



Valutazione delle prestazioni e delle incertezze nell'analisi del rischio incendio per le gallerie ferroviarie: “Metodo delle Matrici delle Conseguenze”

Uncertainty evaluation and treatment in a railway tunnels performance-based fire safety design: “Consequences Matrices Method”

Dott. Ing. Marco CIGOLINI^()*

SOMMARIO - L'articolo tratta aspetti specifici in merito alle metodologie di analisi del rischio incendio nei tunnel ferroviari, prendendo in considerazione in particolare eventi incidentali caratterizzati da elevate potenze di incendio originate dal coinvolgimento di merci pericolose, in grado di determinare pesanti conseguenze su eventuali treni passeggeri in transito in galleria al momento dell'incidente. Al fine di dimostrare l'accettabilità del livello di rischio della galleria occorre effettuare un'analisi di rischio, eventualmente implementando a valle della stessa analisi, ulteriori misure di sicurezza. Le valutazioni effettuate per la determinazione del rischio sono in generale affette da incertezze legate alla incompleta conoscenza del sistema nonché dalle aleatorietà che caratterizzano gli stessi fenomeni, determinando la possibilità di una errata valutazione in merito alla accettabilità del progetto di sicurezza della galleria. Nel presente articolo viene dunque proposto un metodo per il trattamento delle incertezze che affliggono la valutazione del rischio degli scenari di incendio di merci pericolose, in grado di migliorare l'accuracy della valutazione del rischio, ove necessario, ad un prezzo limitato in termini di peso computazionale.

Parole chiave: Valutazione del pericolo e del rischio, gallerie ferroviarie, modelli deterministici, modelli di incendio, trattamento delle incertezze, metodi probabilistici, Montecarlo simulation, metodo delle Matrici delle Conseguenze, interdistanza uscite di emergenza in galleria.

1. Introduzione

La progettazione delle misure di sicurezza per le gallerie ferroviarie è indirizzata in Italia dal Decreto Interministeriale del 28/10/2005; esso stabilisce che una certa

SUMMARY - The article is focused on the fire risk assessment methodologies which can be usefully applied for the fire safety design of railway tunnels. Hazards arising from the hazardous events involving trains carrying dangerous goods in tunnels can determine heavy consequences in case of “mixed” operation, where the possibility that passenger trains are getting involved in a large fire is significant. In order to demonstrate the acceptability of the tunnel safety level a risk analysis must be carried out, and within the risk assessment process further safety measures can be showed to be required. Often the uncertainties arising from the lack of knowledge of the system and from the aleatorietà characterizing the phenomena involved in the fire scenarios can determine a switchover in the design acceptability.

A method is therefore proposed in this article aimed at treating the uncertainties enhancing the accuracy of the risk assessment, if required by the overall evaluation process, with a negligible computational burden.

Keywords: Hazard and risk analysis and assessment, railway tunnels, deterministic models, fire models, uncertainties treatment, probabilistic methods, Montecarlo simulation, method of the Matrixes of the Consequences, inter-distances of emergency exits in tunnel.

1. Introduction

Safety design for railway tunnels is addressed in Italy by the Interministerial Decree 28/10/2005; it establishes that for a certain class of tunnels, according to geometric and traffic criteria, a quantitative risk assessment process must be undertaken.

^(*) RFI SpA – Roma.

^(*) RFI SpA - Rome, Italy

SCIENZA E TECNICA

classe di gallerie, rispondenti a criteri geometrici e di traffico, deve essere sottoposta ad analisi quantitativa del rischio.

La metodologia da adottarsi è indicata dallo stesso Decreto; essa è orientata all'impiego di tecniche per lo studio accurato della pericolosità degli effetti di un incendio (e.g. simulazioni tridimensionali di incendio) ed in generale all'approccio prestazionale, confermato dalla successiva emanazione del DM 9/5/2007, nell'ambito più generale della progettazione della sicurezza antincendio per attività non specificamente normate.

Tale approccio implica l'investigazione quantitativa degli scenari di incendio; essa risulta non agevole, a causa della complessità dei fenomeni coinvolti, per questo sono stati sviluppati nel corso degli ultimi due decenni modelli matematici finalizzati alla predizione della evoluzione e degli effetti dell'incendio, specialmente sotto certe condizioni di particolare pericolosità (e.g. negli edifici, nei tunnel ferroviari o stradali, nei grandi centri commerciali, etc.).

In merito all'impiego di tali strumenti di indagine, di tipo deterministico, così denominati per la caratteristica di stabilire una risposta univoca in termini di risultato ai dati di input utilizzati, quali appunto le tecniche di simulazione succitate, occorre predisporre adeguati mezzi per il trattamento delle incertezze associate al modello generale di valutazione, derivanti dalle lacune nella conoscenza del sistema nonché dalla aleatorietà dei fenomeni.

Pertanto, una misura di performance di sicurezza, se affetta da rilevanti incertezze, implica l'eventualità di un *switchover* nella accettabilità del progetto: in altri termini lo stesso progetto, può essere considerato accettabile o non accettabile adottando differenti set di input, parametri di analisi ed assunzioni ugualmente coerenti con il sistema in studio.

Tali problematiche chiedono di essere affrontate in maniera adeguata rispetto al peso associato alle decisioni implicate (e.g. misure di sicurezza infrastrutturali dall'elevato costo realizzativo, misure di esercizio, etc.), fortemente condizionate dalle stesse misure di performance; la teoria indica l'espletamento di un processo sistematico, notevolmente oneroso e spesso impraticabile data la complessità del sistema e dei sottomodelli in gioco.

Per rispondere a tale esigenza, in maniera pratica e soprattutto percorribile dal progettista, viene proposta in questa sede una metodologia di valutazione delle incertezze, basata sulla determinazione di appropriate "Matri- ci delle Conseguenze", che definiscono opportune relazioni tra le variabili aleatorie ed i risultati delle simulazioni di incendio e dei sottomodelli quantitativi per la valutazione del danno atteso, tali da produrre una significativa contrazione dell'onere computazionale altrimenti necessario per una indagine estensiva e sistematica delle incertezze.

Il modello proposto chiama in causa, oltre alle varia-

The methodology to be adopted is defined, in principles, by the same Decree; it is directed to the application of techniques for the accurate study of the hazards factors arising from a fire (e.g. three-dimensional simulations of fire) and in general to the performance-based approach, confirmed by the following emanation of the Decree 9/5/2007.

Such approach implicates the quantitative investigation of the fire scenarios; a relevant effort can be required, because of the complexity of the phenomena involved, for this reason mathematical models aimed at the prediction of the evolution and the effects of the fire have been developed during the last two decades, especially under certain conditions to be regarded as particularly hazardous (e.g. in buildings, in railway or road tunnels, in shopping malls, etc.).

Regarding the employment of such tools of investigation, so called deterministic for the characteristic to establish univocal results with respect to the used input data, it is necessary to set up suitable means for the uncertainties treatment affecting the whole evaluation process, arising from the lack of knowledge of the system and from the aleatorietà of the phenomena involved.

Insofar, a measure of safety performance, while affected from significant uncertainties, it implicates the eventuality of a switchover in the acceptability of the project: in other terms, the same project can be considered acceptable or not acceptable adopting different sets of input data, parameters of analysis and assumptions equally coherent with the system in study.

Such issues must be faced in a suitable way with respect to weight implicated by each decision (e.g. infrastructure safety measures characterized by high costs, operation measures, etc.), strongly influenced by the same measures of performance; the theory points out the accomplishment of a systematic process, notably onerous and often impracticable cause of the complexity of the system and the sub-models involved.

To answer to such demand in a practical way, is here proposed a methodology of uncertainties treatment, based on the determination of "Consequences Matrices", defining appropriate relationships among the aleatory variables and the fire simulations together with the quantitative sub-models results for the evaluation of the expected consequences, such to produce otherwise a meaningful contraction of the computational burden required for an extensive and systematic investigation of the uncertainties.

The proposed model implies, besides the aleatory variables that dominate the fire phenomena, also aleatory variables of "railway nature", characterized by significant influence (comparable to the parameters of the fire) on the global evaluation of the tunnel risk level, so that the evaluation can be undertaken through a systematic investigation of the scenarios, according to weight of the uncertainties characterizing the system itself.

bili aleatorie che dominano i fenomeni legati all'incendio, anche variabili aleatorie di "natura ferroviaria", aventi una significativa influenza (paragonabile ai parametri dell'incendio) sulla valutazione globale del rischio associato all'esercizio in galleria, consentendo di pilotare il processo di valutazione su un terreno più favorevole all'investigazione sistematica degli scenari incidentali e pervenire ad un modello coerente con il peso delle aleatorietà del sistema in studio.

2. Sorgenti di incertezza

L'incertezza che interessa la misura di una qualsiasi grandezza fisica è legata alla strumentazione utilizzata ed alle modalità di misura: una serie di osservazioni sperimentali effettuate, ad esempio, per misurare il valore del calore di combustione di un certo materiale, la curva della potenza termica sprigionata da un campione standardizzato di prova, così come il valore di altre grandezze, produce in generale risultati affetti da errori di tipo sistematico e casuale, determinando una distribuzione statistica delle osservazioni medesime.

Viceversa il risultato di valutazioni scientifiche basate sull'impiego di appropriati modelli matematici, caratterizzata da un determinato set di assunzioni e dati di input (e.g. scenario di incendio, condizioni al contorno, etc.), produce valori puntuali, altrettanto affetti da errori derivanti dalle particolari assunzioni, dalle approssimazioni e dai limiti di calcolo dei modelli e dai dati di input utilizzati e da altre sorgenti di incertezza, che caratterizzano pertanto i risultati delle succitate valutazioni scientifiche quantitative.

2.1. Livelli di prestazione

L'applicazione di modelli predittivi per la misura di *performance* del progetto della sicurezza implica l'individuazione di appropriati *performance criteria*, cioè dei livelli quantitativi di prestazione che il progetto "sicuro" è chiamato a garantire; su tali livelli di prestazione non esiste ancora un accordo della Comunità Scientifica in merito alla classe dei parametri da considerare ed i corrispondenti valori di soglia, né sul loro significato rispetto alla questione della accettabilità.

Gli stessi strumenti (modelli empirici) disponibili in letteratura per la valutazione degli effetti dell'incendio sulle persone, sono da considerarsi a loro volta affetti da significativa incertezza, in particolare per la tossicità delle specie chimiche prodotte dalla combustione, ed in generale per la correlazione con le distribuzioni statistiche caratterizzanti la resistenza fisica delle persone potenzialmente esposte (i.e. bambini, donne, adulti, anziani, diversamente abili, affetti da patologie, etc.).

Dalle succitate osservazioni si deduce che la determi-

2. Uncertainty sources

The uncertainty that interests the measure of any physical quantity is influenced by the instrumentation and the measurement characteristics: a series of experimental observations, for instance, aimed at measuring the value of the heat of combustion of a certain material, the curve of the thermal power released by a standardized specimen as the value of other quantities, produces in general results affected by systematic and casual errors, determining a statistic distribution of the observations themselves.

The result of scientific evaluations on the employment of appropriate mathematical models, characterized vice versa by a determined set of assumptions and input data (e.g. fire scenarios, boundary conditions, etc.), determines point values, affected by errors as well, derived from the particular assumptions, the approximations and calculation limits of the models, from the input data and other sources of uncertainty, that characterize therefore the results of the above mentioned quantitative scientific evaluations.

2.1. Performance criteria

The application of predictive models for the measurement of the safety design performance implicates the use of appropriate performance criteria, that is the quantitative levels of performance that the "safe" design must achieve; on such performance levels the Scientific Community still didn't find an agreement, regarding the class of parameters to be considered and the correspondents threshold values, neither on their meaning regarding the acceptability issue.

The same tools (empirical models) available in literature for the evaluation of the effects of the fire on people, are still affected by significant uncertainty, particularly for the toxicity of the chemical species produced by the combustion, and in general for the correlation with the statistic distributions related to the physical resistance of the people potentially exposed (i.e. children, women, adults, elderly, disabled people, people affected by pathologies, etc.).

Hence, performance levels criteria constitutes a further source of uncertainty, to be taken into account for the evaluation of safety design acceptability carried out with a performance-based approach.

The sources of uncertainty are hence classifiable as: epistemic uncertainties, originated from the incomplete knowledge of the system (i.e. system intended as building/infrastructure considered and also the whole system of the predictive tools) and aleatory uncertainties, originated from the aleatory nature of the variable involved (e.g. number of passengers in a train, the prompt activation of any safety system related to the reliability of the system itself, the "human factor", etc.).

SCIENZA E TECNICA

nazione dei livelli di prestazione costituisce una ulteriore sorgente di incertezza, di cui occorre tener conto per valutare l'accettabilità di un progetto di sicurezza condotto con l'approccio prestazionale.

Le sorgenti di incertezza sono in definitiva classificabili come: incertezze epistemiche, originate dalla incompleta conoscenza del sistema, inteso nella sua accezione più ampia (*i.e.* sistema edificio/infrastruttura in studio e sistema degli strumenti di valutazione) ed incertezze aleatorie, originate dalla natura aleatoria delle variabili che dominano i processi in gioco (*e.g.* il numero di passeggeri in un convoglio, il funzionamento tempestivo di un impianto di protezione attiva, il "fattore umano", etc.).

2.2. Scenari di riferimento

La scelta degli scenari di incendio e relativa determinazione del set di caratteristiche costituenti i dati di input del processo prestazionale, inteso quale complesso dei modelli e del sistema decisionale in grado di determinare le variabili di progetto della sicurezza, costituisce dunque una fase cruciale, in quanto avente un peso significativo sull'indirizzo del trattamento delle incertezze e dunque sulla attendibilità dell'esito di accettabilità del progetto della sicurezza, nonché sull'ottimizzazione dei costi delle misure previste dal progetto stesso.

Infatti differenti scenari di incendio, comunque plausibili, possono condurre a differenti esiti di accettabilità per il medesimo progetto di sicurezza, così come l'espansione (o riduzione) di un set di scenari di incendio può determinare lo stesso fenomeno (*i.e. switchover*).

Possiamo riguardare i parametri caratterizzanti l'evoluzione degli scenari di incendio quali variabili aleatorie, così come i valori calcolati dai codici di calcolo, la cui aleatorietà deriva dalla mancanza di una completa conoscenza del sistema e dei fenomeni coinvolti, nonché dalla stessa aleatorietà dei parametri caratterizzanti gli scenari (*e.g.* il numero delle persone presenti in un edificio ed il loro comportamento in emergenza, la sorgente di innesco di un incendio, etc.).

I valori puntuali prodotti dai codici non incorporano le incertezze associate al complesso dei dati di input e dei parametri utilizzati dallo stesso modello matematico, riducendo la corrispondente distribuzione statistica dei valori di output del modello ad un valore più o meno rappresentativo della stessa distribuzione (*e.g.* il valore di picco della potenza termica dell'incendio di riferimento od il tempo di raggiungimento del picco stesso).

È necessario pertanto operare un appropriato trattamento delle incertezze che affliggono il processo prestazionale, così da ottenere una risposta affidabile in merito all'accettabilità del progetto della sicurezza.

2.2. Reference scenarios

The choice of the fire scenarios and the determination of set of the input data on which the predictive process is based, constitutes therefore a crucial phase, characterized by a significant weight on the address of the uncertainties treatment and therefore on the reliability of the safety design acceptability, as well as on the optimization of the costs of the measures implied by the same safety design.

In fact, different fire scenarios, however reasonable, can conduct to different results of acceptability for the same safety design when the expansion (or reduction) of a set of fire scenarios can lead to the same result in terms of acceptability (*i.e. switchover*).

We can consider the parameters involved in the fire scenarios evolution as aleatory variables, as the values calculated by the codes of calculation, whose aleatorietà derives from the lack of a complete knowledge of the system and the involved phenomena, as well as from the same aleatorietà of the parameters involved in the scenarios (*e.g.* the number of people within a building and their behaviour in emergency, the source of fire ignition, etc.).

The point values produced by the codes don't incorporate the uncertainties arising from the input data and the parameters used by the same mathematical model, reducing the corresponding statistic distribution of the model output values to a more representative value of the same distribution (*e.g.* the peak value of the heat rate release of the reference fire scenario or the duration time of the same peak value).

It is necessary therefore to operate an appropriate treatment of the uncertainties that affect the evaluation process, so that a reliable answer regarding the acceptability of the safety design can be achieved.

3. Uncertainty treatment

The nature of the uncertainties resides in the aleatory character of the variables of the system; an analytical and exhaustive treatment of the uncertainties of a complex system, characterized from mutually correlated aleatory variables, it can hardly result practicable.

3.1. Sensitivity analysis

Before the treatment of the uncertainties an activity of identification of the aleatory variable of greater weight, within the overall evaluation process, through appropriate analysis of importance/sensitivity must be carried out.

The importance analysis can be undertaken through "expert's opinion" and also taking into account reports of real fires and available experimental data as well, classifying

3. Trattamento dell'incertezza

La natura delle incertezze risiede nel carattere aleatorio delle variabili del sistema; un trattamento analitico ed esaustivo delle incertezze di un sistema complesso, caratterizzato da variabili aleatorie mutuamente correlate, risulta difficilmente praticabile.

3.1. Analisi di sensibilità

Il passo propedeutico al trattamento delle incertezze è dunque un'attività di individuazione delle variabili aleatorie di maggior peso, nell'ambito del processo globale di valutazione, attraverso appropriata analisi di importanza/sensibilità.

L'analisi di importanza può essere condotta basandosi sul "giudizio dell'esperto" nonché su report di incendi reali e dati sperimentali disponibili, classificando le variabili aleatorie in base alla capacità di propagazione dell'incertezza.

L'analisi di sensibilità dell'output del processo prestazionale rispetto ad un certo parametro od assunzione, risponde in maniera quantitativa alla domanda: "quanto varia l'output al variare del dato parametro aleatorio?"; tale processo, condotto in maniera rigorosa, per singola variabile, risulta oneroso e spesso impraticabile, come detto.

È evidente che tale profondità di analisi assume importanza in rapporto a rischi di elevata entità attesa nonché al crescere della complessità dei fenomeni modellizzati, ancor più se caratterizzati da mutue correlazioni tra variabili aleatorie.

3.2. Margini e fattori di sicurezza

Individuate le variabili aleatorie significative, è possibile prevedere fattori o margini di sicurezza in grado di tener conto dell'incertezza; in altre parole è possibile selezionare appropriati *worst-case*, nell'ambito dell'intero processo di valutazione (e.g. scelta dei parametri di *performance* ed assegnazione dei corrispondenti livelli di accettabilità, definizione delle caratteristiche degli scenari, assegnazione dei parametri dei modelli etc.), in modo da assicurare l'accettabilità del progetto anche qualora i parametri affetti da incertezza assumessero nella realtà i valori più sfavorevoli, nell'ambito del proprio *range* di variabilità attesa.

Evidentemente a fronte di ciascun fattore/margine di sicurezza adottato corrisponde un incremento di costi, pagati in termini di realizzazione vera e propria delle misure (e.g. impianti, predisposizioni per l'esodo, uscite di sicurezza aggiuntive, etc.) ovvero in termini di esercizio (e.g. riduzione del traffico merci, limitazioni sulla tipologia delle merci trasportate, etc.).

ing each aleatory variable according to the uncertainty propagation.

The sensibility analysis of the output of the performance-based evaluation process with respect to a certain parameter or assumption, responds in quantitative way to the question: "how much it varies the output with respect to a certain aleatory parameter?"; such process, conducted in rigorous way, for single variable, does it result onerous and often impracticable.

Such depth in the analysis can be reasonable when the modelled phenomena are of great complexity and characterized by mutual correlations among aleatory variables, and also when the risk level is relevant.

3.2. Safety factors and margins

In order to take into account the uncertainty, while previously identified the significant aleatory variables, appropriate safety factors or margins can be adopted; in other words it is possible to select appropriate worst-cases, within the whole evaluation process (e.g. choice of the parameters of performance and assignment of the correspondents levels of acceptability, definition of the characteristics of the scenarios, assignment of the parameters of the models etc.), so that the acceptability of the safety design it is assured also for those cases where the parameters affected by uncertainty assume extreme values, within the variability range.

Nevertheless any adopted safety factors/margins determines an increase of costs, to be paid in terms of realization of the measures (e.g. safety equipments or systems, means of egress, additional exits, etc.) or in terms of operation (e.g. reduction of freight trains, limitations on dangerous goods, etc.).

It is necessary to undertake sensibility analyses aimed at identifying possible ambiguities in the attribution of worst-case values, e.g. a steep smoke temperature curve can determines a quick intervention of the automatic suppression system and at the same time it can quickly reduce the time available for the egress.

3.3. Probabilistic methods

The tunnel and operational characteristics have strong influence on the class of possible fire scenarios, particularly on the relative scenarios severity, as well as on the costs of the safety measures to be implemented: appropriate uncertainty evaluation of the input data which is hence propagated to the consequences and to the final output of the overall evaluation process is needed, so that a treatment of the uncertainty is coherently addressed, also for the optimization of the costs of the measures.

An approach to the treatment of the uncertainties, alternative in comparison to the adoption of the safety mar-

SCIENZA E TECNICA

È necessario tuttavia espletare opportune analisi di sensibilità anche al fine di evidenziare eventuali ambiguità nella attribuzione di valori *worst-case* (e.g. il raggiungimento rapido di elevate temperature dei gas favorisce l'intervento dei sistemi automatici di estinzione ed al tempo stesso aumenta la severità delle condizioni ambientali).

3.3. Metodi probabilistici

Le caratteristiche della galleria e dell'esercizio influiscono sulla classe degli scenari incidentali ipotizzabili, in particolare sulla relativa magnitudo del danno atteso, nonché sui costi delle stesse misure di protezione da prevedersi: occorre dunque valutare in che misura l'incertezza dei dati di input si propaga sino alle conseguenze, cioè all'output del processo prestazionale, in maniera tale che il relativo trattamento dell'incertezza sia coerentemente indirizzato, anche per l'ottimizzazione dei costi delle misure.

Un approccio al trattamento delle incertezze, alternativo rispetto all'adozione dei margini/fattori di sicurezza, è rappresentato dai cosiddetti metodi probabilistici di *sampling* (e.g. Montecarlo, *latin hypercube*) finalizzati alla esplorazione del processo prestazionale attraverso l'assegnazione sistematica di valori casuali alle variabili aleatorie, coerenti con le relative distribuzioni statistiche, precedentemente indagate ed opportunamente discretizzate [19].

Si consideri, ad esempio, il valore della potenza termica di picco di un incendio, che può attendersi entro un certo *range* di valori, stimati attraverso dati sperimentali e rappresentabili da una funzione di densità di probabilità, al variare del valore di picco variano le conseguenze, coerentemente con l'entità dei fattori di pericolo dipendenti dalla potenza termica; dunque la rappresentazione delle conseguenze attese è allo stesso modo una funzione di densità di probabilità, che può essere descritta attraverso i metodi probabilistici succitati con la predisposizione di un opportuno modello matematico.

4. Scenario di incendio in galleria

L'accettabilità del progetto della sicurezza per una galleria ferroviaria è questione disciplinata attraverso un processo di valutazione con obiettivi di sicurezza *risk-based*; ciò implica che gli scenari incidentali possibili (i.e. gli esiti espressi in termini di danno atteso), individuati attraverso opportuni strumenti di analisi (e.g. alberi degli eventi, etc.), sono pesati con le relative probabilità di accadimento, determinando appropriati indicatori di rischio oggetto di confronto con i relativi obiettivi.

La questione dei costi delle misure di sicurezza, determinate a valle del processo di *risk assessment*, risulta po-

gin/factor, is represented by the so-called sampling methods (e.g. Montecarlo, latin hypercube) finalized to the exploration of the evaluation process through the systematic assignment of random values to the aleatory variables, coherently with the distributions, previously investigated and appropriately discretized [19].

One can consider as aleatory parameter characterizing a fire scenario e.g. the peak value of the heat rate release, that can be expected within a certain range of values, it can be hence represented by a probability density function, the consequences of the fire scenario will be hence calculated with respect to the peak value of heat rate release, coherently with the hazard factors influenced by this latter parameter; therefore the representation of the expected consequences will be equally a probability density function, that can be described through the probabilistic methods cited above together with appropriate mathematical models.

4. Tunnel fire scenarios

The acceptability of a safety design for a railway tunnel is carried out through a process of evaluation with risk-based safety objectives; this implicates that the possible accidental scenarios (i.e. results expressed in terms of expected consequences), identified by appropriate tools (e.g. event tree analysis, etc.), are weighed with the expected probabilities, determining appropriate risk indicators to be compared with the safety objectives.

The question of the costs of the safety measures, within the risk assessment process, seems to be neglected in comparison to the acceptability itself; in fact, within the Decree 28/10/2005 - Safety in the Railway Tunnels – no particular indication are provided about any cost – benefit comparison, with the exception of the ALARP criterion (as low as reasonably practicable), that implicates a "reasonable" risk reduction if the corresponding indicator lies between full acceptability and not acceptability limits.

One can consider the fire scenario of a train carrying dangerous goods within a single bore double track tunnel, caused by the derailment in tunnel and the following leakage of flammable gas or liquid and the consequent ignition of a pool fire: occurring in concomitance with the transit of a passenger train in the same tunnel, it can potentially determine a catastrophic result (i.e. multiple fatalities).

The spatial distribution of the hazard factors in the tunnel in the vicinity of the fire source, investigated through appropriate predictive tools, can be shown to be characterized by a progressive spread over time and heat flux peak values over the thresholds of lethality and a potential extension thousand of meters far from the fire source.

According to that qualitative description, a significant variability of the results related to the same class of fire

SCIENZA E TECNICA

sta in secondo piano rispetto alla questione accettabilità; non sono infatti previsti dal DM 28/10/2005 – Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie – particolari linee di indirizzo sul piano costi/benefici, ad eccezione del criterio ALARP (*as low as reasonably practicable*), che implica una riduzione “ragionevole” del rischio qualora la corrispondente curva ricada nella “fascia” compresa tra piena accettabilità ed inaccettabilità.

Si consideri a titolo esemplificativo lo scenario di incendio di un treno trasportante merci pericolose all'interno di una galleria a singola canna e doppio binario, causato dal deragliamento in galleria, ed il successivo versamento di liquido infiammabile con innesco di una *pool fire* (*i.e.* incendio di una pozza di liquido infiammabile).

Lo scenario descritto, se ipotizzato in concomitanza con il transito di un treno passeggeri nella medesima galleria, si ritiene potenzialmente in grado di determinare un esito catastrofico (*i.e.* fatalità multiple).

La distribuzione dei fattori di pericolo nella galleria nell'intorno del focolaio, indagata attraverso appropriati modelli predittivi, è caratterizzata da un andamento progressivo nel tempo con valori di picco ben oltre le soglie di letalità ed una estensione potenziale dalla sorgente del pericolo di migliaia di metri.

In base a tale descrizione qualitativa è lecito attendersi una significativa variabilità degli esiti di scenari incidentali appartenenti alla medesima classe tipologica, ma differenti nei valori dei parametri caratterizzanti i singoli sotto-scenari incidentali; tale circostanza determina dunque la necessità di valutare in termini di rischio atteso la variabilità succitata.

Alla luce delle questioni suseinte, assume particolare rilevanza una accurata valutazione delle incertezze associate alle predizioni deterministiche sulle probabilità di accadimento e sulle conseguenze degli scenari incidentali identificati quali rilevanti.

5. Caratteristiche della metodologia per il trattamento dell'incertezza

Il trattamento quantitativo dell'incertezza che affligge le predizioni effettuate con modelli deterministicci, può assumere un carattere di estrema onerosità in relazione all'impiego di codici di calcolo basati su algoritmi di analisi numerica per la risoluzione di sistemi di equazioni differenziali; è questo il caso dell'indagine sulla evoluzione dei fattori di pericolo originati dagli scenari di incendio (*i.e.* codici CFD).

Il progettista in tal caso sarebbe chiamato ad effettuare numerose simulazioni di incendio, reiterate sino a coprire i *range* delle variabili aleatorie considerate; nella maggior parte dei casi (*e.g.* scenari di incendio in galleria) tale processo non risulta agevolmente attuabile, in maniera sistematica e per singola variabile.

scenarios but characterized by different parameters values which determine each single sub-scenario is expected; such circumstance determines therefore the evaluation in terms of expected risk, in order to take into account the above mentioned spread of possible predictions.

Therefore, accurate evaluations of the uncertainties related to deterministic predictions is needed, in order to determine appropriate values for the probabilities and the consequences of the significant scenarios.

5. Characteristics of the methodology for the uncertainty treatment

The quantitative treatment of the uncertainty that affects the deterministic models predictions, can become really time consuming and most of the times impracticable, if codes based on algorithms of numerical analysis for the resolution of systems of differential equations are involved, like the investigation on the evolution of the hazard factors originated from the fire scenarios (*i.e.* codes CFD).

In the latter case, several fire simulations must be performed in order to cover the ranges of the aleatory variables considered; most of the time (*e.g.* fire scenarios in tunnel) such process cannot easily result feasible, in a systematic way and for each variable.

The above mentioned sampling methods (*e.g.* Monte-Carlo, latin hypercube, etc.) can be applied therefore for the risk evaluation of a class of scenarios originated from a design scenario (*e.g.* derailment of a train carrying dangerous goods in tunnel with a passenger train approaching on the adjacent track) expanded through the application of these techniques on a certain number of aleatory variables.

The methodology in conclusion should provide: 1) a number of scenarios statistically significant; 2) the behaviour of the hazard factors and the output of the decision making process based on the risk analysis with respect to the aleatory variables.

The identification of the aleatory variables, considered significant with respect to the result of the tunnel fire scenarios, can be implemented through the application of mathematical models for which appropriate validations are available (*e.g.* simulations can be performed for the evaluation of the effect of the natural ventilation in tunnel with respect to the curve of heat rate release of a fire).

5.1. Process optimization

In general the class of the aleatory variables of greater influence on the results of the scenarios considered (*i.e.* fires of freight trains in tunnel) includes both

SCIENZA E TECNICA

Le succitate tecniche di *sampling* (e.g. *Montecarlo*, *latin hypercube*, etc.) possono essere dunque applicate per la valutazione del rischio associato alla classe di scenari incidentali originati da un determinato scenario di progetto (e.g. deragliamento di treno merci pericolose in galleria con treno passeggeri sopraggiungente sul binario adiacente) attraverso una “espansione” operata con tali tecniche su un certo numero di variabili aleatorie.

La metodologia in definitiva deve rispondere all'esigenza di: 1) generare un numero statisticamente significativo di scenari incidentali; 2) esplorare il comportamento dei fattori di pericolo e dell'output del processo decisionale basato sull'analisi del rischio, in rapporto alle variabili aleatorie statisticamente modellizzate.

L'attività di identificazione delle variabili aleatorie significative per l'esito degli scenari di incendio in galleria, può espletarsi anche attraverso modellazioni matematiche per cui siano disponibili opportuni test di validazione (e.g. si possono eseguire simulazioni per valutare la sola significatività dell'effetto della ventilazione naturale in galleria sulla curva della potenza termica rilasciata da un certo focolaio).

5.1. Ottimizzazione del processo

Si ritiene importante sottolineare che in generale la classe delle variabili aleatorie aventi maggiore influenza sull'esito degli scenari incidentali considerati (i.e. incendi di treni merci in galleria) include sia variabili caratterizzanti la dinamica del fuoco (e.g. HRR – potenza dell'incendio, tipologia dei materiali combusti, etc.) sia variabili stocastiche tipiche del sistema ferroviario (e.g. posizione relativa dei convogli in galleria, intervento del sistema automatico di controllo della marcia del treno, deviazione laterale del convoglio a seguito di deragliamento, etc.).

Tale circostanza implica l'opportunità per il progettista di snellire la valutazione quantitativa delle incertezze associate alla classe degli scenari incidentali considerati, in quanto tali variabili afferenti il sistema ferroviario sono più facilmente descritte con modelli statistici e funzioni di densità di probabilità, rispetto alle variabili aleatorie implicate nella *fire dynamics*.

6. Metodo delle matrici delle conseguenze

Il metodo proposto implica l'analisi di una classe di eventi incidentali, attraverso l'impiego di modelli deterministicamente predittivi accoppiati a metodi statistici: ciascun esito degli scenari quantitativamente indagati, opportunamente normalizzato, costituisce il valore del termine L_{ij}^n di una “matrice delle conseguenze” (l'apice n è riferito all'n-esima matrice mentre i pedici seguono la usuale notazione matriciale).

Ciascuno dei due indici che identificano il generico

the variables characterizing the fire dynamics (e.g. HRR, typology of the material involved in combustion, etc.) and the aleatory variables characterizing the railway system (e.g. mutual displacement of the trains within the tunnel, intervention of the automatic train protection system, lateral deviation of the train occurring after derailment, etc.).

The latter class of aleatory variables can be easier modelled with respect to the aleatory variable implicated in the fire dynamics, this can be a chance for the uncertainty treatment process to be significantly reduced in terms of computational burden.

6. Method of the consequences matrices

The proposed method implicates the analysis of a class of accidental events, through the application of deterministic models coupled with statistic methods: every result of the scenarios quantitatively investigated and normalized, is the value of the element L_{ij}^n of one “consequences matrix” (the superscript n identifies the matrix n while the subscripts follow the usual matrix notation).

Each one of the two subscripts, that identifies the generic element of the matrix, is related to an aleatory variable of significant influence on the result of the accidental scenarios, belonging to the class of variables for which it is possible to assign a probability density function; in the proposed method, are belonging to such class, for instance, the aleatory variables that describe “the state” of the railway system at a certain time, t, (e.g. the position of the freight train within the tunnel during the accidental event, the brake intervention of the automatic train protection system, etc.).

Each consequences matrix is defined with the purpose to establish univocal relationships between each couple of values coherent with the aleatory variables, statistically modelled (we will call here for the sake of convenience “variables-indices”), and the single element of the discrete class of the results (i.e. elements of the consequences matrix), obtained through the application of appropriate deterministic models.

6.1. Numerical modeling

The above cited predictive models are often characterized by functions of mutually correlated aleatory variables (e.g. combustible/flammable substances involved in the fire, rate of formation of the burning mixture, heat flux, visibility and tenability along egress path, velocity of the egressing people along the means of escape, etc.), therefore characterized by notable computational burden: the relative outputs are obtained through an appropriate discretization of the ranges of the values assumed by the couple of “variables-indices” selected, from which a represen-

termine della matrice è associato ad una variabile aleatoria di significativa influenza sull'esito degli scenari incidentali, appartenente alla classe delle variabili per le quali è possibile assegnare una funzione di densità di probabilità; nel metodo proposto, appartengono a tale classe, ad esempio, le variabili stocastiche che descrivono "lo stato" del sistema ferroviario ad un certo istante t (e.g. la posizione del treno merci nella galleria al momento dell'evento incidentale, l'intervento del sistema automatico di protezione della marcia del treno, etc.).

Ciascuna matrice delle conseguenze è definita al fine di stabilire relazioni univoche tra ciascuna coppia di valori coerenti con le variabili aleatorie, statisticamente modellizzate (chiamate qui per comodità "variabili indice"), ed i singoli termini della classe discreta dei risultati (i.e. termini della matrice delle conseguenze), ottenuti attraverso l'applicazione di appropriati modelli deterministici predittivi.

6.1. Modellazione numerica

I modelli predittivi succitati sono spesso caratterizzati da funzioni di variabili aleatorie mutuamente correlate (e.g. tipologia della sostanza combustibile/infiammabile coinvolta nell'incendio, tasso di formazione della miscela combustibile, potenza termica radiata, visibilità e vivibilità lungo percorsi di esodo, velocità delle persone lungo i percorsi di esodo, etc.), dunque di notevole complessità computazionale: i relativi output sono ottenuti sulla base di una opportuna discretizzazione dei *range* dei valori assunti dalla coppia di "variabili indice" prescelta, dai quali si ricava un valore statisticamente rappresentativo del *range* stesso (e.g. il valore medio), costituente input per il modello deterministico predittivo, il cui output corrispondente è il termine L_{ij}^n della n -esima matrice delle conseguenze.

La determinazione di ciascuna matrice delle conseguenze, condotta nel modo sussunto, consente l'applicazione di opportuni metodi di *sampling* (e.g. *Montecarlo simulation*), in grado di generare iterativamente sotto-scenari incidentali il cui esito in termini di conseguenze è determinato dai valori di ciascuna matrice, mentre l'esito in termini di frequenza attesa è determinato in funzione della frequenza associata a ciascun sotto-scenario generato e del numero complessivo di iterazioni.

Nella fig. 1, la tabella-schema illustra una matrice delle conseguenze relativa agli esiti di un incendio di pozza di liquido infiammabile di potenza di picco pari a 150 MW in una galleria lunga 10 km. Le variabili aleatorie quali la fruibilità delle uscite, l'azione del sistema di segnalamento (ATCS) o le procedure di intervento del personale di macchina, sono modellizzate con funzioni di densità di probabilità: esse influenzano, attraverso funzioni implementate con foglio elettronico, il processo a livello della generazione dei valori associati alla coppia di "variabili indice" (i.e. distanza incidente – treno passeggeri, distanza treno passeggeri – uscita fruibile).

tative value of the same range is statistically calculated (e.g. the average value).

This latter represent the input value for the deterministic model, whose corresponding output is the element L_{ij}^n of the consequences matrix "n".

The determination of every consequences matrix, conducted in the way above described, it allows the application of appropriate sampling methods (e.g. Montecarlo simulation), in order to define sub-scenarios iteratively, whose results in terms of consequences are determined by the values of each matrix, while the result in terms of expected frequency is determined in function of the frequency of every sub-scenario defined and of the total number of iterations performed.

The fig. 1 shows the chart-scheme of a consequences matrix related to the results of a pool fire of flammable liquid, characterized by a peak value of the heat rate release of 150 MW, within a 10 km long tunnel.

The aleatory variables considered, as the availability condition of the exits, the action of the signalling system (ATCS) or the actions undertaken by the driver, are modelled by probability density functions: they influence, through functions implemented with spreadsheet, the values of "variables-indices" generated iteratively (i.e. distance between accident location – passenger train, distance between passenger train – closest available exit).

The result of this process is therefore a risk profile, whose accuracy is proportional to the number of the sub-scenarios generated and the number of the aleatory variables considered in the process of determination of every consequences matrix (fig. 2).

6.2. Depth of the analysis and number of the matrices

According to the weight of the overall risk of a class of scenarios (and to the safety measures as well), it is possible "to regulate" the depth of the evaluation of the uncertainties through the determination of the number of the consequences matrices to a correspondent number of aleatory variables: it is possible to determine a serie of matrices in order to take into account the uncertainty related to the expected heat rate release curve (duration, inclination, peak value etc.), or the uncertainty of the expected longitudinal air velocity in tunnel, determined by the natural difference of pressure at the portals.

The process above described implies the evaluation of possible correlations among the considered aleatory variables, determining appropriate scenarios parameters.

According to the results of the importance and sensitivity analysis, one can determine the number of the significant aleatory variables; according to the number and nature of such variables and to the necessary level of approximation, will be therefore determined the number of the consequences matrices required for the accomplish-

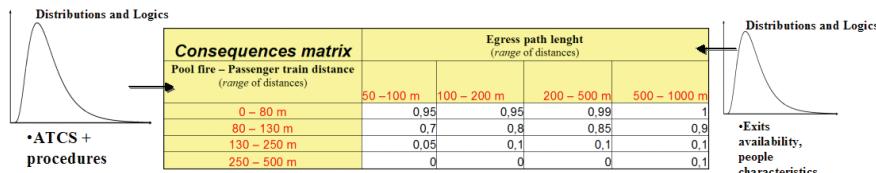


Fig. 1 - Matrice delle conseguenze. *Consequence matrix*.

Il risultato del processo è dunque un profilo di rischio, la cui accuratezza è proporzionale al numero dei sottoscenari generati ed al numero delle variabili considerate quali aleatorie nel processo di determinazione di ciascuna matrice delle conseguenze (fig. 2).

ment of the calculation of each of the element L_{ij}^n belonging to the consequences matrix "n", as well as the calculation of the risk profile through the sampling method, whose complexity grows proportionally to the number of the implemented matrices.

Evidently the computational burden is proportional to the number of the consequences matrices, which implicates the accomplishment of the method.

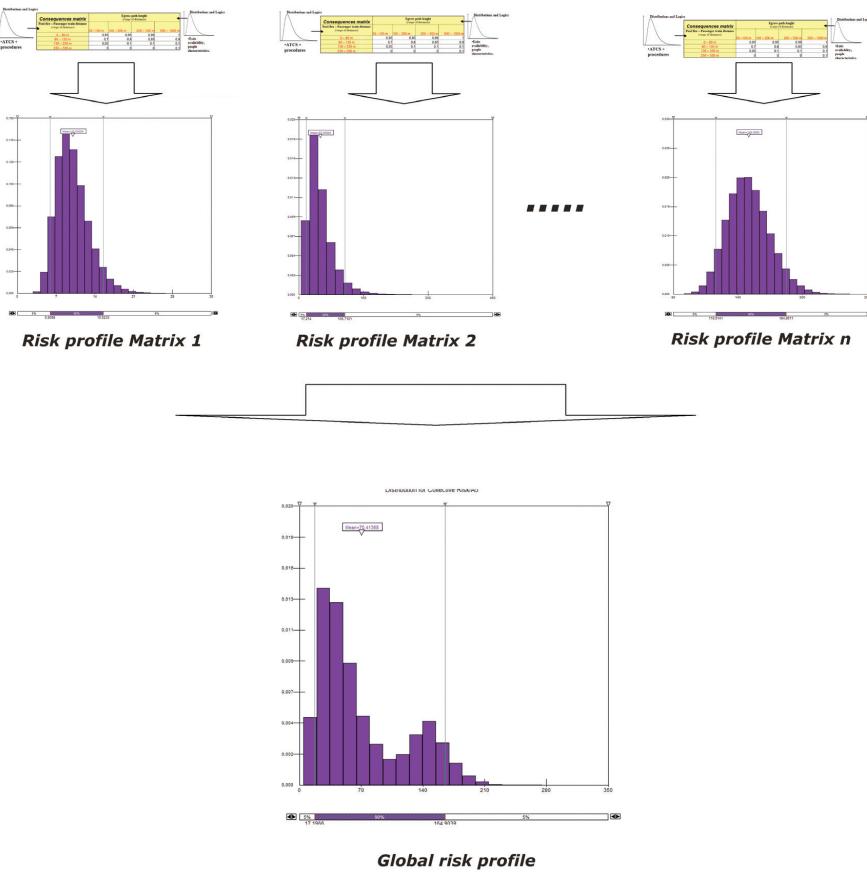


Fig. 2 - I profili di rischio associati all'espletamento dei metodi di *sampling* su ciascuna delle matrici delle conseguenze determinate producono un profilo di rischio globale che rappresenta una misura più accurata del rischio associato al singolo scenario incidentale di progetto. *Risk profiles obtained by the application of the sampling methods on each of the Consequences matrices determine a more accurate risk evaluation of each of the design fire scenario taken into account.*

6.2. Profondità dell'analisi e numero delle matrici

In ragione del peso sul rischio complessivo associato ad una certa classe di scenari incidentali (e ad una tipologia di misure mitigative), è possibile "regolare" il grado di dettaglio della valutazione delle incertezze attraverso la determinazione del numero delle matrici delle conseguenze associate ad un corrispondente numero di variabili aleatorie: ad esempio è possibile determinare una serie di matrici in modo da considerare l'incertezza associata alla curva della potenza di incendio (durata, pendenza, valore massimo etc.), oppure l'incertezza associata alla velocità longitudinale dell'aria in galleria, determinata dalla naturale differenza di pressione agli imbocchi.

Il processo descritto implica la necessità di valutare eventuali correlazioni tra le variabili aleatorie considerate, determinando opportunamente i parametri di progetto degli scenari.

Sulla base dei risultati dell'analisi di sensibilità e di importanza, il progettista è in grado di determinare il numero delle variabili aleatorie da considerare; in funzione del numero e della natura di tali variabili, nonché del livello di approssimazione necessario, viene quindi determinato il numero delle matrici delle conseguenze necessario per il corretto espletamento del metodo.

Evidentemente l'onere computazionale cresce al crescere del numero delle matrici delle conseguenze, ciascuna delle quali, in base al numero dei *range* individuati per le "variabili indice", implica l'espletamento del calcolo di ciascuno dei termini L_{ij}^n della n-esima matrice delle conseguenze, nonché il calcolo del profilo di rischio attraverso i metodi di *sampling*, la cui complessità cresce a sua volta al crescere del numero di matrici implementate.

7. Espressione sintetica del metodo

Solo al fine di fornire una sintesi formale del metodo, il processo viene di seguito espresso in una forma sintetica e schematica.

Si indica con S_x la generica variabile stocastica (variabile indice) appartenente alla classe delle variabili aleatorie indice significative, con $p_x(x)$ la corrispondente funzione di densità di probabilità, con V_x la generica variabile aleatoria appartenente alla classe delle variabili aleatorie significative per le quali non risulta desumibile una appropriata funzione di densità di probabilità (e.g. le variabili mutuamente correlate proprie della *fire dynamics*).

Siano μ_{hi} e μ_{kj} i valori rappresentativi dei *range* individuati per ciascuna coppia di variabili indice, S_x (e.g. il valor medio).

Il generico termine della matrice delle conseguenze n-esima sarà dato dalla

$$L_{ij}^n = (H \mu_{hi}, \mu_{kj}, \Phi) \quad (1)$$

7. Formal expression of the method

In order to provide a formal expression of the method here proposed, the evaluation process will be here presented in a concise and schematic form.

One can indicate with S_x the generic aleatory variable (index-variable) belonging to the class of the significant aleatory variables (index-variables), with $p_x(x)$ the corresponding function of density of probability, with V_x the generic aleatory variable belonging to the class of the significant aleatory variables for which it is not possible (or very time consuming) to define an appropriate probability density function (e.g. the mutually correlated variables typically involved in the fire dynamics).

One can also indicate with μ_{hi} and μ_{kj} the representative values of the ranges determined for each couple of index-variables, S_x (e.g. the average value).

Therefore, the generic element of the consequence matrix "n" will be given by

$$L_{ij}^n = (H \mu_{hi}, \mu_{kj}, \Phi) \quad (1)$$

where is pointed out, with the symbol Φ , the class of the functions predicting the hazard factors (*i.e.* output function of the time and the calculation (spatial) domain of the deterministic models CFD, etc.), and with the symbol H , the integral function over the time t (between the beginning and the end of the emergency time) representative of the expected consequences, function of the variables-index, whose values for each element are μ_{hi} and μ_{kj} , and of the values of the hazard factors over the time, Φ .

Finally one can indicate with $D^n x$, the aleatory variable representing the prediction obtained for each generation of the set of values belonging to the class of the aleatory variables-index (generic iteration), applied to each of the n consequences matrices, with the purpose to determine its element representing the corresponding result; such variable is expressed as a probability density function or as a risk profile (fig. 2).

8. Example of the method application – Determination of the number of the intermediate exits of a tunnel

The following case study it is not referred to any real case belonging to the national railway network, therefore it has been defined with the only purpose to show the method presented here in this article.

The determination of the optimal number of the intermediate exits, required for the achievement of the safety objectives, for a tunnel where the simultaneous transit of trains carrying dangerous goods and passenger trains is allowed, can be carried out through the proposed method.

The tunnel and the operation characteristics are highlighted in the following fig. 3.

ove si è indicato con il simbolo Φ , la classe delle funzioni dei fattori di pericolo (*i.e.* output funzione del tempo e del dominio di calcolo dei modelli predittivi deterministic CFD, etc.), e con il simbolo H_{ij}^n , la funzione integrale nel tempo (tra inizio e fine emergenza) che esprime il danno atteso, dipendente dalle variabili indice, i cui valori per ciascun termine sono fissati pari a μ_{hi} ed μ_{kj} , e dalle funzioni dei fattori di pericolo nel tempo, Φ .

Si indica infine con D_{xj}^n , la variabile aleatoria costituente il risultato ottenuto per ciascuna generazione casuale del set di valori associati alla classe delle variabili aleatorie indice (generica iterazione del processo), applicato a ciascuna delle n matrici delle conseguenze al fine di determinarne il termine costituente il risultato corrispondente; tale variabile è rappresentabile come una funzione di densità di probabilità ovvero come un profilo di rischio (fig. 2).

8. Esempio applicativo del metodo – Determinazione del numero delle uscite intermedie di una galleria

L'esempio di seguito riportato non ha alcuna attinenza né riferimento alla rete ferroviaria in esercizio ed ha esclusivo significato speculativo per una migliore comprensione dell'approccio metodologico illustrato nell'articolo.

La determinazione del numero ottimale delle uscite intermedie, necessario per il conseguimento degli obiettivi di sicurezza, per una galleria ove sia consentito il transito contemporaneo di treni merci pericolose e treni passeggeri, può essere effettuata con il metodo proposto.

Le caratteristiche della galleria e del traffico sono sintetizzate nella fig. 3.

La valutazione del rischio associato alla tipologia di scenari incidentali di deragliamento di treni merci pericolose in galleria, è espletata attraverso l'applicazione di tecniche induttive ad alberi degli eventi.

8.1. Descrizione del processo induttivo

Gli alberi degli eventi, riportati in fig. 4, schematizzano il processo di indagine deduttivo, attraverso lo sviluppo descritto dai singoli sottoeventi. L'evento iniziatore, deragliamento di un treno merci pericolose in galleria è ivi quantificato in termini di frequenza (eventi/anno), in base all'analisi dei dati incidentali disponibili (approccio frequentista). I successivi sottoeventi sono in generale descritti secondo probabilità stimate sulla base dell'analisi statistica dei dati disponibili.

Il primo sottoevento (adjacent track involved – invasione del binario adiacente) utilizza, oltre a dati statistici, anche dati geometrici relativi alla configurazione della

Lunghezza della galleria: 10000 metri <i>Length of the tunnel: 10000 meters</i>
Superficie della sezione della galleria: 68 m ² <i>Cross sectional area: 68 m²</i>
Traffico giornaliero treni passeggeri: 92 treni/giorno <i>Number of passenger trains per day: 92 trains/day</i>
Traffico giornaliero treni merci: 136 treni/giorno <i>Number of freight trains per day: 136 trains/day</i>
Velocità media treni passeggeri: 160 km/h <i>Passenger trains average speed: 160 km/h</i>
Velocità media treni merci pericolose: 120 km/h <i>Freight trains average speed: 120 km/h</i>
Intervallo temporale tra i treni lungo la tratta: 12 min <i>Time delay between trains on the same track : 12 min</i>
Interdistanza uscite di sicurezza (configurazione base): 2500 m <i>Distance between exits (basic configuration): 2500 meters</i>

Fig. 3 - Ipotesi geometriche e di traffico per l'analisi di rischio della galleria. *Geometric and operational characteristics for the tunnel risk analysis.*

The evaluation of risk arising from the event of derailment of trains carrying dangerous goods in tunnel, is carried out through the application of inductive techniques (event tree analysis).

8.1. Description of the inductive process

The event trees, showed in fig. 4, summarize the deductive investigation process through the accident sequences development described by each sub-events. The initiator event, derailment of a train carrying dangerous goods in tunnel, is here quantified in terms of frequency (events/year), according to the analysis of the available train accident statistics (frequentist approach). The following sub-events are described in terms of the probability, according to the results of appropriate analysis of the available train accident statistics.

The first sub-event (adjacent track involved) calculation is carried out taking into account besides statistics, also geometric data related to the configuration of the tunnel and to the interdistances between the tracks. The second sub-events (collision with train on the adjacent track) is express in terms of probability, calculated in function of the braking time required by the various type of vehicles and of the time required for the communication of the state of emergency and the intervention capability of the automatic train protection system (if present), when the track circuit is activated after the invasion of the adjacent track.

The sub-events that describe the probabilities that the train involved in the collision would be a train carrying dangerous goods (collision with a TCDG) or a passenger train are based on the operation characteristics. The event of ignition of a pool fire is described through a probabili-

galleria ed alla interdistanza tra i binari. Il secondo sottoevento (collision with a train on the adjacent track – collisione con un treno sul binario adiacente) è espresso in termini di probabilità calcolate in funzione dei tempi di frenatura dei vari convogli nonché dei tempi di comunicazione dello stato di emergenza e della capacità di intervento del sistema di controllo della marcia del treno, nel caso in cui il CdB risulti occupato a seguito della invasione del binario adiacente. I sottoeventi che descrivono le probabilità che il treno colliso sia un merci pericolose (collision with a TCDG) e che il treno colliso sia un passeggeri sono basati sui dati di traffico. L'eventualità di innesco di un incendio di pozza (pool fire) è descritta attraverso l'esame di dati statistici.

Infine l'eventualità di coinvolgimento nell'incendio di un treno passeggeri sul binario adiacente è descritta attraverso l'applicazione del metodo delle "Matrici delle Conseguenze".

Il trattamento delle incertezze è espletato attraverso l'adozione di opportuni margini di sicurezza sui principali fattori di pericolo (e.g. curva del fuoco ipotizzata con un valore di picco pari a 150 MW), indagando altresì, col metodo proposto, l'incertezza derivante dalla aleatorietà delle distanze reciproche tra il punto di arresto del treno passeggeri, il punto in cui il treno merci pericolose origina l'incendio di pozza e la posizione delle uscite di emergenza lungo la galleria.

La generazione delle distanze reciproche succitate tiene conto altresì delle logiche implementate dal sistema di controllo della marcia del treno (e.g. frenatura di emergenza del treno passeggeri in caso di occupazione del CdB – circuito di binario – a seguito dell'invasione del binario da parte del treno merci deragliato) e di tutti i parametri intermedi, modellizzati da opportune funzioni di densità di probabilità (e.g. deviazione laterale del convoglio a seguito di deragliamento, azione di intervento da parte del Posto Centrale a seguito di allarme del PdM – personale di macchina –, etc.) (fig. 5).

I grafici riportati nelle figg. 6 e 7 illustrano l'analisi di sensibilità del modello implementato rispetto alla variabile "interdistanza delle uscite", espressa in metri, ed il corrispondente valore del rischio collettivo (nr di fatalità/anno) normalizzato rispetto al caso di assenza di uscite in-

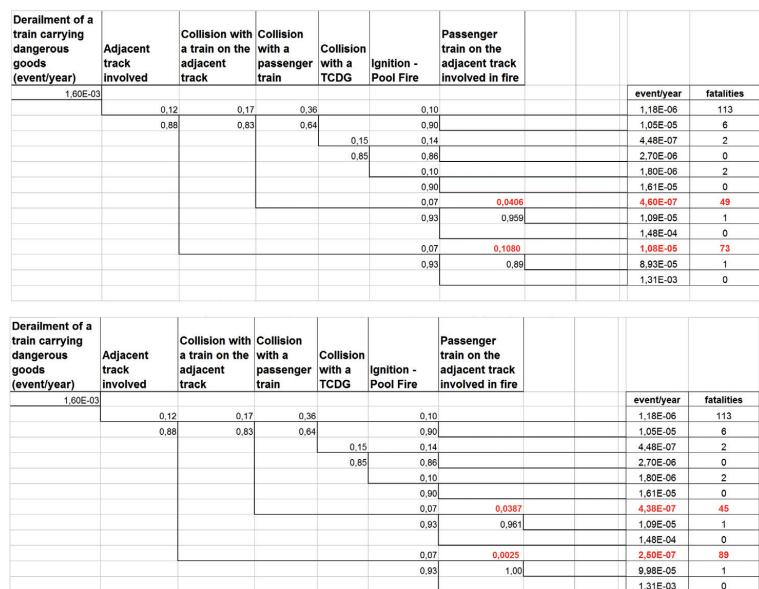


Fig. 4 - Confronto tra alberi degli eventi associati a configurazioni alternative dello stesso tunnel (interdistanza tra le uscite rispettivamente pari a 2500 m e 1000 m) – in rosso sono indicati i parametri influenzati dall'applicazione del metodo delle "Matrici delle Conseguenze". *Comparison between different event tree representing different configuration of the same tunnel (interdistances between exits 2500 m and 1000 m) – in red the parameters influenced by the application of the proposed method.*

ty based on the accident statistics analysis.

Finally the probability of involvement of a passenger train in the fire on the adjacent track is described through the application of the method of the "Consequences Matrix".

The treatment of the uncertainties is evaluated through the adoption of appropriate safety margins on the significant hazard factors (e.g. fire curve with a peak value equal to 150 MW), and through the investigation, with the proposed method, of the uncertainty arising from the aleatorietà of the mutual distances, within the tunnel, between the position where the passenger train stops, the position in which the train carrying dangerous goods derailed determining the pool fire ignition and finally the position of the emergency exits along the tunnel.

The generation of the mutual distances above mentioned also takes into account the logics implemented by the automatic train protection system (e.g. activation of the emergency brake of the passenger train after the activation of the track circuit caused by the invasion of the adjacent track by the derailed freight train) and other parameters, modelled through appropriate probability distribution functions (e.g. lateral deviation of the train after the derailment, intervention of the Control Place follow-

termedie (interdistanza pari a 10000 m pari all'intera lunghezza della galleria).

Si noti come la riduzione del rischio sia maggiore in percentuale nel caso di deraglimento con successiva invasione da parte del treno deragliato del binario adiacente; tale eventualità implica una minore probabilità di coinvolgimento del treno passeggeri che procede sul binario adiacente a quello sede del deragliamento, in virtù della possibilità di occupazione del CdB con conseguente immediato intervento del sistema di controllo della marcia del treno e successivo arresto del convoglio passeggeri.

I risultati del processo descritto mostrano una sensibile riduzione del rischio atteso con l'aumento del numero di uscite intermedie, sino ad un valore di interdistanza pari a 1000 m (valore indicato dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" quale requisito minimo per l'interdistanza tra le uscite di emergenza laterali o verticali verso la superficie); la riduzione del rischio per interdistanze inferiori ai 1000 metri mostra una progressiva riduzione di sensibilità.

Il livello di approssimazione della valutazione quantitativa deve essere commisurato alle necessità del processo decisionale: qualora il confronto con le curve di accettabilità nel contesto del rischio globale associato all'esercizio della galleria implicasse ambiguità ovvero presentasse un esito di inaccettabilità, le ipotesi effettuate per la definizione degli scenari di progetto dovrebbero tener conto di tale esigenza.

Ad esempio le variabili aleatorie trattate quali costanti, corrette con opportuni margini di sicurezza adottati per coprire le incertezze (e.g. incendio ipotizzato nella sua potenza massima, innesco istantaneo della pozza di incendio, etc.) potrebbero essere convenientemente trattate quali distribuzioni, nell'ambito del metodo descritto, al prezzo di un maggiore onere computazionale e di analisi ma con il vantaggio di una riduzione dell'onere associato alle misure necessarie (corrispondente ad una riduzione delle incertezze nella quantificazione del rischio atteso) al fine di ricondurre il rischio entro i limiti di accettabilità.

Tale riduzione dell'onere sulle misure deriva in definitiva dalla maggiore accuratezza con la quale viene condotto il calcolo del rischio atteso, utilizzando appunto metodi probabilistici invece dei margini di sicurezza. Infatti, nel modello generale di valutazione sono considerati gli

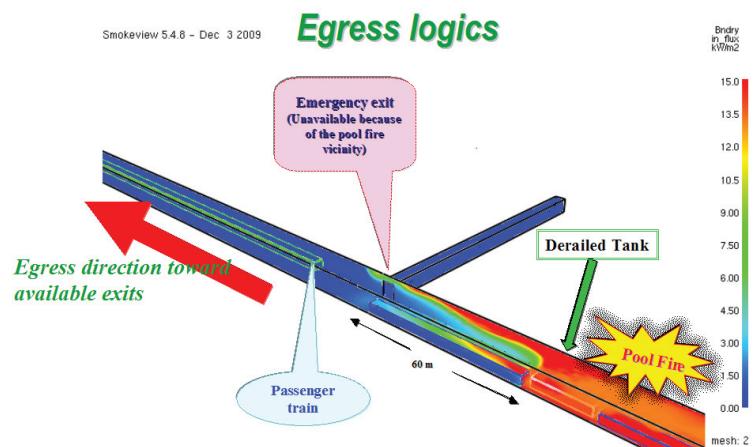


Fig. 5 - Schema delle logiche implementate nel processo di calcolo per la selezione dell'uscita fruibile più vicina da parte dei passeggeri, la vicinanza dell'incendio impedisce ai passeggeri di utilizzare un'uscita molto vicina al punto di arresto in galleria del convoglio passeggeri implicando un esodo verso l'uscita successiva. *Scheme of the logics implemented in the process of calculation for the selection of the closest available exit to the egressing passengers, the vicinity of the fire prevents the passengers to use a very near exit to the position in tunnel where the passenger train stops, consequently the egress will be toward another exit.*

ing the alarm communicated by the train driver, etc.).

The graphs showed in the following figures 6 and 7 illustrate the sensibility analysis of the model implemented in comparison to the variable "exits interdistance", expressed in meters and the correspondent value of the collective risk (nr of fatalities/year) normalized in comparison to the case of absence of intermediate exits (interdistance equal to 10000 m, the whole length of the tunnel).

One can observe that risk reduction is greater (in percent) in the case of derailment with subsequent invasion of the train derailed of the adjacent track; such sequence implies a smaller probability of involvement of the passenger train that proceeds on the track adjacent to the one where the derailment occurred; this because of the possibility of activation of the track circuit and consequent immediate intervention of the automatic train control system that determine the emergency brake of the passenger train.

The results of the described process show a significant risk reduction with the increase of the number of intermediate emergency exits along the tunnel, above a value of interdistanza of 1000 m (value indicated by the Technical Specifications of Interoperability "Safety in railway tunnels" as requirement for the interdistances between emergency exits); the risk reduction shows a progressive reduction of sensibility for values of the interdistances below 1000 m.

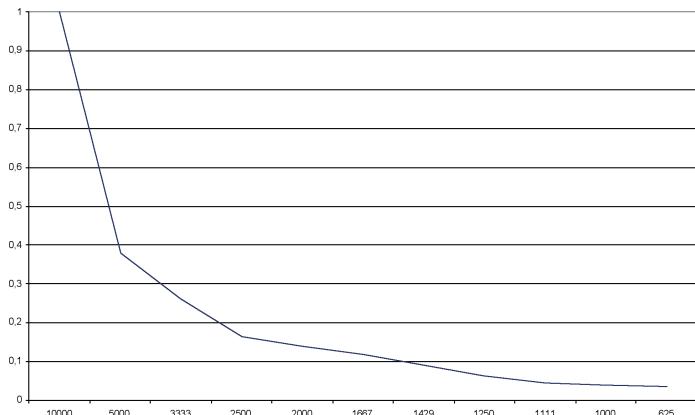


Fig. 6 - Andamento del rischio collettivo normalizzato in funzione dell'interdistanza tra le uscite intermedie della galleria nel caso di evento di deraglimento CON successiva invasione del binario adiacente. *Normalized collective risk in function of the interdistance between the intermediate exits of the tunnel in case of derailment followed by invasion of the adjacent track.*

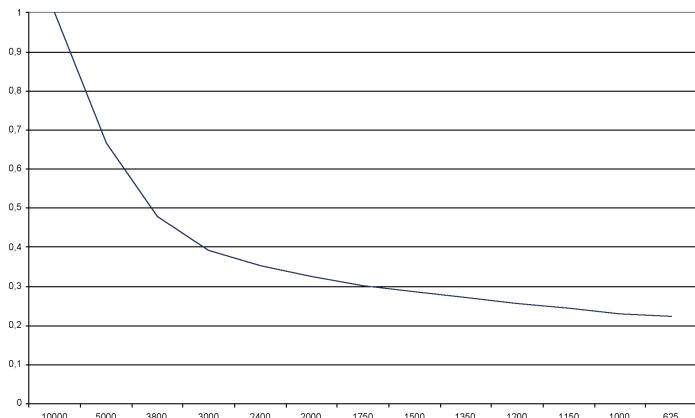


Fig. 7 - Andamento del rischio collettivo normalizzato in funzione dell'interdistanza tra le uscite intermedie della galleria nel caso di evento di deraglimento SENZA successiva invasione del binario adiacente. *Normalized collective risk in function of the interdistance between the intermediate exits of the tunnel in case of derailment NOT followed by invasion of the adjacent track.*

effetti delle misure medesime, a loro volta caratterizzate dai parametri dai quali dipende l'entità della loro azione od efficacia, "dosata" in ragione del livello di rischio dell'opera rispetto agli obiettivi di sicurezza. Riprendendo l'esempio della interdistanza da adottare tra le uscite intermedie da prevedere in un tunnel, quale parametro risultante appunto da una apposita analisi di rischio; nell'esplicitamento di tale attività, l'adozione del metodo delle

adoption of the method of the "Consequences Matrices" allows to determine an interdistance, suitable to the tunnel risk level with respect to the safety objectives, and calculated by the adoption of a reduced number of safety margins, obtaining therefore a less conservative result. The costs of the safety measure, therefore, is proportional to the resultant number of intermediate exits, less in comparison to analogous case where the uncer-

The level of approximation of the quantitative evaluation should be commensurate to the requirements of the decision making process: if the comparison of risk level with the acceptability criteria is ambiguous or when the safety objective are not achieved, it should be taken into account in the design scenarios.

We can consider a class of aleatory variables, treated as constants by appropriate safety margins, adopted as uncertainties treatment (e.g. a fire assumed as maximum potential heat rate release, ignition timing of a pool fire assumed as instantaneous after the derailment of a tank, etc.).

The same class of variables could be treated as distributions, within the described method, of course with a greater computational burden with respect to the former treatment (safety margins), but with the advantage of a consequent reduction of the safety requirements (determined by a reduction of the weight of the uncertainty in the quantification of the expected risk) aimed to reduce the risk within the acceptability limits.

Such reduction of the safety requirements comes from the greater accuracy of the calculation of the expected risk, applying probabilistic methods instead of the safety margins.

In fact, within the risk assessment process, the effectiveness of the safety measures are modelled taking into account the significant parameters characterizing each measure, according to the difference between the risk level in comparison to the safety objectives to achieve.

In the case study above outlined, the parameter "interdistance between exits" represents the significant variable to be evaluated through appropriate risk analysis; in the accomplishment of such activity, the adoption of the method of the "Consequences Matrices" allows to determine an interdistance, suitable to the tunnel risk level with respect to the safety objectives, and calculated by the adoption of a reduced number of safety margins, obtaining therefore a less conservative result. The costs of the safety measure, therefore, is proportional to the resultant number of intermediate exits, less in comparison to analogous case where the uncer-

“Matrici delle conseguenze” consente di fissare una interdistanza, adeguata ad un livello di rischio stimato con l’adozione di un numero inferiore di margini di sicurezza, dunque meno conservativo. La ripercussione sui costi delle misure, in questo caso, risulta immediatamente leggibile dal numero risultante di uscite intermedie, inferiore in generale rispetto ad analogo caso ove si sia trattata l’incertezza appunto con margini di sicurezza, con evidente riduzione dei costi per la realizzazione delle stesse uscite.



Fig. 8 - Treno merci (near Prgomet - Croazia). *Freight train - (nei pressi di Prgomet - Croatia).*

9. Conclusioni

Gli indirizzi forniti dal Regolamento CE 352/2009 [26], stabiliscono la necessità di effettuare analisi del rischio per ciascuna modifica di tipo tecnico, operativo od organizzativo, considerata significativa per la sicurezza dell'esercizio ferroviario, orientando lo sviluppo metodologico anche verso l'impiego di strumenti in grado di effettuare valutazioni quantitative del rischio e delle relative incertezze (CSM – Common Safety Methods) da confrontarsi con opportuni obiettivi di sicurezza quantitativi (CST – Common Safety Targets), questi ultimi ancora in corso di definizione da parte dell'ERA – European Railway Agency.

Ulteriori indirizzi a livello europeo, riguardanti più in particolare il trasporto ferroviario di merci pericolose (OTIF [27]), presentano un approccio esclusivamente quantitativo, basato sulla stima esplicita del rischio che implica anche l'impiego di tecniche di trattamento quantitativo dell'incertezza.

La stessa Norma Europea EN50126 – 2:2008 – 05, quale indirizzo per il trattamento delle incertezze nell'analisi del rischio per i sistemi ferroviari, indica l'impiego delle tecniche di simulazione Montecarlo (MCS-Monte Carlo simulation).

Il metodo proposto nel presente articolo consente una opportuna ottimizzazione delle risorse computazionali e di analisi destinate alle valutazioni scientifiche alla base dell'analisi dei rischi e delle conseguenti scelte progettuali di sicurezza, accogliendo l'esigenza espressa nella nor-

tainty is treated with safety margins, generally with a significant cost reduction.

9. Conclusions

The Commission Regulation EC No 352/2009 [26], indicates that for each significant proposed change of the railway system in a Member State, classified as significant for the safety of the railway operation (art. 4 of the same Regulation), a risk management process must be carried out.

This Regulation summarizes a methodological development toward the employment of specific tools, aimed at the implementation of quantitative risk evaluations (CSM – Common Safety Methods), in comparison with appropriate quantitative safety objectives (CST – Common Safety Targets), nevertheless this last issue is still a work in progress within the ERA – European Railway Agency.

Further European guidelines, regarding more specific issues, as the carriage of dangerous goods by rail (OTIF [27]), indicate a quantitative approach, based on the explicit risk evaluation and the employment of quantitative uncertainty treatment techniques.

The same European standard EN50126 – 2:2008 – 05, which address also the treatment of the uncertainties within the risk analysis for the railway systems, points out the application of the Montecarlo simulation techniques (MCS – Monte Carlo Simulation).

The method proposed in the present article is aimed at the optimization of the computational resources involved in the scientific evaluations, on which risk analysis as any consequent safety decision making process is based as well, setting up appropriate tools aimed at refining the



Fig. 9 - Manutenzione in esercizio (nei pressi di Na Trang – Vietnam). *Maintenance during operation (near Na Trang – Vietnam).*

SCIENZA E TECNICA

mativa di settore di predisporre opportuni strumenti e metodi atti ad raffinare il livello di approssimazione delle predizioni scientifiche, in maniera coerente sia sul dominio delle frequenze attese sia sul dominio dei valori assunti dai fattori di pericolo.

Ove non sia possibile dimostrare con metodi semplici, per confronto ovvero applicando i codici di buona pratica, che il livello di sicurezza del sistema risulti adeguato, appare fondamentale predisporre strumenti di analisi adeguatamente accurati ed efficaci al fine di valutare la sicurezza del sistema ferroviario (Reg. 352/2009), limitando quanto possibile ipotesi eccessivamente conservative al fine di ottimizzare i costi delle misure.

level of approximation of the scientific predictions, on the domain of the expected frequencies and of the values assumed by the hazard factors, as required by the specific standards.

When a demonstration of the adequacy of the safety level of the system by simple methods like the comparison with other systems or the application of the codes of good practice (Reg. 352/2009) it is not viable, setting up accurate and effective tools of analysis is of great importance in order to accomplish the safety objectives, limiting as much as possible conservative hypothesis and consequently the cost of the required safety measures.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] V. BABRAUSKAS, Heat Release Rates, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
- [2] D.A. PURSER, Toxicity Assessment of Combustion Products, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
- [3] A. TEWARSON, Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
- [4] G. RAMACHANDRAN, "Stochastic Models of Fire Growth", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
- [5] K. NOTARIANNI, "Uncertainty", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
- [6] NFPA 101Life safety code.
- [7] BS DD240:1997 Fire Safety Engineering in Buildings: Part 1, Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles.
- [8] ISO/TS 13571:2002 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data.
- [9] ISO 13387 parti da 1 a 8 "Fire safety engineering".
- [10] ISO 13344 Determination of the lethal toxic potency of fire effluents.
- [11] D. DRYSDALE, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed – WILEY 1998.
- [12] S. HOSTIKKA "Development of fire simulation models for radioactive heat transfer and probabilistic risk assessment", VTT Publications 683 ESPOO 2008.
- [13] H. KUMAMOTO, E.J. HENLEY, "Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists" 2nd ed, IEEE PRESS.
- [14] Decreto Interministeriale 28/10/2005 – Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie.
- [15] Decreto Legislativo 264 del 05/10/2006 - Sicurezza per le Gallerie della Rete Stradale Transeuropea.
- [16] DM 09/05/2007 – Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio.
- [17] Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, Dipartimento del Soccorso pubblico e della Difesa civile, Ferrovie dello Stato, 1997 - Linee guida per la sicurezza in galleria.
- [18] Lettera Circolare Ministero dell'Interno 31.03.2008 – Linee Guida per l'approvazione dei progetti e della scheda rilevamento dati predisposte dall'Osservatorio.
- [19] ASTM E 1355 – 97 Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models.

SCIENZA E TECNICA

- [20] A. VENTURA, M. CIGOLINI, "Impiego di metodi deterministicici (simulazioni di incendio CFD e modelli di esodo) per la progettazione della sicurezza delle gallerie ferroviarie" – CIFI ottobre 2008.
- [21] F. MAZZINI, B. GREGGI, "Approccio deterministico all'analisi di rischio incendio" – UTET Scienze Tecniche.
- [22] M. CIGOLINI, "Valutazione del livello di sicurezza delle gallerie ferroviarie in caso di incendio di merci pericolose con impiego di metodi probabilistici per l'integrazione dei risultati di simulazioni numeriche di incendio" – Strade&Autostreade n. 3 e 4/2009.
- [23] M. CIGOLINI, "Evaluation of Railway Tunnels Safety for Operation Involving Trains Carrying Dangerous Goods - Fire Hazard and Risk Assessment Implemented with Probabilistic Methods" - Proceedings from the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, 2010.
- [24] W.G.B. PHILLIPS, Rev. by D.K. BELLER e R.F. FAHY, "Computer Simulation for Fire Protection Engineering", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
- [25] A. PEZZATI, L. DOMENICHINI, F. MARTINELLI, S. CARA, "L'analisi di rischio per le gallerie ferroviarie", rivista "Ingegneria ferroviaria", aprile 2007, pagg. 289-301.
- [26] Regolamento CE n. 352/2009 della Commissione "adozione di un metodo comune di determinazione e di valutazione dei rischi".
- [27] OTIF – A 81-03/501.2006/Add.2. Generic Guideline for the Calculation of Risk inherent in the Carriage of Dangerous Goods by Rail - approved at the 42th session of the RID Committee of Experts (Madrid, 21-25 November 2005).

Sommaire

EVALUATION DES PRESTATIONS ET DES INCERTITUDES DANS L'ANALYSE DES RISQUES D'INCENDIE DANS LES TUNNELS FERROVIAIRES. MÉTHODE DES MATRICES DE CONSÉQUENCES

Cet article traite de certains aspects des méthodes d'analyse des risques d'incendie dans les tunnels ferroviaires, se penchant en particulier sur les incidents caractérisés par des incendies de grande ampleur causés par des marchandises dangereuses, des incidents donc susceptibles d'avoir de graves conséquences sur d'éventuels trains de passagers transitant par ce type de tunnel au moment d'un tel incident.

Pour démontrer l'acceptabilité du niveau de risque dans le tunnel, il faut effectuer une analyse de risques, en implémentant éventuellement des mesures de sécurité supplémentaires en fonction de ses conclusions.

Les évaluations des risques sont généralement entachées d'incertitude en raison de la connaissance incomplète du système et du caractère aléatoire de ce genre d'incidents. Il est donc possible qu'elles soient erronées et donne une idée fausse de l'acceptabilité du projet de sécurité pour le tunnel en question.

Le présent article propose donc une méthode de traitement des incertitudes qui entachent l'évaluation des risques en cas d'incendie impliquant des produits dangereux, méthode qui permettrait d'améliorer l'exactitude de l'évaluation des risques lorsque nécessaire, à un prix limité en termes de coût de calcul.

Zusammenfassung

BRANDRISIKO IN EISENBAHNTUNNEL. BEWERTUNG VON ERGEBNISSEN UND UNGENAUGKEITEN DER RISIKOANALYSE DURCH DAS VERFAHREN DER FOLGEMATRIZEN.

Besondere Merkmale der Risikoanalyse-Methodik im Fall von Hochwärmeliebungsbränden in Tunneln, von gefährlichen Gütern verursacht. Diese können schweren Auswirkungen für befahrenden Personenzügen hervorrufen. Davon die Notwendigkeit die Risikoannehbarkeit zu bewahren, wofür eine Matrizen Methodik vorgestellt wird.

Aber die ungenaue Systemkenntnis und die Brandzufälligkeiten können falschen Bewertungen des Risikosniveaus Ergebnissen verursachen: diese aber werden durch die obengenannte Methodik abgeschätzt, mittels einem akzeptablen Computerberechnung Aufwand.