of fire and smoke relevant to tunnels”*, 1976.
- Tesi di Roberto Collavo, *“Studio della sicurezza nelle gallerie stradali alla luce della nuova normativa europea”*, 2007.
- S. Deal, *“Technical Reference Guild for FPEtool Version 3.2”*, 1994.
- Stan Kaplan, *“The Words of Risk Analysis”*, 1997.
- INERIS, *“Transport of Dangerous goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model”* (QRAM v. 3.60 e v. 3.61) Expert User’s Guide, 2005.
- INERIS, *“Transport of Dangerous goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model”* (QRAM v. 3.60 e v. 3.61) User’s Guide, 2005.
- INERIS, *“Transport of Dangerous goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model”* (QRAM v. 3.60 e v. 3.61) Reference Manual, 2005.

- C. d. R. Mobilità e traffico, Comune di Verona, “*Completamento dell’anello circonvallatorio a Nord, Traforo delle Torricelle - Studio di fattibilità*”, 2008.
- Progetto preliminare Technital S.p.A., Girpa S.p.A. e Verona Infrastrutture Consorzio Stabile, “*Collegamento stradale per il completamento dell’anello circonvallatorio a Nord- Traforo delle Torricelle*”, 2008.
- Progetto preliminare Geodata S.p.A., Net Engineering S.p.A. e Mizar S.p.A., “*Progettazione, Realizzazione e gestione collegamento stradale per il completamento dell’anello circonvallatorio a nord - Traforo delle Torricelle*”, 2008.

### **Riferimenti normativi:**

- Ministero dei lavori pubblici: Circolare Ministeriale n. 7938 del 06/12/1999 “*Sicurezza nella circolazione nelle gallerie stradali con particolare riferimento a veicoli che trasportano materiali pericolosi*”.
- Decreto Ministeriale 05/06/2001, “*Sicurezza nelle gallerie stradali*”.
- Decreto Ministeriale 05/11/2001, “*Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*”.
- Commissione luce ed illuminazione: Norma tecnica UNI 11095 01/12/2003 “*Illuminazione della galleria*”.
- Decreto Ministeriale n.3476 del 14/09/2005, “*Norme di illuminazione delle gallerie stradali*”.
- ANAS – Circolare interna n. 33 del 2005 “*Sagome interne e principali dotazioni infrastrutturali delle gallerie stradali*”.
- Direttiva 2004/54/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, “*Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea*”.
- Decreto Legislativo 5/10/2006, “*Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea*”.
- ANAS – Circolare n. 17 del 2006, “*Linee guida per la progettazione della sicurezza delle gallerie stradali*”.