

Sicurezza Tunnel Ferroviari

Analisi critica

della normativa italiana e criteri per lo studio degli scenari incidentali

NELLA SOCIETÀ ODIERNA SI MANIFESTA IN MANIERA SEMPRE PIÙ EVIDENTE L'ESIGENZA DI VALUTARE I PROBLEMI DI SICUREZZA DELLA POPOLAZIONE E DELL'AMBIENTE LEGATI A QUALSIVOGLIA PROCESSO PRODUTTIVO, INFRASTRUTTURALE O SOCIALE. NEL PRESENTE ARTICOLO VIENE OFFERTO UN APPROCCIO SISTEMICO ALLA PROGETTAZIONE DELLE GALLERIE FERROVIARIE ENTRO BEN VALUTABILI LIVELLI DI SICUREZZA, NONCHÉ UNA REVISIONE CRITICA DEL DISPOSTO NORMATIVO COSTITUITO DAL D.M. 28-10-2005. IL CONTRIBUTO DEGLI AUTORI SI INQUADRA ALL'INTERNO DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA INERENTI AL DOTTORATO IN INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE, ATTIVATO PRESSO L'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA.

Con l'entrata in vigore del DM 28/10/2005 - "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" (GU n. 83 dell'8 aprile 2006) viene profondamente modificato e per la prima volta organicamente regolamentato l'approccio alla domanda/offerta di sicurezza nel trasporto ferroviario in galleria da parte di quanti, utenti, imprese di trasporto, gestori di rete, decisori politici ed istituzionali, risultano a vario titolo coinvolti in tale contesto: ad ognuno di essi è affidato un compito proporzionale al ruolo ricoperto al fine di garantire l'obiettivo della sicurezza del sistema ferroviario italiano. Occorre già da subito precisare che, ragionando secondo una logica di sistema, non si può pensare di prescindere dall'analisi puntuale e sistematica delle condizioni di sicurezza dell'intera rete ferroviaria né di astrarre dal contesto generale le tratte in galleria cui affidare obiettivi di sicurezza non omogenei e non co-

ordinati rispetto al resto. Ferma restando, dunque, l'esigenza di un programma complessivo per l'adeguamento e le nuove realizzazioni di rete, è chiaro che le gallerie rappresentano, per le condizioni che realizzano in caso d'incidente e per il conseguente forte impatto psicologico indotto sull'opinione pubblica, un elemento da studiare con particolare attenzione.

Gli incidenti nei tunnel ferroviari, alla stessa stregua di quelli che occorrono generalmente nelle gallerie stradali, presentano le caratteristiche proprie dei cosiddetti "eventi rari o eccezionali", ossia con bassa frequenza di accadimento e con magnitudo delle conseguenze spesso elevata. Si deve notare inoltre che, per la sua particolare conformazione orografica, l'Italia è uno dei Paesi più ricchi di tunnel ferroviari. Sulla base dei dati pubblicati dalle Ferrovie dello Stato, la rete ferroviaria italiana ad oggi in esercizio e in gestione al Gruppo

Sascia Canale

Professore ordinario e docente di Teoria delle Infrastrutture Viarie - Università degli Studi di Catania

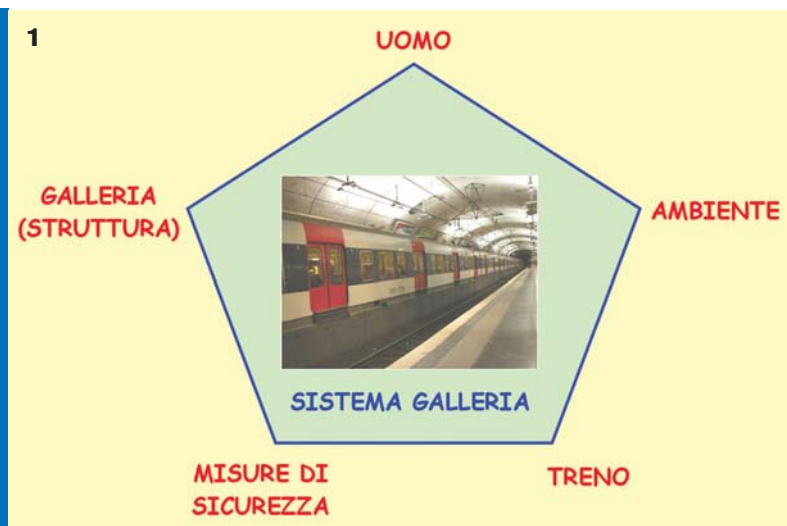
Salvatore Leonardi

Ricercatore Universitario e docente di Infrastrutture Viarie Urbane e Metropolitane - Università degli Studi di Catania

Marco Santo Spinelli

Dottorando di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie - Università degli Studi di Catania

Gallerie



1. Fattori componenti il "sistema galleria"

FS possiede una estensione di circa 16200 km. Le gallerie sono oltre 2000 e raggiungono uno sviluppo di circa 1380 km, rappresentando dunque l'8,5% del totale dell'intera rete ferroviaria; a queste vanno poi aggiunte quelle in costruzione e di prossima apertura: 113 per una estensione di circa 188 km. Le gallerie previste o in progettazione sono invece 126 per una estensione complessiva di circa 370 km. Se si considera, poi, il fatto che un'elevata percentuale dei tunnel ferroviari (comprendenti anche le gallerie metropolitane presenti negli ambiti urbani e periurbani) si sviluppa (e si svilupperà in futuro) su tracciati di estensione maggiore di 2000 metri, risulta ancora più evidente come tali elementi infrastrutturali rappresentino le componenti potenzialmente più critiche per l'intero sistema di trasporto su ferro, in quanto realizzano una configurazione spaziale tale per cui il verificarsi di un eventuale incidente ne comporta un'amplificazione rilevante delle conseguenze.

In tale contesto, l'obiettivo del presente contributo sarà quello di revisionare criticamente gli aspetti peculiari del Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" (28/10/2005) e nel contempo, si cercherà di fornire precisi indirizzi procedurali in merito allo studio degli scenari incidentali necessari per lo svolgimento della procedura di analisi di rischio suggerita dal Decreto stesso.

L'APPROCCIO ALLA SICUREZZA DEL DM 28/10/2005

Sebbene non venga abbandonata del tutto la tradizionale logica prescrittiva, l'innovazione maggiore del Decreto sta nell'aver adottato un approccio di tipo prestazionale alla sicurezza, basato cioè sulla definizione puntuale degli obiettivi, delle metodologie analitiche di

verifica e dei sistemi di gestione della sicurezza. Nel contempo, però, si impone l'adozione obbligatoria dei cosiddetti "requisiti minimi" di sicurezza (art. 3, comma 3), i quali da un lato garantiscono una certa omogeneità realizzativa ed evitano di produrre soluzioni tra loro troppo differenti nel caso di nuove realizzazioni, dall'altro lato pongono forti condizionamenti nelle scelte progettuali da adottare in caso di adeguamento di tunnel esistenti. In effetti la prescrizione di precisi requisiti minimi anche in caso di riqualificazione ed adeguamento delle gallerie ferroviarie, impedisce di fatto il ricorso a soluzioni alternative, che potrebbero anche essere di più facile attuazione di quelle previste dalla Norma e/o meno onerose, e, tuttavia, altrettanto valide poiché equivalenti dal punto di vista delle prestazioni in termini di sicurezza. A tal proposito è bene precisare che manca, nel testo normativo, qualsiasi possibilità di deroga per il non soddisfacimento degli standard imposti, in netto contrasto con il principio prestazionale stesso, sebbene lo stesso allegato III al Decreto preveda, in maniera che appare alquanto contraddittoria, il caso di gallerie non corredate dai requisiti minimi.

I CONCETTI DI "SISTEMA GALLERIA" E DI "SISTEMA TRENO-GALLERIA"

In più punti, il testo normativo si riferisce senza mai definirlo chiaramente, al concetto globale di "sistema galleria" poi ridotto al più parziale "sistema treno-galleria". Su tale concetto si basa tutta l'architettura del decreto, semplificando in tal modo il problema attraverso la riduzione dei "gradi di libertà", ma finendo per non cogliere appieno le potenzialità applicative espresse in nuce nella stessa enunciazione dello scopo e dell'oggetto.

A tal proposito si noti che per "sistema galleria" si intende correntemente l'insieme dei suoi elementi componenti sintetizzabili nel pentanomio uomo - galleria (struttura) - misure di sicurezza - treno - ambiente (fig. 1). Ognuno di tali elementi, quindi, è da ritenersi, un "oggetto sensibile", a cui assicurare cioè livelli di sicurezza adeguati (dove l'adeguatezza è stabilita in base a soglie preventivamente fissate in funzione di opportuni criteri di accettabilità del rischio) e, contemporaneamente, un "soggetto attivo" nella determinazione degli scenari e delle configurazioni iniziali e finali di studio.

In merito al "fattore uomo", in linea con il Decreto, si ritiene opportuno dargli priorità e non esclusività, in tutte le sue declinazioni e in tutti gli stadi di vita dell'opera, per il primario ed imprescindibile valore che possiede. Esistendo già una legislazione ben precisa e det-

TAB. 1 - REQUISITI MINIMI DI SICUREZZA PRESCRITTI DAL D.M. 28-10-2005 IN FUNZIONE DELLA CLASSE DI LUNGHEZZA A CUI APPARTIENE IL SISTEMA GALLERIA (RIQUADRI IN GRIGIO)

Rif. All. II D.M.

28-10-2005	Requisiti Minimi di Sicurezza	Lunghezza del Sistema Galleria [km]					
		0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	> 5
1.1	INFRASTRUTTURA – Prevenzione Incidenti						
1.1.1	Sistema di radiocomunicazione						
1.1.2	Limitazione deviatoti in galleria						
1.1.3	Controllo sistematico dello stato del binario						
1.1.4	Protezione e controllo accessi						
1.1.5	Ispezione regolare dello stato della galleria						
1.1.6	Piano manutenzione galleria						
1.2	INFRASTRUTTURA – Mitigazione Conseguenze Incidenti						
1.2.1	Requisiti di resistenza e reazione al fuoco: generali						
1.2.1	Requisiti di resistenza e reazione al fuoco: $R \geq 120$						
1.2.2	Affidabilità delle installazioni elettriche						
1.2.3	Impianto idrico antincendio						
1.3	INFRASTRUTTURA – Facilitazione Esodo						
1.3.1	Marciapiede: larghezza ≥ 50 cm						
1.3.1	Marciapiede: larghezza ≥ 90 cm						
1.3.2	Corrimano						
1.3.3	Segnaletica di emergenza						
1.3.4	Illuminazione di emergenza nella galleria						
1.3.5	Uscite/accessi: collegamenti trasversali ogni 500 m in gallerie a doppia canna						
1.3.5	Uscite/accessi: accessi non carrabili ogni 2 km in alternativa, in aree urbane, a finestre carrabili ogni 4 km						
1.3.5	Uscite/accessi: finestre carrabili ogni 4 km						
1.3.6	Realizzazione uscite/accessi						
1.3.6	Realizzazione uscite/accessi: accessi intermedi carrabili con percorsi pedonali di larghezza utile tra 90 e 120 cm						
1.3.7	Sistema di controllo fumi nelle vie di esodo						
1.3.8	Impianto telefonico di emergenza e di diffusione sonora						
1.4	INFRASTRUTTURA - Facilitazione Soccorso						
1.4.1	Piazzale di emergenza						
1.4.2	Area di triage						
1.4.3	Piazzole per l'elisoccorso						
1.4.4	Strade di accesso						
1.4.5	Impianto di radiopropagazione in galleria per i soccorsi						
1.4.6	Disponibilità di energia elettrica per le squadre di soccorso						
1.4.7	Postazioni di controllo						
1.4.8	Sezionamento linea di contatto						
1.4.9	Sistema di interruzione e messa a terra linea di contatto						

tagliata sulla salute e sicurezza nei luoghi di lavoro e più specificamente nei cantieri temporanei e mobili, il Decreto tratta approfonditamente le fasi di progettazione, di esercizio e in parte di manutenzione, lasciando però pochissimo spazio alle possibili interazioni tra queste e la fase di costruzione, che pure esistono e che rivestono una notevole importanza nell'ottenere un'o-

pera sicura e di qualità, a tempi e costi certi. Viceversa, l'aver legato i risultati della progettazione all'esercizio ferroviario rappresenta, da parte degli estensori del Decreto, oltre che un lodevole approccio fortemente innovativo, anche un primo passo concreto verso una più completa e globale strategia di Tunnel Safety Management (TSM).

Rif. All. II D.M.

28-10-2005

Requisiti Minimi di Sicurezza

Lunghezza del Sistema Galleria [km]

		0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	> 5
2.1	MATERIALE ROTABILE – Prevenzione e Mitigazione						
2.1.1	Misure di protezione dal fuoco (materiali di motrici/carrozze)						
2.1.2	Rilevatori di incendio a bordo (motrici, carrozze notte, ristorante, passeggeri)						
2.1.3	Dispositivi manuali di allarme						
2.1.4	Neutralizzazione freno di emergenza						
2.1.5	Mantenimento della capacità di movimento						
2.1.6	Estintori portatili a bordo						
2.1.7	Impianti fissi di estinzione						
2.1.8	Comando centralizzato spegnimento aria condizionamento						
2.1.9	Illuminazione d'emergenza						
2.1.10	Equipaggiamento di primo soccorso a bordo						
2.2	MATERIALE ROTABILE – Facilitazione Esodo	0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	> 5
2.2.1	Dimensionamento per l'esodo						
3.1	PROCEDURE OPERATIVE – Prevenzione e Mitigazione	0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	> 5
3.1.1	Arresto per emergenza						
3.2	PROCEDURE OPERATIVE – Facilitazione Esodo	0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	> 5
3.2.1	Formazione del personale						
3.2.2	Informazioni di sicurezza e istruzioni sul comportamento in caso di emergenza						
3.3	PROCEDURE OPERATIVE – Facilitazione Soccorso	0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	> 5
3.3.1	Piani di emergenza e soccorso						
3.3.2	Esercitazioni periodiche con le squadre di soccorso						
3.3.3	Mezzi di soccorso (mezzo bimodale)						
3.3.4	Informazioni sul trasporto di merci pericolose						
3.3.5	Disponibilità attrezzature di soccorso						

Per ciò che riguarda il "fattore galleria", nel Decreto si dà per scontato che tutte le norme di sicurezza strutturali siano rispettate, mentre si forniscono solo alcune indicazioni, che meriterebbero maggiori approfondimenti, per valutarne il comportamento in caso d'incendio. Le "misure di sicurezza" e le possibili predisposizioni di diversa natura (strutturale, impiantistica, organizzativa) agenti su ognuno dei componenti del sistema galleria ed atte a prevenire l'insorgenza di situazioni di pericolo, mitigarne le eventuali conseguenze, facilitare l'autosoccorso e gli interventi di soccorso, sono elencate nell'allegato II distinte nelle due classi di "requisiti minimi" (tab. 1) e "requisiti integrativi" (tab. 2) e in tre sottosistemi: infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative.

Il Decreto, tuttavia, non fornisce una classificazione delle misure in termini di efficacia e di efficienza, né tanto meno in termini di costo; si ritiene che tale classificazione, se elaborata ed integrata nella Norma, potrebbe risultare fondamentale per indirizzare il progettista e/o il gestore verso le scelte più opportune da privilegiare in

fase di progetto (ad esempio, se preferire gli interventi di prevenzione piuttosto che quelli di mitigazione o quelli di facilitazione dell'esodo e dei soccorsi).

L'approccio presente nel Decreto riguardo al "fattore treno" ricalca quello tradizionale basato sulla definizione di un veicolo standard da impiegare come riferimento per la scelta degli interventi progettuali. In particolare, vengono introdotte le tre seguenti tipologie di convogli di progetto in relazione alle possibili categorie di traffico: treni passeggeri, treni merci e treni merci pericolose. È evidente che questo tipo di approccio, da un lato è quello più semplice dal punto di vista operativo, dall'altro, se applicato meccanicamente, può originare sottodimensionamenti o sovradimensionamenti che potrebbero inficiare le reali prestazioni in termini di sicurezza del sistema galleria.

Sarebbe auspicabile, nel futuro, uno sforzo dei legislatori mirato a fornire precise linee guida per la redazione e l'aggiornamento di un vero e proprio database contenente tutte le informazioni sulle caratteristiche del parco rotabili realmente circolante con particolare riferimen-

to alle predisposizioni di sicurezza di cui sono dotati i convogli ferroviari. In tal modo, si potrebbe di volta in volta, a seconda della specifica questione da affrontare, riferirsi ad uno specifico "treno critico" da impiegare come veicolo di progetto per la scelta degli interventi a favore della sicurezza delle gallerie ferroviarie.

Per quel che concerne le questioni associate al "fattore ambiente", esse sono considerate solo marginalmente all'interno del Decreto Ministeriale; il loro peso, invece, è fortemente rilevante soprattutto nelle fasi della pianificazione e della progettazione preliminare. Il Decreto richiede esclusivamente una estensione delle analisi di sicurezza alle aree in prossimità degli imbocchi dei tunnel se queste presentano rischi specifici aggiuntivi, ma non è richiesta la valutazione delle conseguenze, in caso di incidente, sull'ambiente esterno, siano esse dirette che indirette (forme di inquinamento, effetti sul territorio e sulla rete dei trasporti locali, riflessi sull'opinione pubblica, ecc.).

LA METODOLOGIA DELL'ANALISI DI RISCHIO

I criteri metodologici indicati per lo studio delle prestazioni di sicurezza dei tunnel ferroviari, sono quelli dell'analisi di rischio, di stampo probabilistico, basati sulle tecniche degli alberi delle cause e degli alberi degli eventi combinate con studi di scenario, da inquadrarsi nella logica del sistema treno-galleria e nei suoi sottosistemi infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative. Vengono distinte due tipologie di analisi: l'analisi di rischio base (ARB) e l'analisi di rischio estesa (ARE), ove la prima prende in considerazione un solo scenario incidentale (incendio), mentre la seconda studia tutti i possibili scenari incidentali di riferimento (incendio, deragliamento, collisione).

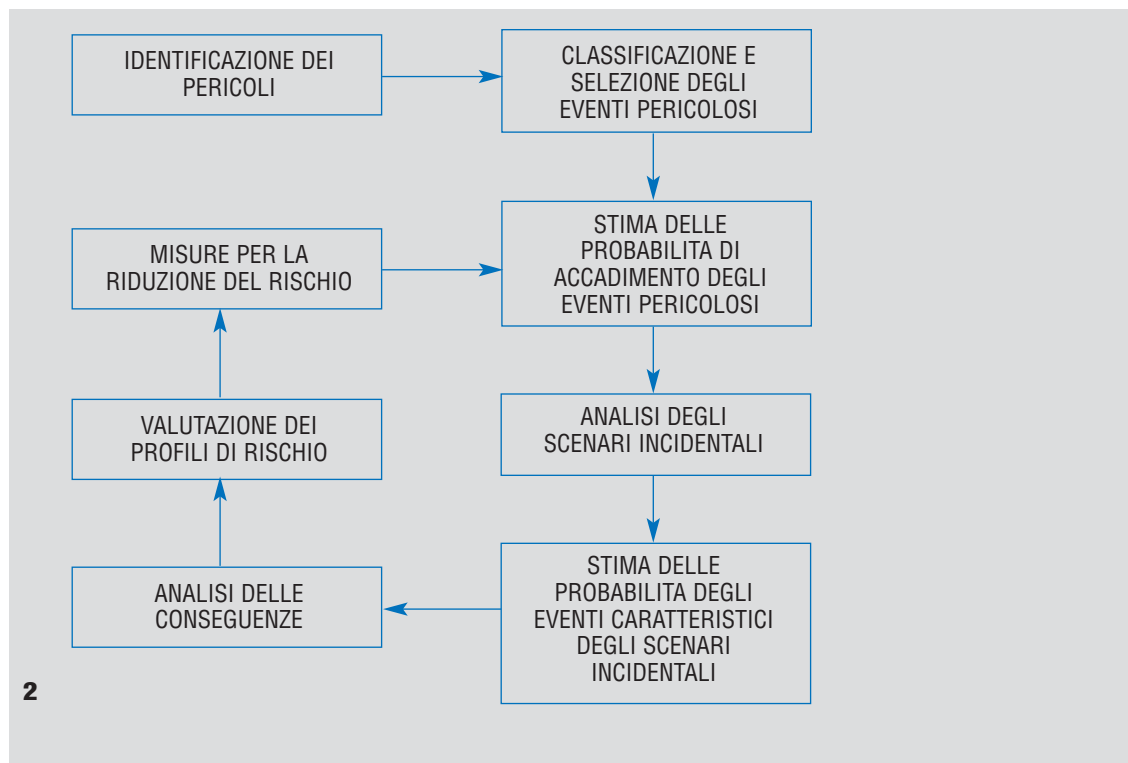
La scelta dell'uno o dell'altro tipo di analisi è condizionata dalla messa in conto di una serie di parametri caratterizzanti il sistema galleria (lunghezza, volume e tipologia di traffico, andamento altimetrico, rischi specifici agli imbocchi) e dalla presenza o meno dei requisiti minimi. In particolare, l'analisi di rischio base è stata impiegata dagli estensori del Decreto per dimostrare che la presenza di tutti i requisiti minimi in gallerie con certe caratteristiche (principalmente di lunghezza non superiore a 2 km), è condizione necessaria e sufficiente a garantire un adeguato livello di sicurezza; ciò significa che per gallerie rientranti in tale classe non è richiesta l'applicazione dell'analisi di rischio.

Per lo svolgimento dell'analisi di rischio base, la Norma prevede un apposito allegato in cui si esplicitano le mo-

TAB. 2 REQUISITI INTEGRATIVI DI SICUREZZA PROPOSTI ED ELENCATI DAL DM 28-10-2005

Rif. All. II D.M.

28-10-2005	Requisiti Integrativi di Sicurezza
1.1	INFRASTRUTTURA – Prevenzione Incidenti
1.1.1	Monitoraggio della velocità/sistema di segnalamento
1.1.2	Individuazione del treno (conta assi, circuito binario)
1.1.3	Impianti fissi per il controllo dello stato del treno
1.1.4	Indipendenza dei binari in galleria
1.2	INFRASTRUTTURA – Mitigazione Conseguenze Incidenti
1.2.1	Requisiti di resistenza e reazione al fuoco (cavi elettrici)
1.2.2	Uscite/accessi
1.2.3	Sezione collegamenti trasversali
1.2.4	Rivelazione di incendio, fumo e gas nei locali tecnici
1.2.5	Sistemi di controllo a distanza TVCC
1.2.6	Sistemi di estinzione incendio
1.2.7	Sistemi di estrazione fumi/sistema di ventilazione
1.3	INFRASTRUTTURA – Facilitazione Esodo
1.3.1	Nicchie
1.3.2	Galleria parallela di servizio e di sicurezza
1.4	INFRASTRUTTURA – Facilitazione Soccorso
1.4.1	Accessibilità per veicoli stradali
1.4.2	Mezzi di soccorso
2.1	MATERIALE ROTABILE – Facilitazione Esodo
2.1.1	Equipaggiamento delle carrozze per facilitare l'esodo dei passeggeri e l'accesso delle squadre di soccorso
3.1	PROCEDURE OPERATIVE – Prevenzione Incidenti
3.1.1	Orario/programma di esercizio (specialmente treni passeggeri/ treni merci pericolose)
3.1.2	Regolamenti per il trasporto di merci pericolose



2. Schema delle fasi operative dell'analisi di rischio estesa secondo il DM 28/10/2005

3. Step 1: individuazione degli scenari incidentali rilevanti di progetto

dalità per calcolare la probabilità di accadimento e gli indicatori di danno associati alle conseguenze dell'evento incidentale (incendio). Nello specifico, viene fornito il criterio analitico per valutare il livello di rischio individuale e di conseguenza quello cumulato, in funzione dei tre seguenti indicatori di danno, sensibili alla sezione della galleria e alla sua lunghezza efficace ed alla larghezza delle vie di esodo:

- D_{ch} , rappresentativo del danno dovuto alla concentrazione del monossido di carbonio e di altri prodotti tossici;
 - D_T , indicativo del danno associato agli effetti della temperatura e dell'irraggiamento termico;
 - D_o , rappresentativo del danno dovuto ad ipossia.
- Il Decreto fornisce le leggi empiriche degli indicatori sopra riportati, ottenute per regressione sui risultati dedotti da un rigoroso e ben esplicitato modello deterministico del fenomeno incendio applicato ad uno scenario base e ad una opportuna varietà di casi tipo. Meno chiari appaiono i concetti di "lunghezza equivalente" e "sicurezza equivalente" che sottintendono il con-

fronto con una galleria virtuale non meglio definita. Tali concetti potrebbero essere usati, al variare delle misure di sicurezza adottate, per una stima di prima approssimazione sul livello di sicurezza offerto dalla generica galleria, come una sorta di indicatore sintetico in ordine alla necessità di stabilire un criterio di priorità nella riqualificazione dei tunnel esistenti o una prima ipotesi progettuale ragionata nel caso delle nuove realizzazioni.

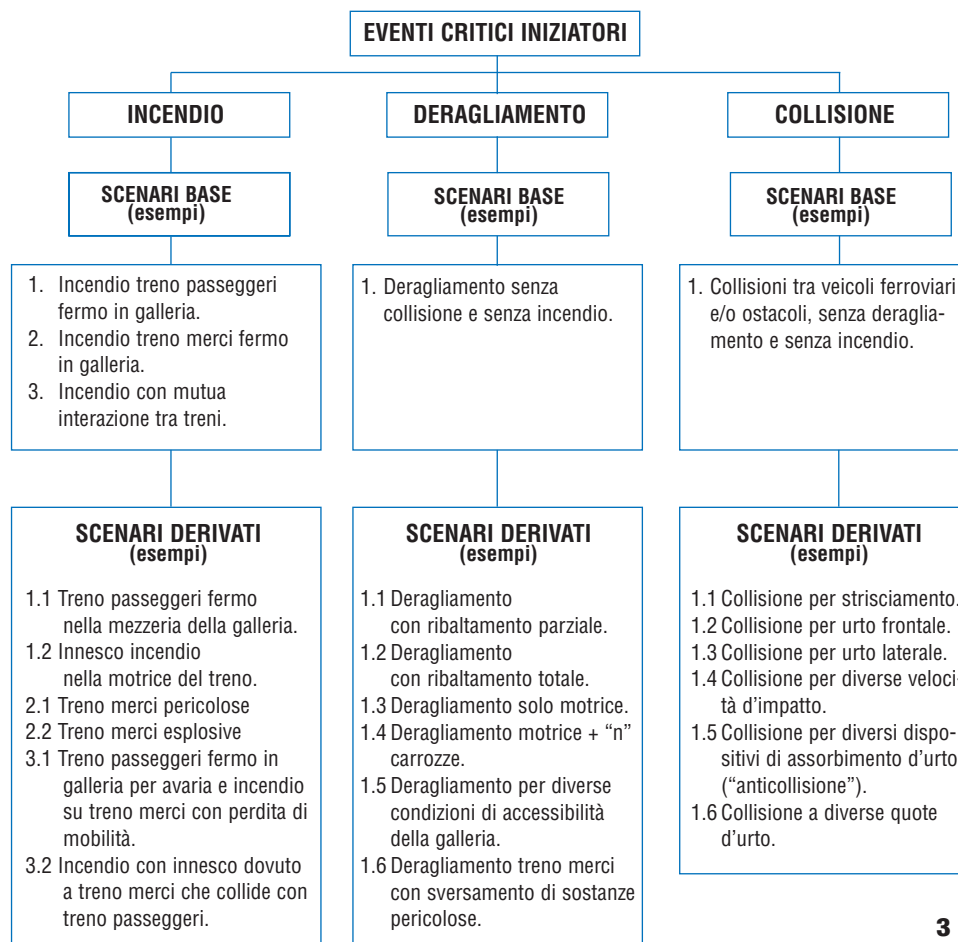
Nel caso dell'analisi di rischio estesa, invece, il Decreto non fornisce criteri specifici e dettagliati su come svolgere l'analisi stessa, limitandosi ad illustrare uno schema operativo del tutto generale (fig. 2), che non garantisce uniformità di applicazione ed è anzi suscettibile di molteplici interpretazioni. In particolare, per l'analisi delle conseguenze, in analogia all'analisi di rischio base, andrebbero definiti opportuni modelli deterministici (con i conseguenti indicatori di danno) per lo studio degli scenari incidentali, per i quali invece è lasciata ampia libertà nella loro formulazione al soggetto che esegue l'analisi di rischio.

Non sfugge infatti, che nell'impossibilità di ottenere affidabili funzioni di distribuzione di probabilità delle conseguenze connesse agli eventi critici considerati (incendio, deragliamento, collisione) a causa della pressoché totale indisponibilità ed esiguità di dati reali, si sia giustamente scelto l'approccio della caratterizzazione del rischio attraverso opportuni studi di scenario.

Anche il problema della quantificazione delle probabilità di accadimento dei singoli eventi incidentali, appare attualmente oltremodo critico; ciò a causa della frammentarietà e della scarsità dei dati di input necessari all'attivazione della procedura, i quali dovrebbero essere dedotti dai report periodici sullo stato della sicurezza delle gallerie ferroviarie che il gestore delle infrastrutture ha l'obbligo di produrre. Questi dati, ad oggi, evidenziano bassi livelli di significatività, rappresentatività e precisione statistica a causa della incompletezza e parzialità dovuta al sistema di raccolta e gestione dati finora adottato; per essi, inoltre, non è garantita una reale e completa fruibilità essendo di proprietà del gestore. È pertanto auspicabile che tali dati vengano svincolati dal segreto aziendale e trasmessi periodicamente al Ministero competente così come previsto dallo stesso Decreto.

Tutto ciò induce a ritenere particolarmente urgente da parte del Ministero competente, cui è affidato tra l'altro il compito di vigilanza sulla corretta ed univoca applicazione a livello nazionale della metodologia analitica di valutazione del rischio, l'emanazione di apposite linee guida sulla corretta redazione dell'analisi di ri-

INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI INCIDENTALI RILEVANTI DI PROGETTO



3

schio; ciò garantirebbe un modo di agire univoco ed immediatamente applicativo nelle diverse fasi dell'analisi: dal trattamento dei dati disponibili ai criteri di validazione finale degli output ottenuti.

PROPOSTA DI CRITERI PER LO STUDIO DEGLI SCENARI INCIDENTALI NELL'ANALISI DI RISCHIO ESTESA (ARE)

Nel seguito viene indicata una procedura, coerente con quanto stabilito nell'Annesso A al Decreto e da implementare nell'ambito dell'ARE, al fine di determinare la magnitudo delle conseguenze derivante dai possibili scenari incidentali conseguenti all'accadimento dei tre eventi critici iniziatori individuati dallo stesso testo normativo: incendio, deragliamento, collisione.

Il metodo proposto prevede l'utilizzo di modelli automatici di simulazione numerica per lo studio degli scenari incidentali di progetto e delle relative condizioni di esodo: attraverso la sperimentazione virtuale, quale strumento predittivo del reale, risulta possibile determinare lo sviluppo spazio-temporale del fenomeno in studio e le relative condizioni finali raggiunte. Tali modelli, si basano su relazioni matematiche di tipo deterministico derivanti da esperienze di laboratorio o in vera grandezza: da ciò deriva la necessità di un loro attento utilizzo in relazione ai limiti intrinseci legati alle osservazioni che hanno condotto alla definizione degli algoritmi di calcolo ed al grado di precisione perseguibile in funzione della discretizzazione adottata per il problema continuo. Si introducono a seguire, i diversi passi della procedura in oggetto.

1° step) Individuazione degli scenari incidentali rilevanti di progetto

Preliminarmente per ogni evento critico iniziatore, tra tutti i possibili scenari incidentali, andranno definiti, come appresso specificato, gli scenari incidentali rilevanti di progetto:

- uno o più scenari base o di riferimento;
 - una serie di scenari derivati ottenuti da quello base a seguito della variazione dei parametri caratteristici dello stesso (scenari estremi ma realistici, massimizzanti i danni).
- Tali scenari andranno individuati in base alle prescrizioni normative, agli obiettivi degli stakeholder, all'esperienza del team di progetto, ai dati statistici disponibili ed alle stime della probabilità di accadimento (albero degli eventi) da condurre in parallelo per la determinazione finale del rischio connesso. Si precisa inoltre che gli scenari incidentali rilevanti

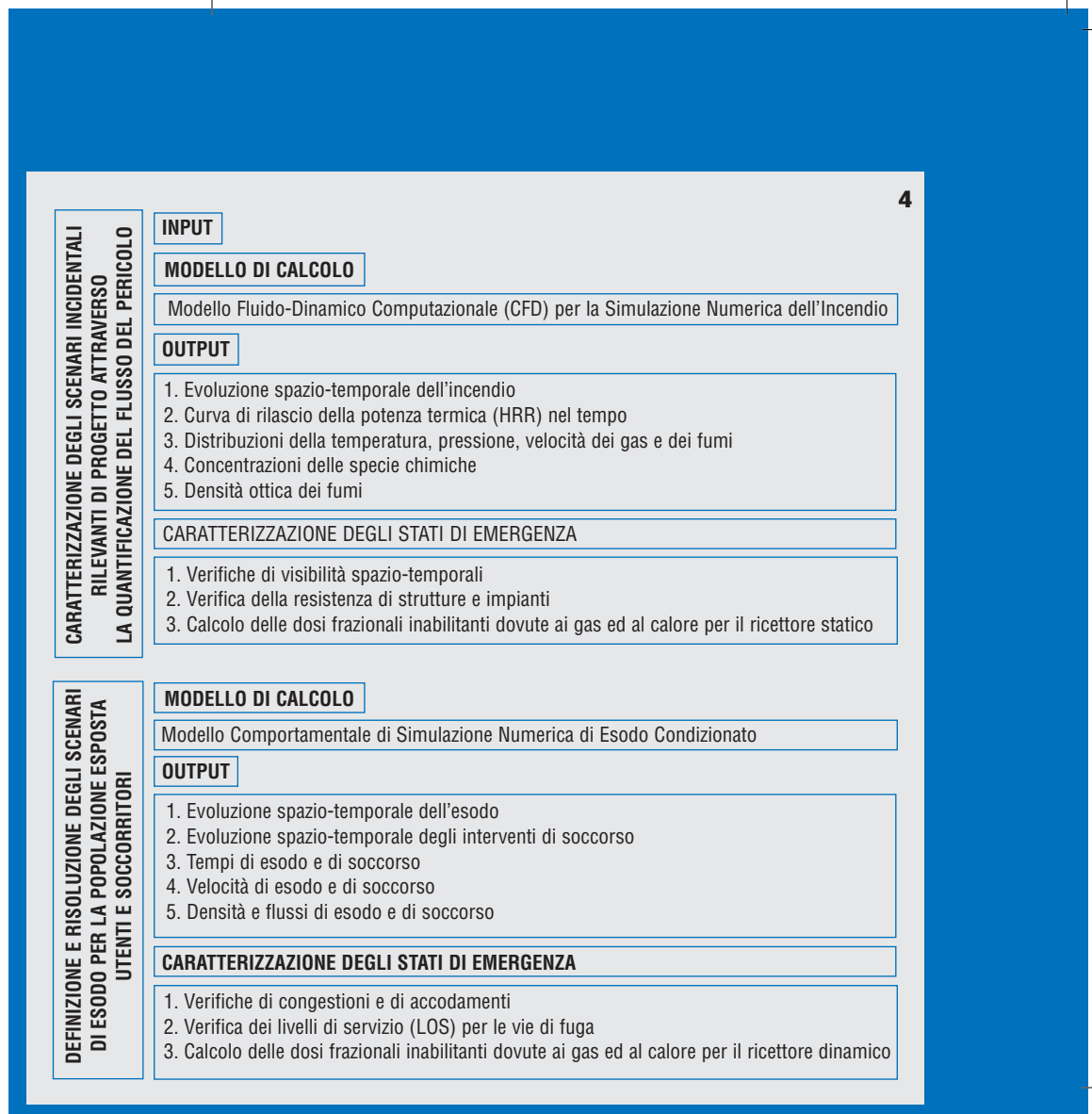
di progetto devono risultare tra loro mutuamente disgiunti e dunque incompatibili, in modo che il rischio complessivo per il sistema galleria sia computabile come somma dei rischi connessi ai singoli scenari (fig. 3).

2° step) Caratterizzazione degli scenari incidentali rilevanti di progetto attraverso la quantificazione del flusso del pericolo

Per ogni scenario incidentale rilevante di progetto, andranno definiti i dati di input relativi allo specifico scenario incidentale ed a ciascun componente del sistema galleria. L'utilizzo di un opportuno strumento di calcolo numerico, consente di ottenere, come risultato della simulazione, gli output desiderati per la caratterizzazione degli stati di emergenza, ovvero del "microclima" interno alla galleria (figg. 4, 5 e 6).

3° step) Definizione e risoluzione degli scenari di esodo per la popolazione esposta (utenti e soccorritori)

Utilizzando gli output del 2° step come input per un



4. Step 2, 3 per scenari incidentali rilevanti di progetto dovuti ad incendio

5. Step 2, 3 per scenari incidentali rilevanti di progetto dovuti a deragliamenti

5

INPUT

1. GALLERIA: caratteristiche architettoniche e strutturali della galleria (*lunghezza, sezione trasversale, tipologia costruttiva e funzionale, caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali*), caratteristiche strutturali, compositive e costruttive della linea (tracciato plano-altimetrico, deviatori, dotazioni impiantistiche, armamento, massicciata, piattaforma).
2. TRENO: energia potenziale e cinetica dei veicoli e delle merci trasportate (*caratteristiche geometriche, fisico-meccaniche e prestazionali*), sistemi di stabilizzazione trasversale (*smorzatori di oscillazioni pendolari, molle a balestra, molle ad elica*), caratteristiche dei convogli (*lunghezza, composizione, capacità di trasporto e fattore di riempimento, vie di fuga a bordo treno, uscite*), flusso di traffico (*volume, tipologia, regimi di traffico, orari d'esercizio*), condizioni di marcia e velocità di percorrenza.
3. AMBIENTE: condizioni meteorologiche interne (*temperatura e umidità*).
4. MISURE DI SICUREZZA: tipologia e caratteristiche di funzionamento delle misure di sicurezza presenti (infrastrutturali, impiantistiche, a bordo treno ed in particolare: configurazione delle vie di fuga a bordo treno e in galleria, delle uscite dal treno e dalla galleria, sistema di illuminazione d'emergenza), accessibilità della galleria e sistemi di gestione dell'emergenza (*viabilità esterna, elisuperficie, piazzale di emergenza ed aree di triage, localizzazione delle squadre di soccorso, procedure operative e modalità di evacuazione, dati sulle esercitazioni condotte, piani di emergenza, informazioni agli utenti*).
5. UOMO: iniziale distribuzione spaziale degli utenti e loro attività, distribuzione di età, genere, condizioni fisiche, distribuzioni dei tempi di premovimento e delle velocità di movimento in differenti situazioni standard.
6. DERAGLIAMENTO: caratteristiche del complesso ruota-rotaia (*usura di bordino e rotaia, coefficiente di attrito ruota-rotaia, profilo di bordino e rotaia*), caratteristiche e stato di manutenzione della linea (*scartamento, sgembi, sopraelevazione, giunzioni tra rotaie, deviatori, armamento, massicciata, piattaforma*).
7. MODELLO: tempo di simulazione, numero e dimensioni delle celle di discretizzazione del dominio di calcolo.

MODELLO DI CALCOLO

Modello di Simulazione Numerica della Dinamica Trasversale e di Eventi di Crash per i convogli ferroviari

OUTPUT

1. Evoluzione spazio-temporale del deragliamenti
2. Accelerazioni e decelerazioni trasversali indotte sugli utenti
3. Accelerazioni e decelerazioni longitudinali indotte sugli utenti
4. Configurazione spazio-temporale del treno

CARATTERIZZAZIONE DEGLI STATI DI EMERGENZA

1. Verifiche sui limiti fisiologici di accelerazioni e decelerazioni indotte sugli utenti
2. Verifiche sui limiti geometrici d'impatto sulle sagome delle opere fisse in galleria (compresi i piedritti)
3. Verifica di resistenza di strutture, impianti e materiale rotabile

MODELLO DI CALCOLO

Modello Comportamentale di Simulazione Numerica di Esodo Condizionato

OUTPUT

1. Evoluzione spazio-temporale dell'esodo
2. Evoluzione spazio-temporale degli interventi di soccorso
3. Tempi di esodo e di soccorso
4. Velocità di esodo e di soccorso
5. Densità e flussi di esodo e di soccorso

CARATTERIZZAZIONE DEGLI STATI DI EMERGENZA

1. Verifiche di congestioni e di accodamenti
2. Verifica dei livelli di servizio (LOS) per le vie di fuga
3. Verifica della presenza di ostacoli sulle vie di fuga a causa del deragliamenti

CARATTERIZZAZIONE DEGLI SCENARI INCIDENTALI RILEVANTI DI PROGETTO ATTRAVERSO LA QUANTIFICAZIONE DEL FLUSSO DEL PERICOLO

DEFINIZIONE E RISOLUZIONE DEGLI SCENARI DI ESODO PER LA POPOLAZIONE ESPOSTA A UTENTI E SOCCORRITORI

opportuno modello automatico di simulazione dell'esodo, è possibile ottenere come output i parametri caratteristici dell'esodo degli utenti (autosoccorso) e dei soccorritori (interventi di soccorso). L'autosoccorso risulta determinante negli scenari incidentali dovuti all'incendio, mentre gli interventi di soccorso lo sono per gli scenari incidentali causati da collisioni e deragliamenti (figg. 4, 5 e 6).

4° step) Caratterizzazione degli stati di fine emergenza

Individuazione dei danni ai ricettori sensibili: computo del numero di morti, feriti e dei danni alla struttura, agli impianti, ai veicoli, all'ambiente (inquinamenti e mancato esercizio) per ogni evento critico iniziatore.

Calcolo di indicatori sintetici di danno parziale per i

6

INPUT

1. GALLERIA: caratteristiche architettoniche e strutturali della galleria (*lunghezza, sezione trasversale, tipologia costruttiva e funzionale, caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali*), caratteristiche strutturali, compositive e costruttive della linea (*tracciato plano-altimetrico, dotazioni impiantistiche, armamento, massicciata, piattaforma*).
2. TRENO: energia potenziale e cinetica dei veicoli e delle merci trasportate (*caratteristiche geometriche, fisico-meccaniche e prestazionali*), dispositivi di assorbimento d'urto anticollisione (*respingenti, zone frontali e laterali, deformabilità e rigidità, capacità di assorbimento d'urto*), caratteristiche dei convogli (*lunghezza, composizione, capacità di trasporto e fattore di riempimento, vie di fuga a bordo treno, uscite*), flusso di traffico (*volume, tipologia, regimi di traffico, orari d'esercizio*), condizioni di marcia e velocità di percorrenza, sistemi di frenatura.
3. AMBIENTE: condizioni meteorologiche interne (*temperatura e umidità*).
4. MISURE DI SICUREZZA: tipologia e caratteristiche di funzionamento delle misure di sicurezza presenti (*infrastrutturali, impiantistiche, a bordo treno ed in particolare: dispositivi di sicurezza passiva agli urti a bordo treno, configurazione delle vie di fuga a bordo treno e in galleria, delle uscite dal treno e dalla galleria, sistema di illuminazione d'emergenza*), accessibilità della galleria e sistemi di gestione dell'emergenza (*viabilità esterna, elisuperficie, piazzale di emergenza ed aree di triage, localizzazione delle squadre di soccorso, procedure operative e modalità di evacuazione, dati sulle esercitazioni condotte, piani di emergenza, informazioni agli utenti*).
5. UOMO: iniziale distribuzione spaziale degli utenti e loro attività, distribuzione di età, genere, condizioni fisiche, distribuzioni dei tempi di premovimento e delle velocità di movimento in differenti situazioni standard.
6. COLLISIONE: velocità relativa d'impatto, coefficiente di restituzione elastica di ogni singolo materiale, caratteristiche del complesso ruota-rotaia (*aderenza, stato di manutenzione*), sistemi di controllo della circolazione e segnalamento (*distanziamento, segnali in linea*).
7. MODELLO: tempo di simulazione, numero e dimensioni delle celle di discretizzazione del dominio di calcolo.

MODELLO DI CALCOLO

Modello di Simulazione Numerica della Dinamica Longitudinale e di Eventi di Crash per i convogli ferroviari

OUTPUT

1. Evoluzione spazio-temporale della collisione
2. Accelerazioni e decelerazioni indotte sugli utenti
3. Energia sviluppata nell'urto: energia assorbita attraverso dissipazione in deformazione e calore, energia ceduta
4. Sforzo di schiacciamento dinamico, spostamenti e deformazioni
5. Capacità frenante: tempi e spazi di arresto, configurazioni spazio-temporali del treno

CARATTERIZZAZIONE DEGLI STATI DI EMERGENZA

1. Verifiche sui limiti fisiologici di accelerazioni e decelerazioni indotte sugli utenti
2. Verifiche all'espulsione degli utenti dal treno, all'urto con componenti interni (bagagli, arredi, pavimento)
3. Verifica di resistenza di strutture, impianti e materiale rotabile (collasso, compenetrazione, accavallamento)

MODELLO DI CALCOLO

Modello Comportamentale di Simulazione Numerica di Esodo Condizionato

OUTPUT

1. Evoluzione spazio-temporale dell'esodo
2. Evoluzione spazio-temporale degli interventi di soccorso
3. Tempi di esodo e di soccorso
4. Velocità di esodo e di soccorso
5. Densità e flussi di esodo e di soccorso

CARATTERIZZAZIONE DEGLI STATI DI EMERGENZA

1. Verifiche di congestioni e di accodamenti
2. Verifica dei livelli di servizio (LOS) per le vie di fuga
3. Verifica della presenza di ostacoli sulle vie di fuga a causa della collisione

CARATTERIZZAZIONE DEGLI SCENARI INCIDENTALI RILEVANTI DI PROGETTO ATTRAVERSO LA QUANTIFICAZIONE DEL FLUSSO DEL PERICOLO

DEFINIZIONE E RISOLUZIONE DEGLI SCENARI DI ESODO PER LA POPOLAZIONE ESPOSTA UTENTI E SOCCORRITORI

6. Step 2, 3 per scenari incidentali rilevanti di progetto dovuti a collisione

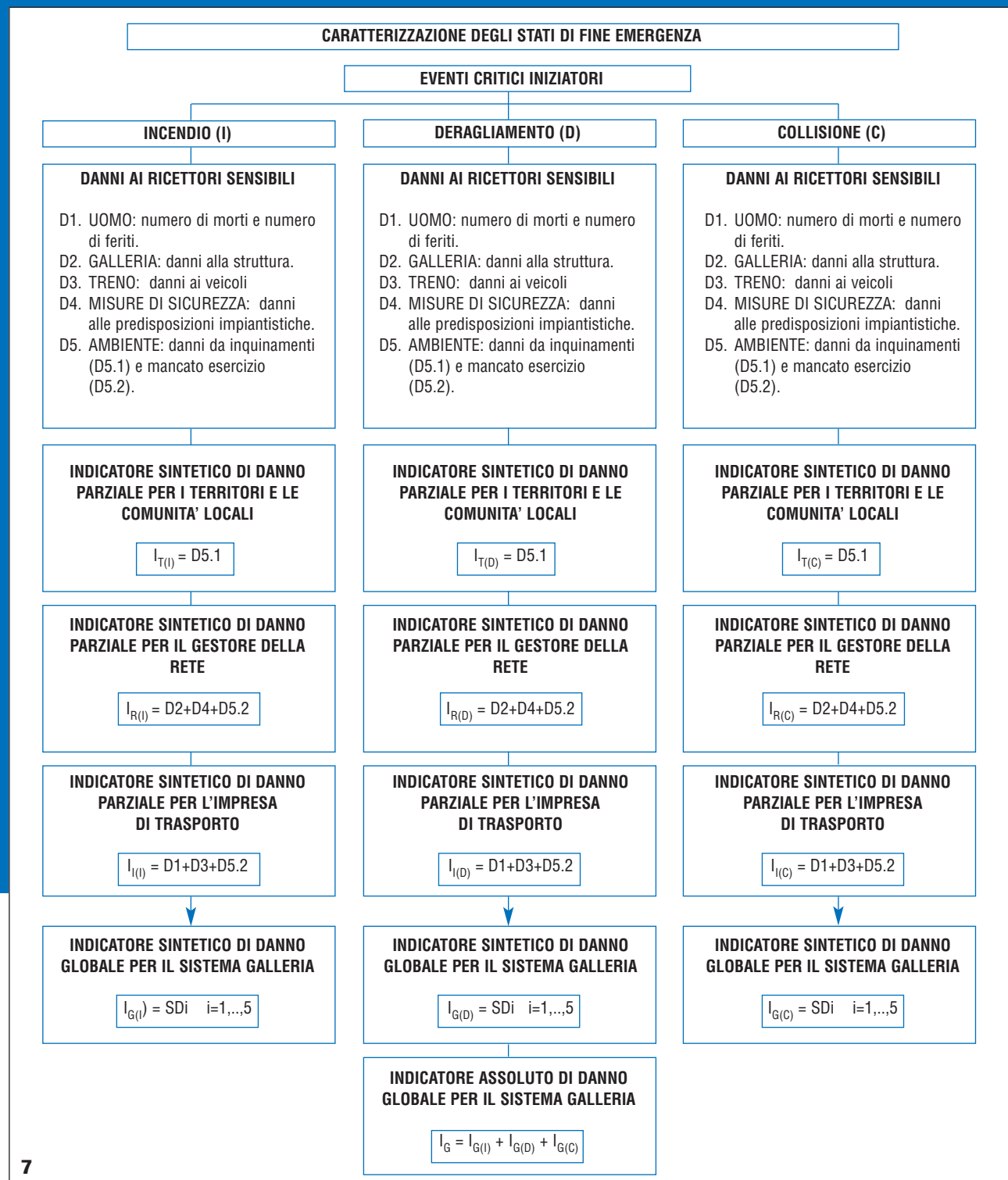
territori e le comunità locali ($IT_{(E)}$), per il gestore della rete ($IR_{(E)}$), per l'impresa di trasporto ($II_{(E)}$), per ogni evento critico iniziatore.

Calcolo di un indicatore sintetico di danno globale per il sistema galleria per ogni evento critico iniziatore ($IG_{(E)}$). Calcolo dell'indicatore assoluto di danno globale per il sistema galleria (I_G) come somma dei singoli $IG_{(E)}$ (fig. 7).

CONCLUSIONI

Il Decreto Ministeriale sulla "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" rappresenta uno strumento normativo che, per la prima volta in Italia, introduce regole e criteri operativi per la stima delle condizioni di rischio presenti nei tunnel ferroviari. La revisione critica del testo di legge esposta nella prima parte del presente contributo è stata mossa dall'esigenza di mettere in luce quegli aspetti della nor-

7. Step 4:
caratterizzazione
degli stati di fine
emergenza



ma che, caratterizzati da ambiguità e da qualche incongruenza, potessero essere razionalmente revisionati ed adeguatamente corretti. Nella consapevolezza, poi, che ad ogni processo di revisione critica debba sempre seguire una fase propositiva, si è elaborata una procedura a supporto dell'analisi di rischio estesa, per lo studio degli scenari incidentali di progetto e delle condizioni di esodo associate. L'obiettivo futuro del presente gruppo

di ricerca sarà quello di pervenire, attraverso l'apporto della metodologia proposta, ad una caratterizzazione pre-stazionale, in termini di costo e di efficacia nella riduzione del rischio, delle principali misure di sicurezza (strutturali, impiantistiche ed operative) relative alle gallerie ferroviarie, al fine di ottimizzare la pianificazione dei progetti nuovi o di adeguamento, tenendo conto del peso relativo di ciascuna delle salvaguardie adottabili. ■