



# VALUTAZIONE QUANTITATIVA DELLA MAGNITUDO

## NEGLI SCENARI INCIDENTALI DA INCENDIO

Salvatore Leonardi\*  
Marco Santo Spinelli\*\*

La procedura illustrata nel presente contributo per la quantificazione delle conseguenze degli scenari incidentali nelle gallerie ferroviarie causati da incendio si inquadra nell'ambito della logica che sta alla base degli Annessi A e D2 al Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 28.10.2005 "Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie", ed è inoltre coerente con quanto prescritto dalla Specifica Tecnica di Interoperabilità 2008/163/CE "Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie".

Il metodo proposto per lo studio degli scenari incidentali di progetto e delle relative condizioni di esodo prevede l'utilizzo dei modelli automatici di simulazione numerica FDS ed EVAC, prodotti rispettivamente dal NIST (National Institute of Standards and Technology) e dal VTT (Technical Research Centre of Finland), distribuiti gratuitamente pre-accorpati: attraverso la sperimentazione virtuale quale strumento predittivo del reale, è possibile determinare lo sviluppo spazio-temporale del fenomeno in studio e le relative condizioni finali raggiunte, tenendo in debita considerazione i limiti intrinseci legati alle osservazioni che hanno condotto alla definizione degli algoritmi di calcolo dei software di simulazione e al grado di precisione perseguibile in funzione della discretizzazione adottata per il problema continuo.

L'iter procedurale adottato si può così sintetizzare (Figura 2):

- ◆ individuazione degli scenari incidentali rilevanti di progetto e delle componenti d'interesse del vettore danno (utenti);
- ◆ caratterizzazione degli scenari incidentali rilevanti di progetto attraverso la quantificazione, mediante FDS ed EVAC, del flusso del pericolo, che per come è stato definito, comprende pure la risoluzione degli scenari di esodo per la popolazione esposta (utenti);
- ◆ caratterizzazione degli stati di fine emergenza attraverso l'individuazione dei danni ai ricettori sensibili (computo del numero di vittime).



Figura 1

### Gli scenari incidentali oggetto di simulazione

Per determinare, tra tutti i possibili scenari incidentali associati all'incendio all'interno dei tunnel ferroviari, quelli di interesse, si è proceduto individuando in successione:

- ◆ gli scenari base o di riferimento;
- ◆ gli scenari derivati, ottenuti dai precedenti a seguito dell'introduzione delle misure di sicurezza e della variazione dei parametri caratteristici degli stessi;
- ◆ gli scenari rilevanti di progetto, selezionati tra i precedenti in base alle prescrizioni normative e ai più comuni standard di progettazione.

Per la definizione degli scenari base si è fatto riferimento al simultaneo verificarsi di incendio, perdita di mobilità del rotabile e sosta in galleria, con verifica della sola salvabilità della vita umana in condizioni di autosoccorso e in presenza delle misure di sicurezza adottate. A tale scopo, tra tutti i possibili scenari dovuti ad incendio, che coinvolgono un solo treno o che presentano una mutua interazione tra treni, si sono considerate le seguenti tre classi incidentali:

- ◆ classe A: incendio in un treno passeggeri fermo in galleria;



Figura 2 - La procedura di analisi delle conseguenze

- ◆ classe B: incendio in un treno merci e contemporanea presenza di un treno passeggeri fermi entrambi in galleria;
- ◆ classe C: incendio in un treno che trasporta merci pericolose e contemporanea presenza di un treno passeggeri fermi entrambi in galleria.

Si sono escluse a priori le combinazioni treno merci-treno merci, treno merci pericolose-treno merci pericolose, treno merci-treno merci pericolose, poiché non considerano l'uomo quale ricettore sensibile, sebbene siano più le più gravose in termini di potenza termica sviluppata e, conseguentemente, in termini di danni alla struttura del tunnel. Non si è considerata neanche la combinazione treno passeggeri-treno passeggeri perché sostanzialmente essa ha la sola peculiarità di incrementare il numero delle persone esposte al rischio incendio, senza provocare un aggravio delle conseguenze del possibile evento incidentale.

E' evidente, poi, che la classe incidentale di tipo A può verificarsi in ogni configurazione geometrica del sistema galleria, mentre le classi incidentali B e C sono esclusivamente possibili solo nei tunnel ferroviari a singola canna e doppio binario.

Le tre classi incidentali prima individuate sono compatibili con gli scenari pericolosi presi a riferimento nei documenti redatti dalle FS (Linee Guida per il miglioramento della Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie, 1997), con gli analoghi scenari considerati nel redigere i piani interni di emergenza per le lunghe gallerie ferroviarie (lunghezza non inferiore ai 5.000 m), nonché, con le disposizioni in materia di trasporto ferroviario di merci pericolose, regolate dal R.I.D. (Règlement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses).

L'impostazione del processo di simulazione si è basata sulla considerazione che, nella realtà, tra l'innescarsi dell'incendio e la perdita di mobilità del rotabile incendiato, esiste un transitorio più o meno breve, in base alla localizzazione del focolaio d'incendio, all'incidenza del fuoco sui dispositivi di movimento, alla possibilità di azionamento del freno di emergenza, alla presenza o meno, in prossimità della galleria, di impianti fissi per la rilevazione della temperatura a bordo treno di tipo RTB (Rilevamento Temperatura Boccole) o mediante portali termografici. Analogamente esisterà un transitorio tra l'arresto del primo treno incendiato e l'arresto del secondo treno che sopraggiunge dal binario opposto che dipenderà dal tempo di blocco della linea, dal tempo di cadenzamento tra i treni, e dal tempo di frenatura in emergenza.

Nonostante le suddette condizioni operative, è possibile semplificare notevolmente il problema e al contempo garantire risultati sufficientemente precisi e sempre in favore di sicurezza, considerando il rotabile sempre immobile in galleria, in una ben definita posizione, e quindi soggetto alle peggiori condizioni critiche legate al fuoco, in quanto si impone che l'intero ciclo di vita dell'incendio si verifichi in ambiente confinato.

Si sono ipotizzati inoltre inefficaci gli interventi delle squadre di soccorso al fine di mettere in salvo passeggeri e personale di bordo, in modo da considerare le situazioni più gravose in termini di potenziali utenti coinvolti.

Per quanto concerne le caratteristiche dell'incendio degli scenari incidentali base prima individuati, ci si è riferiti

alle seguenti condizioni reperite dalla letteratura specialistica e coincidenti con quelle maggiormente complesse tra quelle realisticamente ipotizzabili nelle più comuni condizioni di esercizio:

- ◆ HRR di picco pari a 10 MW per la classe incidentale A, incendio a crescita media (1 MW in 300 s), poi costante per tutta la durata della simulazione, una volta raggiunto il valore di HRRmax;
- ◆ HRR di picco pari a 50 MW per la classe incidentale B, incendio a crescita veloce (1 MW in 150 s), poi costante per tutta la durata della simulazione, una volta raggiunto il valore di HRRmax;
- ◆ HRR di picco pari a 100 MW per la classe incidentale C, incendio a crescita ultraveloce (1 MW in 75 s), poi costante per tutta la durata della simulazione, una volta raggiunto il valore di HRRmax;
- ◆ incendio localizzato nella mezzeria del treno e della galleria in corrispondenza della carrozza ristorante se di classe A oppure del carro merci centrale se di classe B o C.

L'incendio, modellato nella fase di crescita in termini di curve quadratiche di tipo " $\alpha \cdot t^2$ " per il rilascio della potenza termica HRR nel tempo, viene sempre considerato come combustione di materiale



solido secondo le equazioni stechiometriche del poliuretano, materiale, tra quelli presenti sulla carrozza tipo, che possiede il comportamento più severo dal punto di vista della partecipazione al fuoco e della produzione dei prodotti tossici della combustione (CO ed HCN). L'area e la posizione della zona d'incendio, le dimensioni delle celle di discretizzazione del dominio continuo di calcolo per FDS ed EVAC, nonché la frazione in massa equivalente di produzione di CO per ogni grammo bruciato di poliuretano, sono state ottenute attraverso un processo di ottimizzazione ampiamente descritto dagli Autori in uno studio precedente [3], che trae spunto dai test reali disponibili in letteratura.

Le caratteristiche della galleria utilizzate per gli scenari base prevedono una lunghezza pari a 1.000 m (interdistanza tra due uscite/accessi consecutivi anche intermedi). Le sezioni trasversali adottate derivano da quelle indicate nel manuale di progettazione in uso presso il Gestore italiano della rete ferroviaria relativamente alle gallerie naturali realizzate con scavo meccanizzato e destinate alla rete ferroviaria transeuropea per il transito di convogli con velocità di esercizio fino a 300 km/ora (appartenenti al sistema Alta Velocità/Alta Capacità), ipotizzando però una larghezza dei marciapiedi sempre pari a 90 cm.

Le configurazioni geometriche teoriche scelte per gli scenari base, in definitiva, sono le seguenti:

- ◆ area 53 m<sup>2</sup>, nel caso di galleria monodirezionale con singolo binario e marciapiede su un solo lato e largo 0,90 m;
- ◆ area 107 m<sup>2</sup>, nel caso di galleria bidirezionale con doppio binario e marciapiede su entrambi i lati e largo 0,90 m.

Nel caso dello scenario di classe A, le caratteristiche del materiale rotabile si sono assunte coincidenti con quelle del treno ETR500, oggi in esercizio nella rete italiana AV/AC; di seguito si riassumono le principali peculiarità che vengono adottate nelle simulazioni:

- ◆ composizione bloccata, formata da 12 carrozze (una di prima classe speciale con 26 posti a sedere, tre di prima classe normale con 52 posti ciascuna, una carrozza ristorante, sette di seconda classe con 68 posti ciascuna) e da due motrici di testa, per una lunghezza complessiva di 354 m;
- ◆ incendio nella carrozza ristorante, ferma in posizione centrale rispetto alla galleria;
- ◆ un coefficiente di riempimento identico per ogni carrozza e pari al 100% della capacità di trasporto del treno (persone distribuite e collocate in ogni carrozza secondo la reale disponibilità dei posti a sedere);
- ◆ componenti dello staff tecnico pari a sei persone e collocate due nella motrice, due nel compartimento capotreno, due nella carrozza ristorante.

Nel caso delle classi incidentali B e C con incendio nel treno merci, si sono considerate le seguenti caratteristiche del materiale rotabile:

- ◆ composizione formata da 12 carri merci tradizionali e da una motrice di testa per una lunghezza complessiva di 260 m;
- ◆ incendio nel carro merci centrale (rispetto al treno), fermo in posizione centrale rispetto alla galleria;
- ◆ componenti dello staff tecnico pari a due persone e collocate nella motrice.

Il modello di esposizione e di esodo adottato per le persone esposte agli eventi incidentali A, B e C prevede:

- ◆ un'esposizione di 664 persone per il treno passeggeri (staff tecnico + capacità del convoglio);
- ◆ un'esposizione di due persone per il treno merci (Staff tecnico);
- ◆ una composizione demografica dei soggetti esposti di tipo omo-

genea, appartenenti tutti alla classe "adulti", per i quali si è adottata una velocità base o indisturbata di esodo  $v_0$  pari a 1,25 m/s (percorso piano, superficie calpestabile, assenza di qualunque condizionamento ambientale);

- ◆ un tempo di pre-movimento (tempo che intercorre prima che inizi l'esodo) dei soggetti esposti pari alla somma del tempo di percezione (intervallo temporale complessivamente intercorrente tra l'inizio della combustione e l'avvertimento delle persone della presenza di incendio), che si assume coincidente con i tempi legati all'attivazione e comunicazione dell'allarme incendio, e del tempo di reazione (tempo richiesto dalle persone per iniziare l'esodo una volta noto il pericolo) per il quale si è adottata, in relazione ai dati disponibili in letteratura, una distribuzione di Gauss con media pari a 60 secondi e deviazione standard pari a 20 secondi.

L'ambiente interno alla galleria nelle condizioni pre-incidente è stato simulato assumendo:

- ◆ la temperatura ambiente pari a 20°C;
- ◆ la concentrazione di ossigeno pari al 20,70% in volume (valore in atmosfera al livello del mare);
- ◆ pressione atmosferica pari a 101.325 Pa;
- ◆ una ventilazione naturale dell'aria di velocità pari a 1 m/s.

Il passo successivo dell'iter procedurale è consistito nell'individuazione degli "scenari derivati", ovvero gli scenari ottenuti da quelli base integrati con le misure di sicurezza.

Tenendo conto delle ipotesi semplificative già introdotte per l'individuazione degli scenari base e della classificazione delle salvaguardie riportata dal Decreto Ministeriale 28.10.2005, è stata assunta unitaria la probabilità di malfunzionamento delle misure di sicurezza relative al sottosistema "procedure operative" (si suppongono inefficaci gli interventi delle squadre di soccorso) ed è stata considerata quindi la sola presenza delle predisposizioni di sicurezza appartenenti ai sottosistemi "infrastruttura" e "materiale rotabile" e alle relative sottoclassi "mitigazione degli incidenti" e "facilitazione dell'esodo" che di seguito si elencano:

- ◆ marciapiede/sezione;
- ◆ uscite/accessi;
- ◆ porte uscite/accessi;
- ◆ sistema di illuminazione di emergenza;
- ◆ sistema di rilevazione e comunicazione incendio.

Per i motivi nel prosieguo illustrati, non hanno preso parte al processo di simulazione alcuni elementi del sistema galleria:

- ◆ i percorsi di esodo realizzati all'interno delle uscite/accessi intermedi (finestre, pozzi, collegamenti trasversali tra canne parallele, collegamenti trasversali/altimetrici tra galleria e galleria parallela di sicurezza o tra galleria e cunicoli di emergenza sotto-traccia, laterali, al controsoffitto, comunque interni alla sezione); essi si considerano luoghi e vie di fuga sicuri in quanto sempre protetti (è un requisito minimo) da sistemi di compartimentazione strutturali (porte REI) e/o impiantistici (pressurizzazione mediante ventilatori longitudinali, lame d'aria, lame d'acqua);
- ◆ i sistemi di estinzione incendio, automatici o manuali, a bordo treno o in galleria; la loro azione di spegnimento sul focolaio d'incendio non risulta simulabile nelle condizioni standardizzate adottate per la sorgente;
- ◆ i sistemi meccanici di ventilazione longitudinale; il loro funzionamento non risulta correttamente implementabile con il modello di calcolo adottato (gli effetti di amplificazione della potenza termica del focolaio di incendio all'aumentare della velocità del flusso longitudinale dell'aria, risultano rilevanti già per valori superiori ad 1 m/s);





- ◆ i sistemi strutturali di estrazione o evacuazione del fumo quali camini e pozzi di ventilazione: il loro funzionamento dipende, oltre che dall'ampiezza della sezione trasversale e dalla interdistanza, anche dall'altezza di sbocco la quale, a sua volta, è condizionata dall'orografia del territorio attraversato e dalle coperture della galleria, risultando così molto variabile di caso in caso e dunque difficilmente standardizzabile.

Ciascuna delle misure di sicurezza precedentemente elencate possiede una propria funzione protettiva o di sicurezza dipendente dalle condizioni di intervento (variabili di funzionamento) e dal contesto ambientale in cui è posta (variabili di stato o di processo o parametri di sicurezza del sistema galleria).

Non tutte le misure di sicurezza hanno una funzione di sicurezza indipendente dalle altre. Il funzionamento del marciapiede risulta condizionato dalla sezione trasversale della galleria, dalle uscite/accessi intermedi e localmente anche dalle porte di questi ultimi: in particolare esiste una corrispondenza biunivoca tra il valore assunto dalla variabile che descrive la sezione trasversale e i valori assunti dalla variabile che descrive il marciapiede. Analogamente le vie di esodo a bordo treno risultano localmente e/o globalmente condizionate dalle relative porte di uscita/accesso. I sistemi di illuminazione di emergenza in galleria e a bordo treno sono tra loro mutuamente e localmente condizionati (nel tratto occupato dal convoglio ferroviario) a causa delle superfici trasparenti delle carrozze che permettono il reciproco illuminamento. Sulle modalità di funzionamento del sistema di comunicazione allarme, inoltre, influisce il sistema di rilevazione incendio, in quanto non potrà attivarsi il primo senza che il secondo non abbia preventivamente compiuto la sua specifica

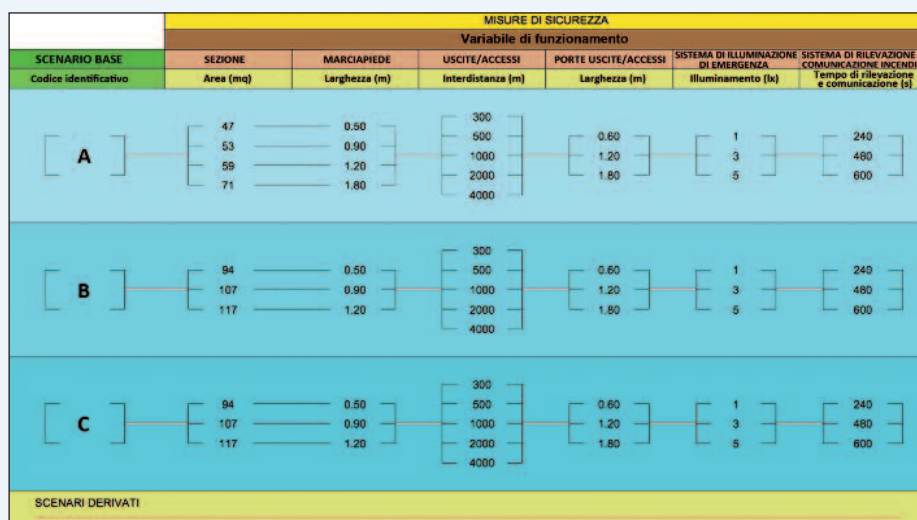


Figura 3 - La rappresentazione "ad albero" degli scenari derivati

missione: pur tuttavia, su scala temporale assoluta, le variabili di funzionamento dei due sistemi sono indipendenti.

Nella Tabella 1 vengono riassunte, per ciascuna misura di sicurezza, le relative variabili di funzionamento e i valori da esse assunte nelle diverse simulazioni condotte, nonché i raggruppamenti necessari tra predisposizioni di sicurezza al fine di sottoporre a simulazione misure di sicurezza con funzioni di protezione indipendenti.

Nella Figura 3 sono riassunti, sotto forma di struttura ad albero, gli scenari incidentali derivati, ottenuti con l'introduzione delle misure di sicurezza fin qui esposte negli scenari base già individuati. Considerando tutte le combinazioni ammissibili tra i valori assunti dalle variabili di funzionamento di ciascuna misura, complessivamente si ottengono 1.350 sistemi galleria potenzialmente simulabili, di cui 540 sono gli scenari derivati dallo scenario base A, mentre 405 sono gli scenari derivati per ciascuno degli scenari base B e C.

Attraverso un opportuno processo preliminare di ordinamento a cascata

Raggruppamenti indipendenti di misure di sicurezza	Misure di sicurezza simulate	Variabile di funzionamento	Valori assunti dalle variabili di funzionamento
Marciapiede/sezione galleria	Sezione trasversale	area [m <sup>2</sup> ]	monodirezionale: 47, 53, 59, 71 bidirezionale: 94, 107, 117
	Marciapiede	larghezza [m]	un solo lato: 0.50, 0.90, 1.20, 1.80 entrambi i lati: 0.50, 0.90, 1.20
Uscite/accessi galleria	Uscite/accessi galleria	interdistanza [m]	300, 500, 1000, 2000, 4000
Porte uscite/accessi galleria	Porte uscite/accessi galleria	larghezza [m]	0.60, 1.20, 1.80
Vie di esodo treno	Vie di esodo treno	larghezza [m]	1 <sup>a</sup> classe speciale: 0.70
			1 <sup>a</sup> classe: 0.60
			2 <sup>a</sup> classe: 0.45
			ristorante: 0.70
Porte uscite/accessi treno	Porte uscite/accessi treno	larghezza [m]	1 <sup>a</sup> classe speciale: 0.85
			1 <sup>a</sup> classe: 0.70
			2 <sup>a</sup> classe: 0.70
			ristorante: 0.00
Sistema di illuminazione di emergenza galleria	Sistema di illuminazione di emergenza galleria	illuminamento [lux]	1, 3, 5
	Sistema di illuminazione di emergenza treno	illuminamento [lux]	1, 3, 5
Sistema di rilevazione e comunicazione incendio	Sistema di rilevazione incendio	Tempo di rilevazione [s]	120, 300
	Sistema di comunicazione allarme	Tempo di comunicazione [s]	120, 180, 300
	Sistema di rilevazione incendio + sistema di comunicazione allarme	Tempo di rilevazione + comunicazione [s]	240, 480, 600

Tabella 1 - Le misure di sicurezza e loro variabili di funzionamento

Numero progressivo di scenario	Codice alfanumerico identificativo di scenario
1	A.1
Componenti oggetto di simulazione	Parametri di input
Uomo, galleria, treno, ambiente, incendio, modello	Come scenario base A
Misure di sicurezza simulate	Modalità di funzionamento
Sezione trasversale	Area = 71 m <sup>2</sup>
Marcia piede	Larghezza = 1.80 m
Uscite/Accessi	Interdistanza = 300 m
Porte Uscite/Accessi	Larghezza = 1.20 m
Sistema di ventilazione longitudinale	Velocità aria = 1 m/s
Sistema di illuminazione di emergenza	Illuminamento = 3 lux
Sistema di rilevazione e di comunicazione incendio	Tempo rilevazione + comunicazione = 480 s

Tabella 2 - I parametri di input dello scenario incidentale rilevante di progetto A.1 (esempio)

degli scenari derivati, effettuato in relazione alla gravità delle conseguenze attese in termini di numero di vittime mediante il confronto dei risultati ottenuti dalla simulazione di alcuni scenari "borderline", tenendo conto dei vincoli fisici legati alla durata delle elaborazioni numeriche necessarie per i calcoli e trascurando quegli scenari la cui simulazione non avesse aggiunto un maggiore dettaglio ai risultati finali, è stato possibile selezionare tra i 1.350 sistemi galle-

lizzati per la simulazione, un numero d'identificazione progressivo generale (da 1 a 52), nonché il codice alfanumerico identificativo dello scenario base da cui esso è derivato.

### La quantificazione del flusso del pericolo

Con l'utilizzo combinato del codice di calcolo numerico FDS ed EVAC è stato possibile ottenere, come risultato della simulazione, gli output

potenzialmente simulabili, i 52 scenari più significativi in termini di rappresentatività dell'intero insieme degli scenari. Questi 52 scenari così individuati, assumono il ruolo di scenari rilevanti di progetto: di questi, 26 sono scenari derivati dallo scenario base A, 13 dallo scenario base B e 13 dallo scenario base C.

La Tabella 2, relativa allo scenario A.1 costituisce un esempio di come le informazioni dei vari scenari rilevanti sono state sintetizzate; in particolare, sono riportati i relativi parametri di input uti-

lizzati per la caratterizzazione degli stati di emergenza, ovvero del "microclima" interno alla galleria e i successivi stati di fine emergenza per il sistema galleria grazie alla contemporanea simulazione del processo condizionato di esodo delle persone esposte. È stato così possibile studiare l'intero flusso del pericolo, dal suo principium in funzione della sorgente, al suo exitus in relazione ai bersagli colpiti.

Il numero delle vittime, variabile rappresentativa del danno ai ricettori sensibili, assunto quale indicatore assoluto di danno globale per il sistema galleria, consente una precisa caratterizzazione quantitativa della magnitudine delle conseguenze di ogni scenario analizzato, ma soprattutto il confronto e la gerarchizzazione di questi ultimi secondo una precisa scala di danno, in cui la differenza di posizione occupata, risulta unicamente imputabile all'efficacia delle misure di sicurezza presenti.

Nella Tabella 3, vengono riportati in ordine progressivo di numerazione, per ciascuno degli scenari incidentali rilevanti di progetto, il numero di vittime (N) e il relativo indicatore assoluto di danno globale per il sistema galleria ( $I_G$ ), adimensionale, ottenuto dalla normalizzazione di N rispetto all'esposizione. La Tabella 4 è analoga alla precedente, con la differenza che l'ordinamento degli scenari di progetto è realizzato in base al valore assunto dall'indicatore  $I_G$ .

Progressiva di scenario	Codice scenario	N	$I_G$	Progressiva di scenario	Codice scenario	N	$I_G$
1	A.1	0	0	27	B.1	247	0,37
2	A.2	0	0	28	B.2	0	0
3	A.3	0	0	29	B.3	0	0
4	A.4	26	0,04	30	B.4	412	0,62
5	A.5	75	0,11	31	B.5	212	0,32
6	A.6	0	0	32	B.6	179	0,27
7	A.7	0	0	33	B.7	244	0,37
8	A.8	71	0,11	34	B.8	343	0,52
9	A.9	172	0,26	35	B.9	255	0,38
10	A.10	330	0,5	36	B.10	240	0,36
11	A.11	0	0	37	B.11	335	0,5
12	A.12	0	0	38	B.12	402	0,6
13	A.13	284	0,43	39	B.13	305	0,46
14	A.14	152	0,23	40	C.1	666	1
15	A.15	0	0	41	C.2	29	0,04
16	A.16	170	0,26	42	C.3	410	0,62
17	A.17	230	0,35	43	C.4	666	1
18	A.18	178	0,27	44	C.5	654	0,98
19	A.19	168	0,25	45	C.6	534	0,8
20	A.20	323	0,49	46	C.7	666	1
21	A.21	463	0,7	47	C.8	666	1
22	A.22	7	0,01	48	C.9	666	1
23	A.23	139	0,21	49	C.10	666	1
24	A.24	273	0,41	50	C.11	666	1
25	A.25	441	0,66	51	C.12	666	1
26	A.26	573	0,86	52	C.13	666	1

Tabella 3 - Il numero di vittime N e indicatore di danno  $I_G$  per gli scenari rilevanti di progetto



Livello di danno	$I_G$	N	Codice scenario	Livello di danno	$I_G$	N	Codice scenario
1	0	0	A.1	27	0,37	247	B.1
2	0	0	A.2	28	0,38	255	B.9
3	0	0	A.3	29	0,41	273	A.24
4	0	0	A.6	30	0,43	284	A.13
5	0	0	A.7	31	0,46	305	B.13
6	0	0	A.11	32	0,49	323	A.20
7	0	0	A.12	33	0,5	330	A.10
8	0	0	A.15	34	0,5	335	B.11
9	0	0	B.2	35	0,52	343	B.8
10	0	0	B.3	36	0,6	402	B.12
11	0,01	7	A.22	37	0,62	410	C.3
12	0,04	26	A.4	38	0,62	412	B.4
13	0,04	29	C.2	39	0,66	441	A.25
14	0,11	71	A.8	40	0,7	463	A.21
15	0,11	75	A.5	41	0,8	534	C.6
16	0,21	139	A.23	42	0,86	573	A.26
17	0,23	152	A.14	43	0,98	654	C.5
18	0,25	168	A.19	44	1	666	C.1
19	0,26	170	A.16	45	1	666	C.4
20	0,26	172	A.9	46	1	666	C.7
21	0,27	178	A.18	47	1	666	C.8
22	0,27	179	B.6	48	1	666	C.9
23	0,32	212	B.5	49	1	666	C.10
24	0,35	230	A.17	50	1	666	C.11
25	0,36	240	B.10	51	1	666	C.12
26	0,37	244	B.7	52	1	666	C.13

Tabella 4 - L'indicatore di danno  $I_G$  e numero di vittime N in ordine di gravità

Dalla Tabella 4 si evince come anche scenari (C.2) in cui la potenza di incendio è assolutamente elevata (100 MW), qualora siano presenti le idonee misure di sicurezza, possono avere un indicatore assoluto di danno globale  $I_G$  inferiore a scenari in cui la potenza di incendio è anche notevolmente più bassa (10 MW).

Viceversa scenari come l'A.26 (potenza termica di 10 MW) in cui la configurazione delle misure di sicurezza adottate è palesemente insufficiente, conseguono un livello di danno superiore a quello raggiunto da scenari potenzialmente più pericolosi perché di potenza termica molto più elevata (50 o 100 MW) ma che si sviluppano in sistemi galleria meglio equipaggiati in termini di sicurezza.

## Conclusioni

Con il presente contributo si è dettagliata la metodologia seguita per l'individuazione iniziale degli scenari incidentali rilevanti di progetto dovuti a incendio e per la successiva simulazione degli stessi.

La procedura esposta non ha tratto origine né da valutazioni di stampo affidabilistico, né da deduzioni di carattere probabilistico: il metodo di quantificazione della magnitudo delle conseguenze è stato quello fondato sulla analisi di scenario condotta mediante modelli di simulazione, conformemente a quanto prescritto dal

D.M. 28.10.2005 "Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie".

Gli output ottenuti in termini sintetici di numero di vittime per ogni scenario simulato sono stati rielaborati in termini statistici sia per definire una scala gerarchica di danno che per avere una base di osservazione più chiara rispetto alla gravità delle conseguenze e al loro manifestarsi: la differenza di posizione occupata dall'indicatore assoluto di danno globale ( $I_G$ ) è infatti una misura diretta dell'efficacia delle predisposizioni di sicurezza presenti all'interno del sistema galleria oggetto di simulazione.

Si sottolinea, infine, che i risultati illustrati nel presente contributo costituiranno l'incipit per un ulteriore studio di prossima pubblicazione nel quale gli autori condurranno l'analisi prestazionale di ognuna delle singole misure di sicurezza qui considerate, al fine di determinarne la funzione di sicurezza o di salvabilità, nonché le relative efficacia ed efficienza. ■

\* *Professore Associato e Docente di Infrastrutture Viarie Urbane e Metropolitane dell'Università degli Studi di Catania*

\*\* *Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie dell'Università degli Studi di Catania*

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 28 Ottobre 2005, "Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie", G.U.R.I. n° 83 dell'8 Aprile 2006.
- [2]. Decisione della Commissione Europea 2008/163/CE del 20 Dicembre 2007 Specifica Tecnica di Interoperabilità (STI), "Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie", G.U.C.E. L 64 del 7 Marzo 2008.
- [3]. S. Leonardi, M.S. Spinelli - "Sicurezza dei Tunnel Ferroviari: i modelli di simulazione per la quantificazione della gravità delle conseguenze associate ai possibili scenari incidentali", "Strade & Autostrade" n° 77/2009.
- [4]. K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm - "Fire Dynamics Simulator (version 5): Technical Reference Guide". NIST Special Publication 1018-5, U.S. Government Printing Office, Washington 2007.
- [5]. T. Korhonen, S. Hostikka - "Fire Dynamics Simulator with Evacuation FDS+EVAC (FDS v. 5.2.0, EVAC v. 2.0.0): Technical Reference and User's Guide", VTT (Technical Research Centre of Finland), 2008.
- [6]. J. Brekelmans, R. Van Den Bosch - "Summary of Large Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel in Norway", Settembre 2003.
- [7]. A. Haack, B. Brousse, N. P. Hoj, G. Micolotti, D. Gabay, A. Marchais, N. Rhodes, M. MacDonald - "Technical Report Part 1, Part 2, Part 3", Thematic Network FIT (Fire in Tunnels), 5° Programma Quadro della Comunità Europea, Ottobre 2007.