

# CONVEGNO NAZIONALE AIPCR

ROMA 2014



QUADERNI AIPCR

TEMA 1– GESTIONE E PERFORMANCE

## **GESTIONE DEI RISCHI NELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO**

Quaderno a cura del Comitato Tecnico 1.5

Presidente Prof. Maurizio Crispino

Codice ISBN: 978-88-99161-09-5  
Codice ISBN-A: 10.978.8899161/095

## Indice

<input type="checkbox"/> PREFAZIONE a cura del Prof. Ing. M. Crispino (Presidente CT 1.5)	pag.1
<b>Capitolo 1</b>	
<input type="checkbox"/> LA VALUTAZIONE IN FASE DI PROGETTO DEL RISCHIO DI SISTEMI INFRASTRUTTURALI COMPLESSI (Prof. Ing. L. Domenichini, Ing. F. J. Caputo)	pag.2
<b>Capitolo 2</b>	
<input type="checkbox"/> VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO PER LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO (Ing. L. Pardi)	pag.14
<b>Capitolo 3</b>	
<input type="checkbox"/> VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO DELLA RETE STRADALE PER LA GESTIONE DELLE EMERGENZE (Prof. Ing. S. Cafiso, Ing. C. D'Agostino, Ing. G. Pappalardo)	pag.30
<b>Capitolo 4</b>	
<input type="checkbox"/> RISCHIO SISMICO E RESILIENZA DI STRUTTURE SOGGETTE A DEGRADO (Prof. Ing. F. Biondini, Ing. A. Titi)	pag.38
<b>Capitolo 5</b>	
<input type="checkbox"/> RISCHIO IDROGEOLOGICO LUNGO LE STRADE DELLA REGIONE LOMBARDIA (Dott.ssa C. Secchi, Dott. M. Ceriani, Arch. C. Melzi, Prof.ssa L. Scesi)	pag.48
<b>Capitolo 6</b>	
<input type="checkbox"/> LA GESTIONE DEI TRASPORTI IN EMERGENZA: ATTIVITÀ, PRODOTTI E RISULTATI DELL'ESERCITAZIONE NAZIONALE DI PROTEZIONE CIVILE IN VALTELLINA (Ing. L. Studer, Ing. G. Marchionni, Ing. F. Borghetti, Ing. P. Gandini, Prof. M. Ponti, Prof. R. Maja)	pag.55

# PREFAZIONE

## Comitato Tecnico 1.5 - “Gestione dei Rischi”

Il presente Quaderno riporta in articoli scientifici, cui si rimanda, i risultati conseguiti da componenti del Comitato Tecnico 1.5 AIPCR “Gestione dei Rischi nelle Infrastrutture di Trasporto” in attività svoltesi durante il quadriennio 2012-2015.

Il comitato, composto da 28 membri esperti e presieduto dallo scrivente Prof. Maurizio Crispino del Politecnico di Milano, ha costituito un'importante occasione di dialogo tra tecnici, gestori della rete infrastrutturale nazionale e docenti universitari. Il mutuo scambio di conoscenze tecniche, manageriali, teoriche ed applicative sul tema della valutazione e gestione del rischio nelle infrastrutture di trasporto si è svolto durante periodici e molteplici incontri nel corso del quadriennio di attività.

Gli incontri hanno avuto cadenza circa trimestrale e si sono svolti presso il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, poli universitari (Politecnico di Milano) ed enti gestori delle infrastrutture (Autostrade per l'Italia, Strada dei Parchi, ecc.), ciò al fine di legare quanto più possibile le conoscenze e le esperienze provenienti dai diversi ambiti di appartenenza dei membri del Comitato. Le riunioni sono state anche caratterizzate da interessanti visite tecniche.

Per generare inoltre un confronto ed uno scambio anche di ambito internazionale, in occasione del meeting dell'omologo Comitato internazionale TC 1.5 ospitato a Milano nel maggio 2014, il Comitato nazionale ha organizzato una giornata di studio - a carattere internazionale - presso il Politecnico di Milano dal titolo “International Workshop on Road Risk Management” che ha visto una forte partecipazione di pubblico sia nazionale che straniero, afferente ad Università, Enti gestori di strade ed aeroporti, istituzioni pubbliche (Comuni, Province e Regioni), corpi dello stato (Vigili del Fuoco e Protezione Civile), concessionarie autostradali e imprese del settore.

Le attività del Comitato sono state poi anche rivolte al supporto dell'omologo comitato internazionale, PIARC Technical Committee 1.5, partecipando in modo attivo e propositivo alla preparazione e diffusione di sondaggi internazionali sulle tematiche inerenti la gestione del rischio, all'organizzazione di seminari di vario tipo ed alla redazione del Report internazionale di fine mandato del Comitato.

Al termine del quadriennio di attività, lo scrivente Presidente desidera vivamente ringraziare tutti i componenti del Comitato per la proficua attività svolta.

**Prof. Ing. Maurizio Crispino**  
Presidente del Comitato Tecnico AIPCR 1.5



# LA VALUTAZIONE IN FASE DI PROGETTO DEL RISCHIO DI SISTEMI INFRASTRUTTURALI COMPLESSI

Prof. Ing. L. Domenichini<sup>1</sup>, Ing. F. J. Caputo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento Ingegneria Civile – Università di Firenze

<sup>2</sup> Libero professionista

## **Introduzione**

Nella gestione di un sistema infrastrutturale ogni decisione operativa deve essere assunta considerando un insieme di informazioni che tiene conto delle condizioni correnti di deflusso del traffico all'interno della rete, del funzionamento dell'infrastruttura e delle sue attrezzature, delle condizioni atmosferiche e dell'evoluzione nel breve-medio termine di queste condizioni, oltre che della sicurezza della circolazione di mezzi, persone e beni all'interno del sistema e di considerazioni ambientali e socio-economiche.

Anche l'evoluzione attesa nei prossimi anni dei sistemi di informazione all'utenza contempla la necessità di introdurre nelle valutazioni degli itinerari suggeriti e del tempo di viaggio la valutazione previsionale delle condizioni di funzionamento del sistema, tenuto conto anche della probabilità che nelle diverse opzioni possibili gestionali alternative si presentino eventi in grado di degradare le prestazioni del sistema, fino a bloccarlo, nel caso di condizioni ambientali estreme o di gravi incidenti, e del conseguente livello di rischio che caratterizza ciascuna delle diverse opzioni.

Il programma strategico di ricerca e sviluppo avviato di recente in Europa sotto la sigla Horizon 2020 sottolinea la necessità di sviluppare soluzioni innovative per la gestione cooperativa di sistemi infrastrutturali interconnessi e multi-modalità e tecnologie abilitanti basate su sistemi avanzati di comunicazione e gestione delle informazioni con l'obiettivo di promuovere una mobilità intelligente e sostenibile, che mantenga prioritaria l'esigenza di sicurezza degli utenti e la loro pronta messa in allerta in caso di potenziali situazioni di rischio.

La problematica rientra all'interno del tema generale della gestione del rischio operativo di un sistema infrastrutturale, oggetto di una recente pubblicazione dall'AIPCR [PIARC TC C.3, 2012] e la cui valutazione è al centro del Sistema di Gestione della Sicurezza (Safety Management System – SMS) adottato dalla UK

Highway Agency mutuando tecniche descritte in normative di differente ambito di applicazione.

L'SMS di un'infrastruttura costituisce una attività da sviluppare a tutti i livelli di gestione di un sistema infrastrutturale e comporta, tra l'altro, la valutazione del rischio operativo al momento del progetto di una nuova infrastruttura o dell'adeguamento di una strada esistente.

Il presente lavoro intende offrire un contributo metodologico di tipo sistemico alla valutazione del rischio operativo di sistemi autostradali complessi. L'approccio proposto è particolarmente rivolto al rischio degli utenti dell'infrastruttura per danni diretti fisici o socio-economici, ma potrebbe essere esteso all'occorrenza ad altre tipologie di danno (ad es. property damages o danni ambientali).

Un accenno, infine, viene fatto all'architettura informatica all'interno della quale il rischio operativo di una infrastruttura può essere opportunamente gestito.

## **Definizione di un sistema di gestione del rischio**

L'analisi delle condizioni di sicurezza e di rischio di molteplici situazioni infrastrutturali presentanti particolari caratteristiche geometriche o compositive (ad esempio: presenza di estesi tratti in galleria o sviluppo del tracciato su opere d'arte di rilievo, presenza di accentuate pendenze longitudinali o di flussi di traffico ingenti) o complesse modalità di inserimento nella rete stradale di appartenenza o, infine, complesse condizioni di interazione con altri sistemi infrastrutturali (linee ferroviarie lente o ad alta velocità, elettrodotti importanti o installazioni di importanza strategica) ha consentito di concepire, sviluppare ed applicare un approccio sistemico alla gestione del rischio attraverso il quale può essere tracciato il profilo di rischio complessivo del sistema e possono essere individuate le procedure o gli interventi in grado di minimizzare le conseguenze di interruzioni più o meno prolungate del funzionamento complessivo del sistema.

Il processo messo a punto è rappresentato dal diagramma di flusso riportato in Figura 1.

Il processo inizia dall'analisi del sistema e degli elementi infrastrutturali, di segnaletica, di gestione del traffico e impiantistici che lo compongono e procede sviluppando in parallelo l'analisi del rischio e l'analisi della qualità del servizio offerto dal sistema in condizioni operative normali e durante lo sviluppo di situazioni d'emergenza, tenendo in debito conto le interazioni esistenti tra questi due temi.

L'analisi si sviluppa iterativamente fintanto che non sia verificato il rispetto di definite condizioni limite di accettabilità sia del livello di rischio sia del livello di servizio offerto dall'infrastruttura.

Una volta verificato il rispetto delle condizioni di accettabilità imposte, si procede all'implementazione del sistema con le misure integrative di cui è stata riconosciuta l'utilità ed efficacia nel corso del processo

di analisi, potendo così procedere con la definizione del sistema di gestione e delle procedure di emergenza.

### Operational risk analysis

La "operational risk analysis" ha lo scopo di valutare il rischio del sistema infrastrutturale in condizioni di esercizio normali. I principali "step" di questa fase di analisi consistono in:

- Definizione degli scenari di rischio da considerare (definizione degli hazard ed identificazione degli hazard rilevanti);
- Stima della frequenza di accadimento degli scenari di rischio (frequenza di accadimento dell'hazard e probabilità di incidente e di scenario dall'hazard considerato);
- Valutazione delle conseguenze associate agli scenari di rischio (in termini di numero di vittime di ogni singolo evento).

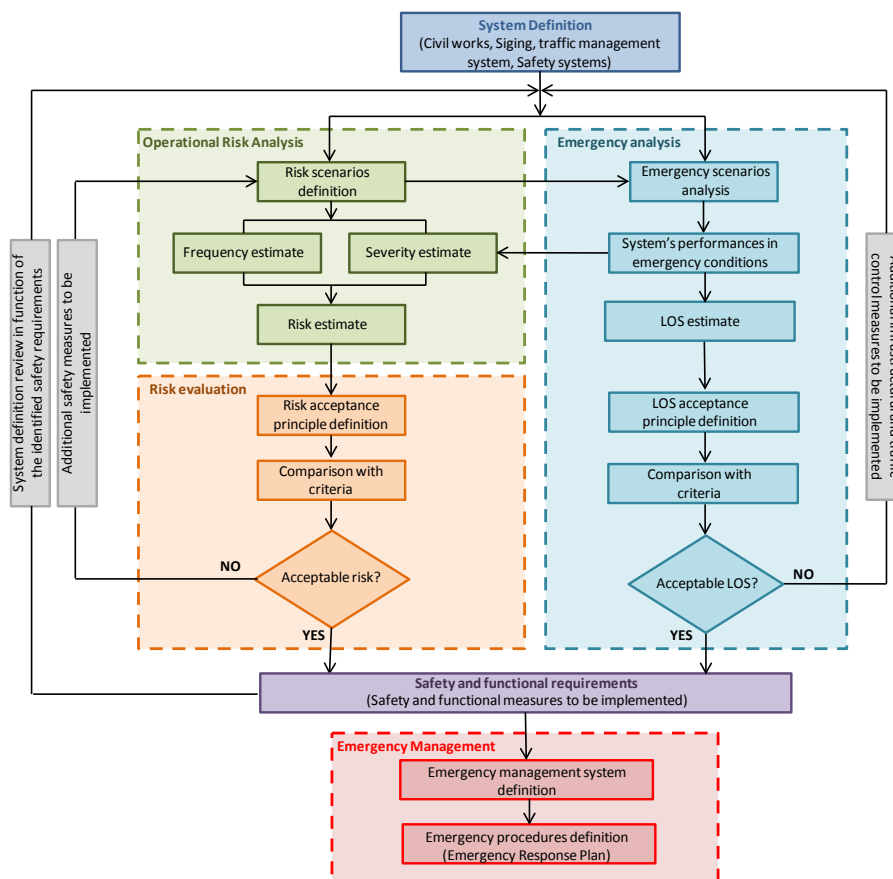


Figura 1: Diagramma di flusso del processo di definizione del sistema di gestione del rischio

Per un sistema stradale gli eventi di maggior interesse, che possono generare più comunemente condizioni critiche di esercizio ed eventuali vittime, sono gli eventi

di guasto ai veicoli, gli incidenti, lo sversamento di merci pericolose, l'innescò d'incendio, particolarmente nel caso di sistemi con presenza significativa di tratte in

galleria o esposti a condizioni climatiche ed atmosferiche critiche. Gli eventi considerati si sommano, in una logica complessiva di Risk Management, agli eventi di guasto alle opere ed agli impianti di entità tale da poter indurre un possibile danno rilevante (prevalentemente sulle condizioni di esercizio dell'opera) caratterizzati però da probabilità di accadimento inferiori.

Per ognuno degli eventi pericolosi individuati, e degli scenari di rischio che questi possono generare in relazione alla loro localizzazione nel sistema in esame (es. in galleria, su viadotto, su rampa a singola corsia di marcia, etc.), è necessario valutarne il rischio mediante stima della frequenza di accadimento e della gravità delle sue conseguenze.

La stima della frequenza di accadimento dovrebbe essere definita tenendo conto che ogni tracciato stradale, in relazione alle sue caratteristiche costruttive ed al traffico che lo percorre, ha una sua propria fisionomia nei riguardi del rischio per l'utenza che lo attraversa.

La probabilità di accadimento degli incidenti è cioè direttamente legata al volume di traffico che lo impegna, al suo sviluppo, alle caratteristiche del suo andamento planimetrico ed altimetrico, all'organizzazione della sua piattaforma stradale, alla presenza, frequenza ed organizzazione delle intersezioni, al regime di circolazione adottato, alla qualità della circolazione (esprimibile in termini di livello di servizio), alle dotazioni impiantistiche presenti (si pensi all'illuminazione della strada o alla presenza di sistemi di controllo e sanzionamento delle infrazioni ai limiti di velocità) ed ai sistemi di gestione e di controllo del traffico e delle velocità di cui l'infrastruttura è dotata.

Le procedure possibili per definire la probabilità di accadimento degli incidenti che possono avvenire in una infrastruttura stradale sono di tre tipi:

- a. analisi dei dati storici di letteratura relativi all'incidentalità che caratterizza il tipo di strada in esame. L'analisi in questo caso consente di definire un quadro di pericolosità avente una valenza generale e non consente di valutare l'influenza che le specifiche caratteristiche dell'opera in esame hanno sull'incidentalità;
- b. analisi storica dell'incidentalità accaduta negli

ultimi 3 – 5 anni nell'infrastruttura in esame. In questo caso l'analisi consente di tener conto dell'influenza che le specifiche caratteristiche della strada in esame hanno sulla sicurezza della circolazione e quindi sul numero di incidenti che in essa accadono;

- c. utilizzo di modelli previsionali di incidentalità. Questi modelli consentono di valutare la sicurezza di una infrastruttura in progetto o gli effetti sulla sicurezza di una modifica delle caratteristiche fisiche, funzionali o delle dotazioni impiantistiche di una infrastruttura esistente mettendo in relazione le caratteristiche progettuali dell'intervento con il numero di incidenti potenzialmente attesi.

In sistemi già in esercizio in cui siano disponibili dati storici di incidentalità si può adottare il criterio di cui al punto b), o meglio un approccio combinato delle procedure b) e c) secondo la tecnica di stima del tipo empirico bayesiano, capace di depurare il dato storico dalla presenza di possibili effetti distorsivi (quali ad esempio il fenomeno della regressione alla media).

Nel caso di opere in progetto, la stima può avvenire mediante modelli predittivi; in questo caso è importante la scelta di modelli in grado di rappresentare correttamente il sistema in esame, che consentano di tener conto dei diversi fattori che possono influenzare l'incidentalità e calibrati sulla realtà specifica analizzata. L'impostazione dell'analisi probabilistica mirata a valutare l'esposizione al rischio del sistema esaminato segue l'approccio che è stato codificato nell'Highway Safety Manual (HSM) pubblicato di recente negli USA [AASHTO, 2010] e può essere espresso mediante l'algoritmo generale riportato di seguito:

$$N_{pred,k} = N_{base,k} \cdot \left[ \prod_j CMF_{k,j} \right] \cdot c_k \quad (1)$$

$$N_{pred} = \sum_k N_{pred,k} \quad (2)$$

in cui:

$N_{pred,k}$  = numero di incidenti predetto del tipo "k" nella tratta omogenea in esame nell'unità di tempo di riferimento (un anno);

$N_{base,k}$  = numero di incidenti del tipo "k" caratteristico dell'infrastruttura "base"

nella tratta omogenea in esame nell'unità di tempo, commisurato alle caratteristiche di quest'ultima, valutato attraverso l'applicazione delle SPF;

- $CMF_j$  = fattore di modificazione del tasso d'incidentalità dovuto alla specificità  $j$  presente caratterizzante la tratta omogenea in esame;
- $k$  = rappresenta il particolare tipo di incidente  $k$ -simo;
- $j$  = rappresenta la generica specificità di tracciato (geometrica, compositiva o funzionale) che rende l'infrastruttura in esame differente, dal punto di vista della sicurezza, dall'infrastruttura "base";
- $c$  = fattore di calibrazione.

Si parte dalla stima dell'incidentalità attesa in una infrastruttura di riferimento (definita "base") appartenente alla stessa classe funzionale alla quale appartiene l'infrastruttura in esame. Le caratteristiche di incidentalità dell'infrastruttura "base" sono fornite dalle cosiddette "Funzioni di prestazioni di Sicurezza" (Safety Performance Function – SPF) sviluppate, su basi regressive, correlando il numero di incidenti occorsi su infrastrutture del tipo di quella in esame, aventi caratteristiche geometriche, funzionali e compositive note. Le specificità dell'infrastruttura in esame, definite in termini di differenze tra le caratteristiche del caso reale in esame e quelle della strada "base", vengono poi tenute in conto attraverso l'applicazione di fattori correttivi, denominati "Fattori di modificazione dell'incidentalità" (Crash Modification Factor – CMF), il cui valore è maggiore o minore dell'unità a seconda che le specifiche caratteristiche in esame inducano rispettivamente un incremento o una riduzione di pericolosità, e quindi del numero di incidenti atteso. Il risultato ottenuto nel modo sopra descritto viene infine corretto, mediante l'applicazione di un fattore di calibrazione "c", per tener conto delle possibili differenze ambientali, di standard costruttivi, di caratteristiche del parco veicolare e di comportamento alla guida dell'utenza stradale che esistono tra la realtà

presa in esame nello sviluppo delle SPF e dei CMF e la realtà specifica in esame.

Per il campo d'applicazione autostradale, non ancora considerato nella edizione corrente dell'HSM, è possibile far riferimento al modello previsionale di incidentalità autostradale presentato nel "Chapter 13 – Predictive Method for Freeways" del documento [TRB, 2013], in corso di revisione in previsione del suo inserimento nella prossima edizione del HSM. La calibrazione del modello per la sua applicazione alla rete autostradale italiana è stata sviluppata su una rete autostradale di sviluppo complessivo di 6700 km selezionando 56 sezioni di lunghezza media di circa 12.5 km per complessivi 700km [Domenichini et al., 2014].

L'analisi può essere sviluppata utilizzando anche differenti SPF capaci di rappresentare adeguatamente situazioni particolari del tracciato, quali le tratte in sotterraneo, per cui è proponibile l'uso del modello di incidentalità in galleria sviluppato dall'UPI svizzero nel 2004 [Salvisberg et al., 2004] e recentemente calibrato rispetto alla realtà delle gallerie autostradali italiane [Domenichini et al., 2012].

Per favorire una efficace interpretazione dei dati stimati in relazione alle caratteristiche geometriche e funzionali dell'infrastruttura analizzata è utile una rappresentazione in forma di diagramma itinerario (vd. Figura 2): questo tipo di diagramma dispone in parallelo la rappresentazione grafica dei dati stimati di incidentalità (esprimibili in forma di tasso di incidenti e densità di incidenti) e delle caratteristiche geometriche e funzionali del tracciato, consentendo una analisi incrociata dei dati attraverso la quale relazionare le eventuali criticità messe in evidenza dall'analisi previsionale di incidentalità alle caratteristiche dell'opera ed alle condizioni di funzionamento della stessa. Il procedimento sviluppa in sostanza, in modo interattivo, integrandolo con valutazioni quantitative, l'analisi di sicurezza a livello di progetto (Safety Audit) che il D. Lgs. 15.03.2011 n. 35 ha reso cogente per le infrastrutture appartenenti alla rete TERN.

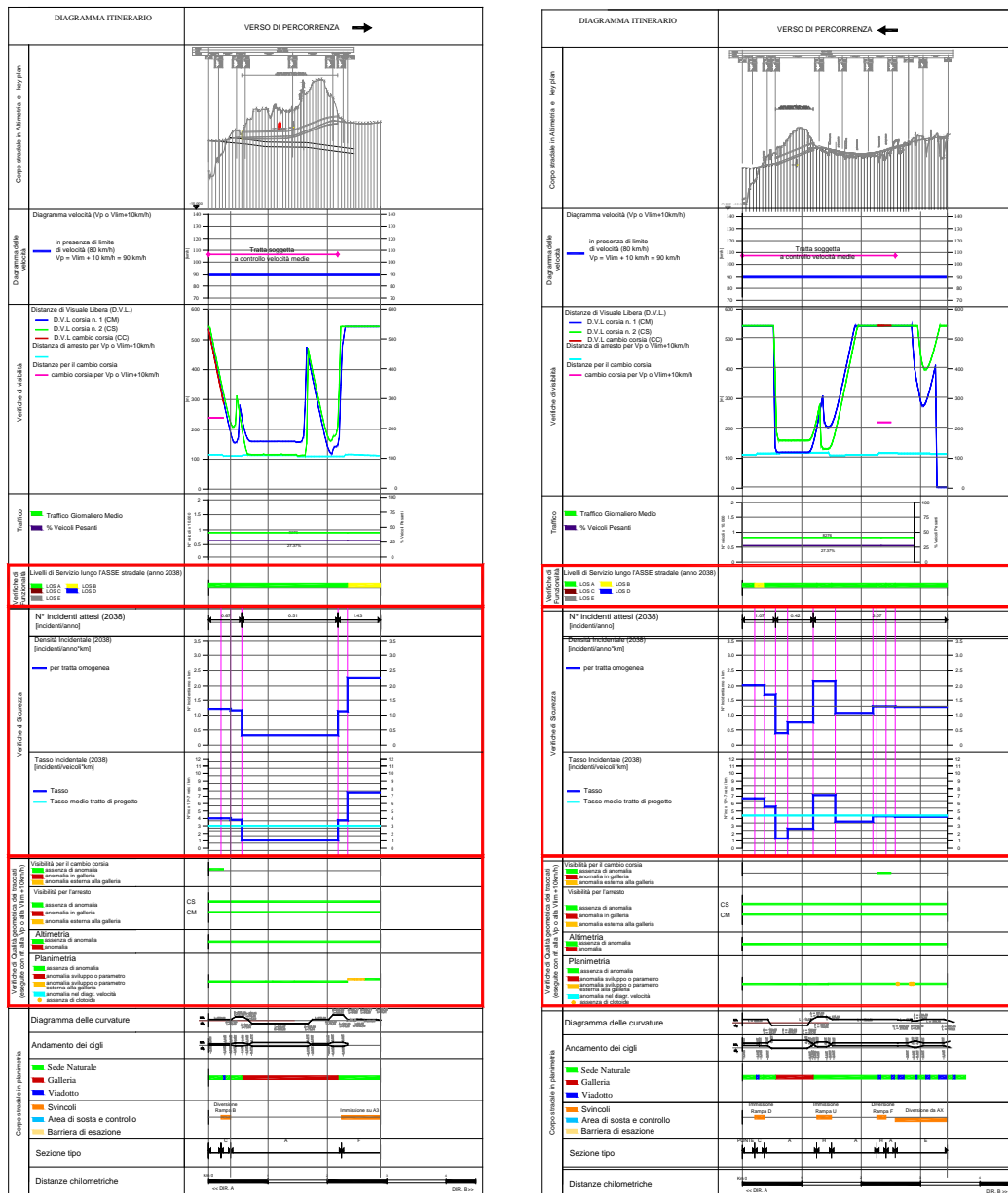


Figura 2: Rappresentazione delle caratteristiche funzionali e di sicurezza di singoli componenti del sistema su diagramma itinerario

La stima delle conseguenze degli incidenti di cui è stata valutata la frequenza di accadimento può avvenire sulla base di evidenze statistiche da casi simili oppure mediante l'applicazione di appositi algoritmi di calcolo, come comunemente avviene nel calcolo del rischio delle tratte in galleria. In questo caso sarebbe opportuno tenere conto dell'influenza che possono avere le prestazioni di esercizio dell'infrastruttura in condizioni di emergenza sulle conseguenze dell'evento, in considerazione che da queste dipende il tempo di intervento dei soccorsi e l'eventualità del possibile sviluppo di eventi secondari. Un esempio di statistica sulla gravità d'incidenti stradali è riportata in

Figura 3, con riferimento all'incidentalità sulla rete autostradale italiana nel periodo 2005-2009. Questa consente di definire la probabilità che un incidente assuma diversi livelli di gravità (numero di vittime) così da stimare il numero di vittime atteso per il periodo di analisi. Dalla statistica di Figura 3, in particolare risulta che l'incidentalità più grave (con vittime) in ambito autostradale genera nel maggior numero di casi una sola vittima (87% dei casi), e con minor probabilità 2 vittime (10% dei casi): la probabilità di avere oltre 2 vittime (fino a 6 vittime) risulta marginale (2,7%).

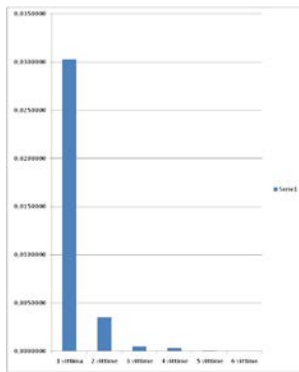


Figura 3: Numero di vittime probabile registrato sulla rete autostradale italiana

Numero di vittime	NUMERO EVENTI MORTALI						Totale eventi mortali	Totale vittime
	1	2	3	4	5	6		
<b>Anno</b>								
2005	199	25	2	3	1	0	230	272
2006	196	37	6	2	0	0	241	296
2007	176	13	4	3	1	1	198	237
2008	157	15	3	1	0	0	176	200
2009	138	10	0	0	0	0	148	158
2005-2009	<b>866</b>	<b>100</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>993</b>	<b>1'163</b>
Incidenza % sul totale eventi mortali	<b>87.2%</b>	<b>10.1%</b>	<b>1.5%</b>	<b>0.9%</b>	<b>0.2%</b>	<b>0.1%</b>		

### Risk evaluation

Per valutare se il rischio derivante dalle conseguenze degli eventi critici possa essere considerato ammissibile è necessario definire un criterio di accettazione del rischio. Attualmente non è stato ancora definito un criterio di accettabilità del rischio per le infrastrutture stradali nella loro globalità, diffusamente condiviso dagli operatori del settore. La definizione di un tale criterio rientra nelle prerogative degli Organismi politici competenti di ciascun Paese, sulla base di considerazioni di natura sociale ed economica, tenuto conto del livello di percezione ed accettazione sociale del rischio.

A livello internazionale sono disponibili riferimenti tecnici normativi che possono guidare nella definizione del criterio di ammissibilità [es. PIARC TC C.2, 2013; DNV, 2010; NFPA, 2014].

In Italia, l'unico riferimento normativo disponibile al riguardo è costituito dal D.Lgs. 5/10/2006 n.264 per le gallerie stradali, che ha scelto, quale criterio, il livello del rischio sociale che l'opera presenta, rappresentandolo sul piano FN (Frequenza – Numero di vittime attese all'anno), adottando il criterio ALARP (il rischio, se pur inferiore alla soglia di tollerabilità considerata, deve essere "As Low As Reasonably Possible").

Un criterio per definire l'ammissibilità del rischio per una infrastruttura stradale nel suo complesso potrebbe essere quello di estendere, per assimilazione, il criterio adottato per le gallerie stradali, modificandolo per tener conto del fatto che, anziché di una opera isolata (la galleria, caratterizzata da uno sviluppo finito, variabile in un "range" di valori relativamente contenuto), si tratta

di applicare il criterio a sistemi stradali di sviluppo anche molto rilevante. Tale approccio concettuale riprende quanto già proposto dalla Commissione austriaca per la sicurezza dei tunnel [Knoflach et al., 2004]

Estendere il criterio di ammissibilità del rischio (livello di tollerabilità e livello di accettabilità) adottato per le gallerie anche alle strade nel loro complesso vorrebbe dire assumere anche per le strade il livello di percezione ed accettazione sociale del rischio considerato per le gallerie, che, come ben noto, ha assunto connotati di grande sensibilità a seguito degli eventi critici del M. Bianco, del Gottardo e del Touern nel periodo 1999-2000. Questa scelta, d'altra parte, sarebbe in linea con i più recenti indirizzi della Commissione Europea in materia di sicurezza stradale, che impongono obiettivi ambiziosi a medio (riduzione del 50% al 2020 del numero che si è avuto in Europa nel 2011) e a lungo termine (azzeramento nel 2050 delle vittime prodotte dalla strada).

Alla luce di quanto sopra detto, il criterio di accettabilità del rischio proponibile per le infrastrutture stradali potrebbe essere quello rappresentato in

Figura 4, in cui si sono considerati, in ordinata, i valori di frequenza per km di sviluppo di strada anziché i valori di frequenza (assoluta). Con questo criterio la soglia di "rischio tollerabile" interseca l'asse delle ordinate (cui corrisponde la frequenza massima tollerabile di avere  $\geq 1$  vittima/anno per km di tracciato) a  $1 \cdot 10^{-1}$  eventi/anno. Ad analogia con il caso delle gallerie stradali, la linea di soglia ha pendenza  $\alpha=-1$ ; questo criterio, comunemente definito di "assenza di avversione al rischio", si ritiene comunque applicabile in

considerazione del fatto che l'incidentalità stradale è comunemente caratterizzata da un modesto numero di vittime (1 o 2 vittime, cfr.

Figura 3) e pertanto ricade in una zona del piano FN prossima all'asse delle ascisse, scarsamente influenzata dall'angolo di inclinazione della soglia di tollerabilità del rischio.

Il criterio proposto consente di confrontare il rischio di singole tratte stradali di differenti sviluppi, individuare le componenti del sistema che manifestano la maggiore

esposizione al rischio ed eventualmente confrontare il rischio di quest'ultimo con quello di altre tratte stradali esistenti. Il profilo di rischio delle singole componenti del sistema rappresentato, a titolo di esempio, sul diagramma di

Figura 4 illustra chiaramente quanto sopra detto, e consente di individuare gli elementi del sistema sui quali è opportuno intervenire prioritariamente per ricondurre il sistema ad una configurazione del rischio omogeneamente distribuito.

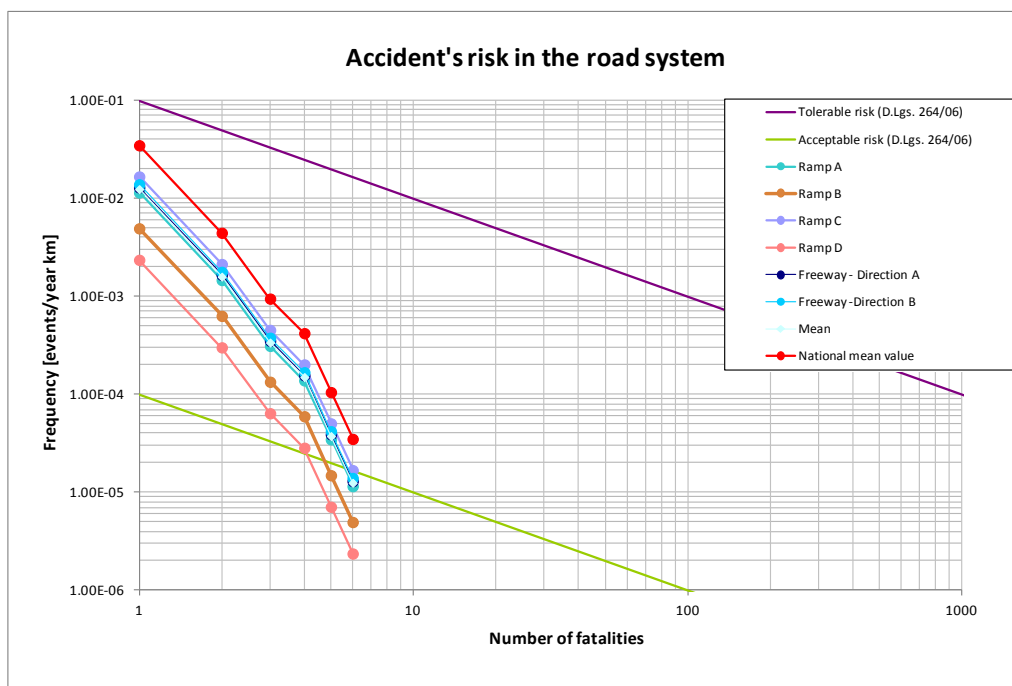


Figura 4: Rappresentazione del rischio su piano FN

### Emergency analysis

L'accadimento di un evento di guasto o di un incidente provoca un'alterazione delle normali condizioni di esercizio del sistema infrastrutturale in esame.

Ogni scenario di emergenza deve essere sottoposto ad un'analisi funzionale volta a quantificare l'evoluzione nel tempo di predefiniti parametri caratteristici della qualità della circolazione nel sistema per lo specifico scenario (v. tempo di viaggio, LOS, etc). Il successivo confronto delle condizioni di circolazione in emergenza rispetto a quelle proprie dell'esercizio ordinario consente di definire la perdita di qualità dell'esercizio

attesa in relazione ad ogni scenario di emergenza di cui è nota la frequenza di accadimento (v.

Figura 5).

Il confronto dei risultati di questa analisi con gli standard di qualità del servizio adottati dal gestore, eventualmente da definire, consente di giudicare l'ammissibilità o meno del rischio di esercizio degradato del sistema.

Questa analisi consente inoltre di valutare:

- le modalità ed i tempi di intervento degli operatori di soccorso sul luogo dell'evento;
- la probabilità di generare condizioni foriere di eventi pericolosi secondari quali, ad esempio,

il rigurgito di coda all'interno di tratte in galleria o in aree d'intersezione.

Di queste informazioni si deve tenere conto nella procedura di Operational Risk Analysis di cui si detto. L'adozione di questa procedura in forma iterativa consente di individuare gli interventi necessari, o comunque opportuni per l'ottimizzazione del sistema di gestione del traffico in emergenza (v. Figura 6). Il risultato di questa procedura è quello di restituire la configurazione dell'infrastruttura e degli impianti per la

gestione del traffico capace di garantire condizioni accettabili di esercizio sia dal punto di vista del rischio sia della qualità del servizio.

Una volta definita la configurazione del sistema adeguata a garantire sia le esigenze di sicurezza sia le esigenze funzionali d'esercizio è possibile procedere con la definizione delle sue modalità di gestione.

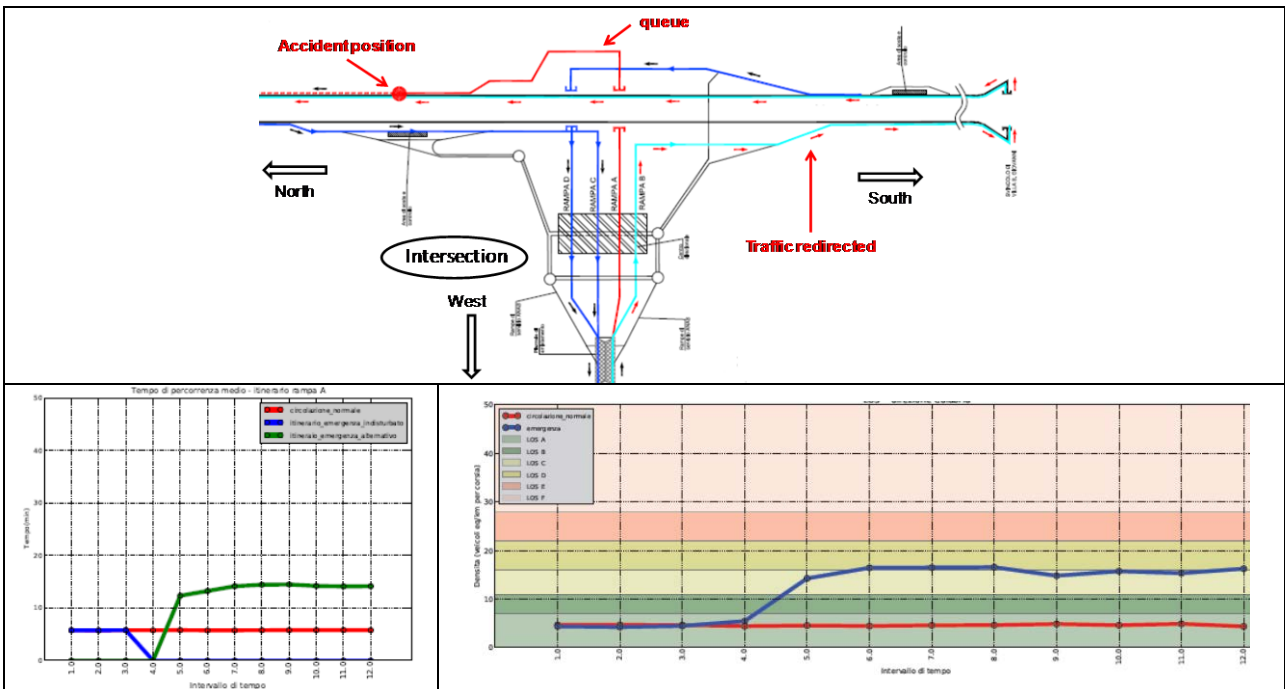


Figura 5: Esempio d'analisi di uno scenario di emergenza

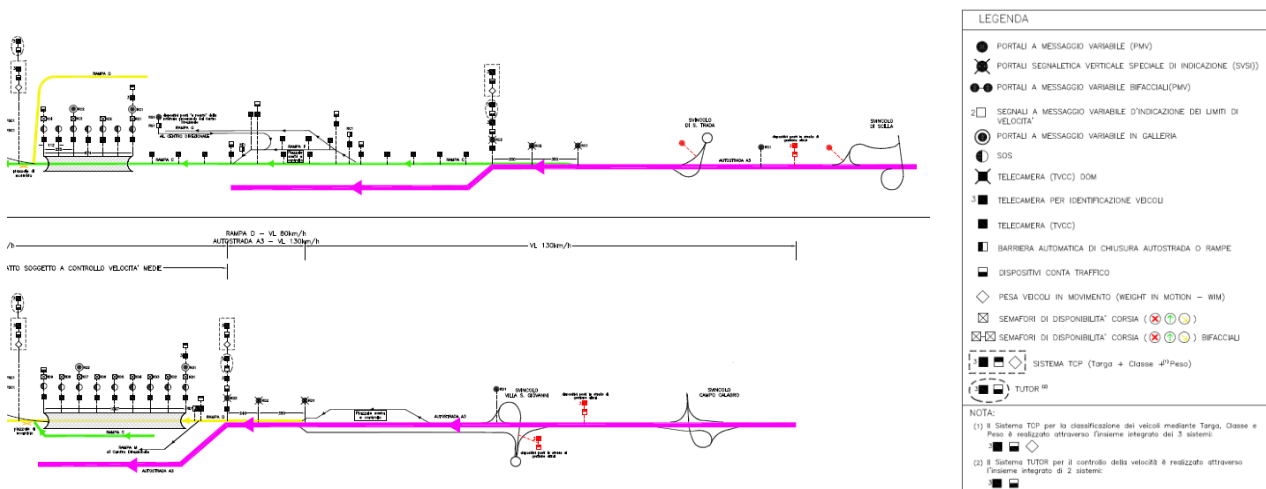


Figura 6: Layout schematico del "traffic management system"

## Emergency Management

Per poter gestire il sistema tenendo conto delle sue prestazioni in condizioni di esercizio normali e di quelle degradate in presenza di eventi critici meteorologici o di guasti all'infrastruttura o di incidenti gravi, tenendo sotto controllo anche l'equilibrio dei parametri ambientali rilevanti che possono avere influenza sulla generazione degli eventi e potrebbero a loro volta subire alterazioni a seguito dei suddetti eventi critici, occorre predisporre un sistema informatizzato in grado di considerare tutte le diverse interazioni possibili tra i diversi elementi in gioco.

E' anche dalla impostazione e dal corretto funzionamento del sistema di monitoraggio e controllo di tutte le grandezze in campo che dipende, infatti, la caratteristica di "resilienza<sup>1</sup>" che la Roadmap messa a punto dalla Task Force della Piattaforma Tecnologica Europea (European Technology Platform – ETP) assume debbano avere le infrastrutture del futuro.

La definizione dell'architettura del sistema di gestione deve tenere conto di tutto l'insieme dei dati di esercizio che possono essere acquisiti dai rilevatori in campo (es. numero di veicoli in transito nelle diverse sezioni del sistema, tipologia di veicoli, velocità di transito, etc.) e delle relative elaborazioni per giungere ai parametri di esercizio utili per la gestione del sistema, nonché delle esigenze di fruizione di dati disponibili da parte degli operatori e dei diversi utenti. Si deve inoltre tenere conto dei sistemi di controllo del traffico e di comunicazione disponibili e delle loro modalità di attivazione.

I sistemi di infomobilità che consentono un siffatto sistema di gestione possono essere:

- Sistemi con gestione centralizzata dei dati;
- Sistemi con gestione distribuita dei dati.

Il processo di gestione dei dati per i due diversi sistemi di gestione richiamati si divide nelle tre macrofasi principali illustrate in Figura 7.



Figura 7 : processo dati in differenti sistemi di infomobilità

L'architettura con gestione centralizzata dei dati è l'architettura classica di un sistema di infomobilità, e vede tipicamente l'impiego di sensori dedicati per la raccolta dati (es. sistemi di gestione della velocità dei veicoli in transito, installati sul territorio da monitorare), una rete di telecomunicazioni disponibile per il trasferimento delle informazioni verso il centro remoto di controllo (es. fibra ottica o link wireless long range - GSM, UMTS, Wimax, LTE) e un Data-Base management system (DBMS), un Server Web e delle Web applications per la pubblicazione e fruizione delle informazioni tramite servizi dedicati per le diverse tipologie di utenti finali (end-user).

Questo tipo di architettura non si presta molto bene laddove il territorio non sia già predisposto con infrastrutture di infomobilità per la raccolta e la trasmissione dei dati e gli end-user siano utenti in mobilità che devono usufruire dei servizi in tempo reale mentre si muovono sul territorio.

L'architettura con gestione distribuita delle informazioni costituisce una nuova tipologia di architettura per la rete, di tipo SOA (Service Oriented Architecture), che permette agli oggetti fisici di pubblicare servizi accessibili ai clients mobili e di interconnettere uomini con uomini, uomini con macchine e macchine con macchine.

Nel caso sia comunque necessaria la presenza di un DBMS per l'archiviazione ed elaborazione di dati "offline" è possibile prevederlo come nodo fisso della rete.

In sistemi complessi, tuttavia, possono crearsi condizioni tali che nessuno dei sistemi descritti possa assolvere in modo ottimale alle necessità di gestione.

Possono infatti presentarsi (in tutto o in parte) le seguenti circostanze:

<sup>1</sup> Infrastrutture "resilienti": Infrastrutture che garantiscono il mantenimento delle loro capacità di servizio nelle più estreme condizioni climatiche ed in presenza di criticità naturali

- presenza di un'opera o una rete principale, dotata di propri sistemi di monitoraggio (traffico, meteo, sicurezza strutturale, sicurezza di esercizio, etc.) e di gestione del traffico, con necessità di elaborazione dei dati e gestione centralizzata in una sala di controllo centrale;
- presenza di opere di collegamento ad altre reti, anch'esse dotate di propri sistemi di monitoraggio e controllo del traffico, da gestire in modo coordinato con la gestione dell'opera o rete principale;
- presenza all'interno della rete di opere particolari (v. gallerie) dotate di specifici impianti e criteri di controllo e di gestione;
- presenza di infrastrutture od opere accessorie alla rete principale, ed interferenti con questa, quali aree di parcheggio e di servizio;
- necessità di coordinare e gestire l'azione di operatori di manutenzione e di soccorso a servizio dell'opera;

- presenza di altre infrastrutture, interne o esterne al sistema (es. altri modi di trasporto) gestite da operatori differenti, ed interferenti sulla funzionalità e sicurezza del sistema principale;
- aree metropolitane esterne al sistema, e la relativa viabilità secondaria, le cui dinamiche di traffico influenzano il funzionamento del sistema.

In queste circostanze è possibile concepire un sistema misto di gestione, dotato di una rete "middleware" di comunicazione che permetta la raccolta e l'integrazione di informazioni eterogenee, relative a DBMS diversi e gestite da attori differenti, ed una struttura di gestione gerarchicamente superiore a tutti i sistemi di gestione distribuiti, definibile come "Super control room", a cui confluiscono le informazioni provenienti da tutti i sottosistemi sopra delineati, gestiti da Enti diversi tra loro (v. Figura 8).

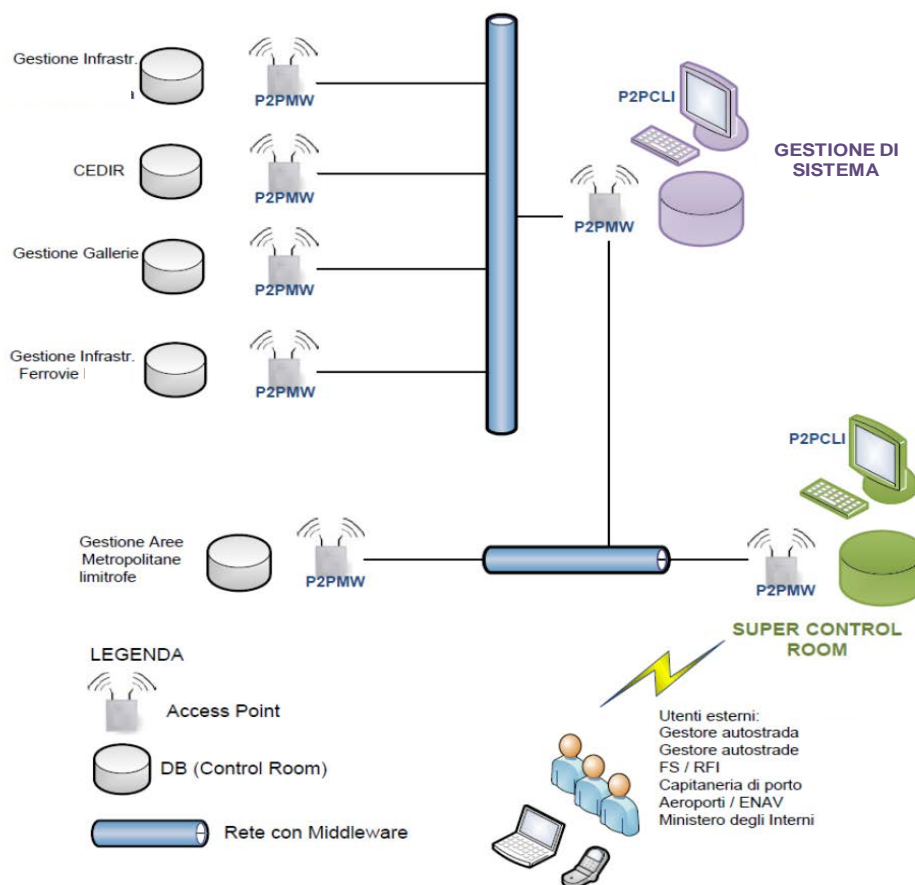


Figura 7: Schema generale di un "sistema misto" di infomobilità

Con questa struttura, gli utenti in mobilità possono accedere ai servizi forniti dalle singole control room mediante specifici software applicativi per dispositivi specifici, es. palmari o laptop scaricabili e installabili direttamente dalle control room in funzione delle specifiche credenziali d'accesso, secondo un approccio di gestione distribuita di dati.

La Super Control Room (concepita secondo un criterio di gestione centralizzata dei dati) ha l'obiettivo di recepire in ingresso i dati raccolti sul campo dalla sensoristica posta sul territorio per il monitoraggio del traffico, della sicurezza ecc., e memorizzati nei DB dei gestori preposti al controllo delle diverse reti interagenti, e sulla base di questi effettuare delle aggregazioni ed elaborazioni sulle quali costruire i servizi verso gli utenti finali. Questa Super Control Room si configura come un sistema di supporto alle decisioni avanzato, grazie alla visibilità complessiva che ha del territorio, integrando le informazioni parziali dei sottosistemi. L'accesso alla Super Control Room, oltre al gestore addetto, può ovviamente essere reso disponibile anche a tutti gli enti esterni per via diretta ad es. con l'uso delle apposite applicazioni software se utenti in mobilità o tramite postazioni client dedicate oppure per via indiretta avendo feedback indietro verso le control room gerarchicamente inferiori. Questi servizi servono ad es. per informarli delle condizioni di funzionamento del

### **Riferimenti**

[PIARC TC C.3, 2012] PIARC Technical Committee C.3 Managing operational risk in national and international road operations, "Managing risk in road organization", ISBN: 978-2-84060-265-2 (2012).

[AASHTO, 2010] AASHTO "Highway Safety Manual" (2010).

[TRB, 2013] Proposed HSM Freeway Chapter, Chapter 18, July 2013.

<https://sites.google.com/site/jbreportsandtools2/home/reports/1745>

[Domenichini et al., 2014] Domenichini, La Torre, Corsi, Fanfani, Transferability of the Highway Safety Manual Freeway Model to the Italian Motorway Network, TRR (2014).

sistema (es. emergenze) o degli eventi esterni al sistema che possono comunque influenzare il funzionamento del sistema stesso.

Alcuni end-user, quindi, non sono solo fruitori di dati e servizi ma anche fornitori, in quanto da una parte hanno a disposizione una infrastruttura di sensori che permette di raccogliere i dati sul campo e memorizzarli nei DB delle proprie control room ad accesso diretto, e dall'altra, mettono a disposizione tali dati verso un sistema gerarchicamente superiore che integra e aggrega i dati di diversi sottosistemi, ed hanno indietro dei servizi possibili solo grazie proprio a questa successiva elaborazione.

Data la necessità di archiviare ed elaborare contributi informativi di natura fortemente eterogenea provenienti dal campo è necessario predisporre un DB dotato di uno strato informativo geografico di base che funge da collante tra i dati che preverranno da ogni singolo servizio: l'integrazione delle informazioni è permessa dagli strati informativi GIS relativi all'infrastruttura. Ogni elemento fisico dell'infrastruttura viene descritto nella sua geometria e georeferenziato. Gli elementi puntuali, come ad esempio i sensori, oltre alla propria posizione geografica recheranno l'informazione della sezione stradale di appartenenza per ovviare ad eventuali ambiguità di attribuzione.

[Salvisberg et al., 2004] Salvisberg, U., Allenbach, R., Hubacher, M., Cavegn, M. & Siegrist, S., "Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes", Report n. 51, Swiss office for accident prevention, UPI, Bern (2004).

[Domenichini et al., 2012] Domenichini, La Torre, Caputo, Fanfani, "Il modello previsionale di incidentalità in gallerie autostradali", Rivista "Strade & Autostrade, Gennaio-Febbraio 2012.

[PIARC TC C.2, 2013] PIARC Technical Committee C.2 Safer Road Operations, "Social acceptance of risk and their perception", ISBN: 978-2-84060-298-9 (2013).

[DNV, 2010] Det Norske Veritas, Final Report – Risk Acceptance Criteria for Technical Systems and Operational Procedures, Report for European Railway Agency, Report No: 24127328/03, Rev. 02 (2010).

[NFPA, 2014] NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (2014).

[Knoflacher et al., 2004] H. Knoflacher, P.C. Pfaffenbichler – A Comparative Risk Analysis for Selected Austrian Tunnels International Conference “Tunnel Safety and Ventilation”, Graz (2004).

# VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO PER LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO

Livia Pardi

*Autostrade per L'Italia*

## **Introduzione**

Le infrastrutture civili rappresentano un imponente investimento pubblico e sono essenziali per il benessere economico e sociale del Paese. A differenza di molti altri sistemi ingegneristici, le infrastrutture civili debbono garantire un servizio affidabile per periodi di tempo molto lunghi, che abbracciano diverse generazioni, in un'ottica di sostenibilità e sicurezza.

Fra i numerosi eventi che possono incidere sulla fruibilità delle reti, chiaramente il rischio sismico ha un grosso impatto sulla funzionalità dei sistemi di trasporto, in quanto un sisma può compromettere la rete nel suo insieme, impedendo il tempestivo intervento delle operazioni di soccorso.

All'interno delle reti di trasporto, i ponti possono essere considerati strutture "sensibili" alle sollecitazioni sismiche.

La capacità dei ponti di resistere alle azioni sismiche è influenzata:

- dalle loro caratteristiche strutturali globali (regolarità di struttura- comportamento dinamico): legata ad esigenze progettuali (caratteristiche plano-altimetriche del tracciato, volumi e flussi di traffico, sito);
- dalla resistenza e duttilità dei singoli elementi costituenti.

## **L'OPCM 3274**

Il Dipartimento della Protezione Civile con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20 marzo 2003 recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", all'articolo 2, comma 3, chiedeva: "di procedere a verifica, da effettuarsi a cura dei rispettivi proprietari, ai sensi delle norme di cui ai suddetti allegati, sia degli edifici di interesse strategico e delle

opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile, sia degli edifici e delle opere infrastrutturali che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso. Le verifiche di cui al presente comma dovranno essere effettuate entro cinque anni dalla data della presente ordinanza e riguardare in via prioritaria edifici e opere ubicate nelle zone sismiche 1 e 2,1".

Nel 2010, in particolare, oltre a prorogare i termini per l'esecuzione delle verifiche, a causa della entrata in vigore delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, di cui al D.M. 14.9.2005, poi aggiornate con D.M. del 14.1.2008, la Protezione Civile richiedeva altresì:

- il censimento "di livello 0" di tutte le opere, ubicate non solo in zona sismica 1 e 2, ma anche 3 e 4, al fine di conoscerne le caratteristiche generali (Circolari DPC/SISM/0031471 del 21.4.2010 e DPC/SISM/75499 del 7.10.2010);
- l'indicazione delle priorità di intervento per quelle opere che non soddisfacevano l'assessment, in conformità con la normativa tecnica (circolare DPC/SISM/0083289 del 4.11.2010).

Inoltre, veniva predisposto uno speciale format per la trasmissione dei dati (vedi Appendici A.1 e A.2), allo scopo di uniformare le informazioni:

- scheda di sintesi della verifica sismica (di livello 0) per i ponti strategici ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico. Essa contiene informazioni sulle caratteristiche generali dell'opera d'arte ed è

---

<sup>1</sup> Rimangono escluse dall'obbligo di verifica gli edifici e delle opere progettate in base alle norme sismiche vigenti dal 1984 o verificate, nel caso di allargamenti delle opere preesistenti.

assimilabile quindi ad una scheda anagrafica. Per la compilazione non è richiesta alcuna verifica sismica;

- scheda di sintesi della verifica sismica di "livello 1" o di "livello 2" per i ponti strategici ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico. Quest'ultima può essere compilata solo dopo l'effettuazione delle verifiche sismiche dell'opera e contiene una serie di informazioni di dettaglio sulle opere, sulla modalità di calcolo e sui risultati delle verifiche.

### Lavoro svolto da Autostrade per l'Italia

Autostrade per l'Italia ha un parco di circa 4900 opere, fra ponti, viadotti, sottovia e cavalcavia. In relazione agli adempimenti richiesti, il lavoro è stato svolto in collaborazione con la società Spea.

Al fine di ottimizzare le operazioni e sfruttare i dati disponibili nelle banche dati aziendali, quali ad esempio il SAMOA (Figura 1), per il popolamento, il più possibile in automatico, delle schede della Protezione Civile, la Società ha sviluppato:

- un SW per la compilazione delle schede di livello 0;
- un SW per la compilazione delle schede di livello 2.

Per l'esecuzione delle verifiche sismiche, i cui risultati vengono riportati nelle schede di livello 2, si è fatto ricorso a:

- un SW proprietario VRS - Vulnerabilità e Rischio Sismico sviluppato secondo le indicazioni della OPCM 3274 nell'ambito di un progetto di ricerca SAGGI - Sistemi Avanzati per la Gestione Globale delle Infrastrutture, cofinanziato dal MIUR. Tale SW è stato poi adattato alle NTC2008;
- SW di calcolo strutturale SAP per opere di tipologia complessa (archi, scatolari), per opere che non rientrano nel campo di applicazione del VRS, o per opere non verificate con il VRS.

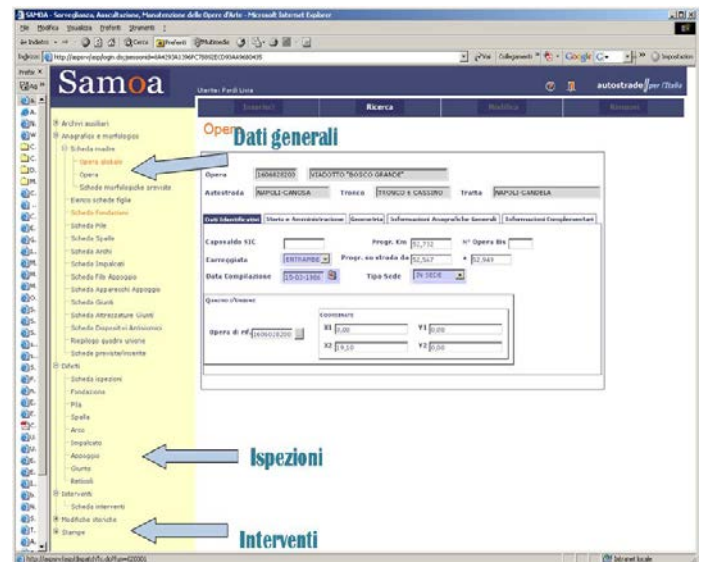


Figura 1 – Data base SAMOA

### Procedura VRS - Vulnerabilità e Rischio Sismico

L'analisi di vulnerabilità di un ponte esistente ha lo scopo di valutare le prestazioni della struttura e le probabilità connesse al raggiungimento di un determinato stato limite, consentendo così al progettista di decidere sull'opportunità (o meno) di effettuare interventi di miglioramento o adeguamento sismico e sulle tecniche più opportune da impiegare allo scopo. In tale ottica è stata sviluppata la procedura di calcolo VRS (Vulnerabilità e Rischio Sismico) – Ponti.

Tale procedura era stata messa originariamente a punto nell'ambito di un progetto di ricerca, denominato S.A.G.G.I. - Sistemi Avanzati per la Gestione Globale delle Infrastrutture, finanziato dal Ministero della Università e della Ricerca, al quale ha partecipato anche l'Università della Basilicata.

La procedura è stata successivamente estesa al caso di impalcati curvi e con pile con assi obliqui rispetto all'impalcato ed in più allineata alle indicazioni contenute nelle norme tecniche vigenti (NTC 2008).



Figura 2 - Main del VRS

Attualmente, essa consente di valutare le prestazioni sismiche della maggior parte delle tipologie di opere presenti sulla rete autostradale Italiana, quali: ponti e viadotti a travate semplicemente appoggiate, a travata continua, a travate tipo Gerber, ponti a telaio; con impalcati rettilinei o curvi e con pile con assi paralleli all'asse dell'impalcato o obliqui.

La procedura di calcolo VRS si basa sull'analisi push-over, per la caratterizzazione della resistenza sismica delle strutture in esame. La vulnerabilità ed il rischio sismico dell'opera sono valutate con riferimento a prefissati livelli prestazionali della struttura, corrispondenti a prefissati stati di danneggiamento degli elementi strutturali critici, da un punto di vista sismico, delle strutture in esame, quali: pile, spalle ed apparecchi di appoggio. La vulnerabilità è valutata, in senso probabilistico, mediante la costruzione di curve di fragilità. Il rischio sismico è ottenuto combinando la vulnerabilità con la pericolosità del sito in cui sorge l'opera.

In Figura 3 è riportato il diagramma di flusso che sintetizza le diverse fasi della procedura V.R.S.

Il programma prevede una prima fase di input, riguardante i dati generali dell'opera quali localizzazione dell'opera, tipologia strutturale e spettro elastico di riferimento.

In seguito si identificano gli elementi strutturali (impalcati, pile, spalle, apparecchi di appoggio) costituenti il ponte. In parallelo vengono definite le caratteristiche geometriche e meccaniche di pile, appoggi, spalle e ritegni in una serie di archivi specifici.

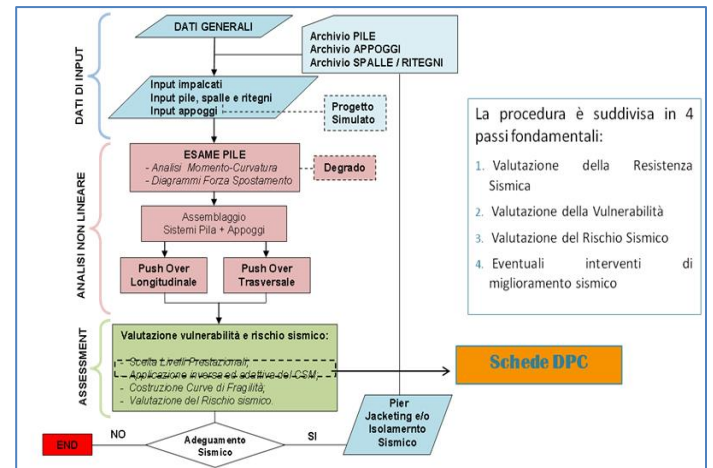


Figura 3 Diagramma di flusso del VRS

A partire dalle caratteristiche geometriche e meccaniche delle pile, il programma costruisce in automatico i diagrammi momento-curvatura delle sezioni critiche e di seguito quelli forza-spostamento di ciascuna pila. Successivamente il programma opera l'assemblaggio dei sub-sistemi pila+ appoggi, operando con le regole di combinazione dei sistemi in serie.

Una volta caratterizzati tutti i sub-sistemi pila + appoggi, il programma svolge un'analisi push-over in controllo di spostamento, sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale. Definita la resistenza sismica globale della struttura nelle due direzioni principali, il programma consente di valutare, tramite un'applicazione inversa del Metodo dello Spettro di Capacità (CSM), l'accelerazione di picco al suolo (PGA) associata ad una serie di prefissati livelli prestazionali (LP) della struttura, corrispondenti a specifici stati di danneggiamento di pile, spalle ed appoggi. Tali accelerazioni possono essere utilizzate anche nella compilazione delle schede sismiche DPC, per quantificare la vulnerabilità sismica dell'opera.

Alle PGA corrispondenti ai diversi LP selezionati, la procedura VRS associa delle curve di fragilità, che forniscono la probabilità di superamento del LP in funzione della PGA dell'evento sismico atteso. Il passo finale della procedura è la valutazione del rischio sismico associato a ciascun LP, attraverso il calcolo dell'integrale di convoluzione del prodotto fra vulnerabilità sismica dell'opera (espressa dalle curve di fragilità associate agli LP considerati) e la pericolosità sismica del sito in cui sorge l'opera (espressa dalle probabilità di superamento delle PGA relative agli eventi sismici attesi nel sito in un fissato intervallo di tempo).

Se necessario, al termine dell'analisi, si possono valutare e quantificare gli effetti di eventuali interventi di adeguamento sismico (tramite la tecnica del pier jacketing o dell'isolamento sismico), sia in termini di modifica della resistenza sismica e/o riduzione degli effetti sismici sismica, che in termini di riduzione della vulnerabilità e del rischio sismico dell'opera.

Per quanto attiene la compilazione delle schede di sintesi della verifica sismica di "livello 1" o di "livello 2", nelle schede, in accordo con le NTC 2008, sono previsti due approcci (denominati Livello 1 e Livello 2). I livelli si differenziano per il diverso livello di conoscenza ed i diversi strumenti di analisi e di verifica richiesti e si applicano in funzione della regolarità della struttura oggetto di verifica. Dal punto di vista del modello e metodo di analisi, l'approccio di Livello 1 è basato su modelli semplificati ed analisi (statiche o dinamiche) di tipo lineare. L'approccio di Livello 2 è basato su modelli più accurati ed analisi non lineari (statiche o dinamiche). I metodi di analisi basati su modelli non lineari, approccio seguito da Autostrade per l'Italia, consentendo un maggior sfruttamento del

comportamento duttile dei materiali ed una valutazione più precisa della capacità dissipativa in relazione al livello di deformazione raggiunto, portano ad una stima più accurata della vulnerabilità sismica della struttura.

Sempre per la compilazione delle schede di sintesi di "livello 1 o di livello 2", sono previsti quattro livelli prestazionali, secondo le NTC2008: Stato Limite di Operatività (SLO); Stato Limite di Danno (SLD); Stato Limite di Vita (SLV); Stato Limite di Collasso (SLC). Per la compilazione può essere scelto un solo livello per ogni stato limite considerato, quindi per lo stato limite di esercizio può essere scelto uno tra SLO e SLD e, per lo stato limite ultimo uno tra SLV e SLC. La Società ha previsto l'utilizzo di SLD e SLC, quest'ultimo coerentemente con la scelta di seguire un approccio di Livello 2. Per ognuno di questi stati limite nella scheda sono stati inseriti i rapporti tra le PGA di capacità e di domanda, nonché i medesimi rapporti tra i periodi di ritorno.

#### **Bibliografia**

Dolce M., Cardone D., Pardi L., Seismic Risk Management of Highway Bridges, IABMAS 06, 2006;

Cardone D., Perrone G., Pardi L., Progetto SAGGI: valutazione del comportamento sotto sisma di ponti e viadotti autostradali, Rivista Autostrade, 2008;

Cardone D., Perrone G., Dolce M., Pardi L., Prioritization and Seismic Risk Assessment of Bridges, IABMAS 08, 2008;

Cardone C., Perrone G., Pardi L., Una procedura automatica per il calcolo della vulnerabilità e del rischio sismico di ponti e viadotti autostradali, Rivista Autostrade, 2009.

## **Appendice A.1**

### **Scheda di Sintesi della Verifica Sismica di "Livello 0" per i Ponti Strategici ai fini della Protezione Civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di Evento Sismico**

Contiene caratteristiche generali dell'opera d'arte, è assimilabile quindi ad una scheda anagrafica. Per la sua compilazione non è richiesta alcuna verifica sismica.

I dati sono stati prevalentemente estratti dalle BD aziendali.

- 1) Identificazione del ponte;
- 2) Dati dimensionali e età costruzione/ristrutturazione;
- 3) Tipologia strutturale e materiale principale delle strutture;
- 4) Dati di esposizione;
- 5) Dati geomorfologici;
- 6) Geometria generale;
- 7) Descrizione degli eventuali interventi strutturali eseguiti;
- 8) Eventi significativi subiti dalla struttura;
- 9) Perimetrazione ai sensi del D.L. 180/1998;
- 10) Informazioni sulla verifica sismica.





## **Appendice A.2**

### **Scheda di Sintesi della Verifica Sismica di "Livello 1 o di Livello 2" per i Ponti Strategici ai fini della Protezione Civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di Evento Sismico**

La scheda di "livello 1 e di livello 2" può essere compilata solo dopo l'effettuazione delle verifiche sismiche dell'opera e contiene i seguenti dati:

- Dati comuni alle schede di livello 0 e di livello 2
  - 1) Identificazione del ponte.
  - 2) Dati dimensionali e età costruzione/ristrutturazione.
  - 3) Tipologia strutturale e materiale principale delle strutture.
  - 4) Dati di esposizione.
  - 5) Dati geomorfologici.
  
- Dati geometrici di dettaglio
  - 6-10) Geometria generale (impalcati, pile, appoggi, etc).
  - 11) Descrizione degli eventuali interventi strutturali eseguiti.
  - 12) Eventi significativi subiti dalla struttura.
  - 13) Perimetrazione ai sensi del D.L. 180/1998 (frane e alluvioni).
  
- Verifica sismica
  - 14) Informazioni sulla verifica sismica.
  - 15) Periodo di riferimento.
  - 16) Pericolosità sismica di base.
  - 17) Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche.
  - 18) Regolarità del ponte.
  - 19) Livello di conoscenza.
  - 20) Resistenza dei materiali.
  - 21) Metodo di analisi.
  - 22) Modellazione della struttura.
  - 23) Risultati dell'analisi.
  - 24) Valutazione della domanda.
  - 25) Indicatori di rischio.
  - 26) Previsione di massima di possibili interventi.



**SCHEDA DI SINTESI DELLA VERIFICA SISMICA DI "LIVELLO 1" O DI "LIVELLO 2" PER I PONTI STRATEGICI AI FINI DELLA PROTEZIONE CIVILE O RILEVANTI IN CASO DI COLLASSO A SEGUITO DI EVENTO SISMICO**

(Ordinanza n. 3274/2003 – Articolo 2, commi 3 e 4)

<b>1) Identificazione del ponte</b>		Spazio riservato DPC																																																											
Regione	Codice Istat	Codice DPCM	N° progressivo intervento																																																										
		Scheda n°	Data																																																										
		Denominazione rete viaria/ferrov																																																											
Provincia	Codice Istat	Identificativo struttura		<input type="radio"/> Ponte <input type="radio"/> Cavalcavia																																																									
Comune	Codice Istat	Codice identificativo (secondo l'allegato 1 Decr n.3685 del 21/10/2003)																																																											
Frazione/Località		Coordinate geografiche ( ED50 – UTM fuso 32-33)																																																											
Progr. dal Km	al Km	E		Fuso																																																									
		N																																																											
Denominazione ponte																																																													
Proprietario																																																													
Concessionario																																																													
<b>2) Dati dimensionali e età costruzione/ristrutturazione</b>																																																													
Superficie totale del ponte [m2]	Numero totale di campate	Anno di progettazione	Anno di ultimazione della costruzione	Anno di progettazione di eventuali interventi di modifica sostanziale eseguiti																																																									
A	B	D	E	F																																																									
<b>3) Tipologia strutturale e materiale principale delle strutture</b>																																																													
<table border="1"> <tr> <td colspan="7"></td> <td colspan="2">Altro (specificare)</td> </tr> <tr> <td>P. travi appoggiate</td> <td>P. trave continua</td> <td>Ponte a stampella</td> <td>Ponte a telaio</td> <td>Ponte ad arco</td> <td>Ponte strallato</td> <td>Ponte sospeso</td> <td colspan="2">H</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> <td>F</td> <td>G</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>														Altro (specificare)		P. travi appoggiate	P. trave continua	Ponte a stampella	Ponte a telaio	Ponte ad arco	Ponte strallato	Ponte sospeso	H		A	B	C	D	E	F	G																														
							Altro (specificare)																																																						
P. travi appoggiate	P. trave continua	Ponte a stampella	Ponte a telaio	Ponte ad arco	Ponte strallato	Ponte sospeso	H																																																						
A	B	C	D	E	F	G																																																							
<table border="1"> <tr> <th>Elem. Strutt.</th> <th>1</th> <th>Spalle</th> <th>2</th> <th>Pile</th> <th>3</th> <th>Impalcato</th> </tr> <tr> <td>Materiale</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>C.a.p.</td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>C.a.</td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>Acciaio</td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Acciaio - cls</td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>Muratura</td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>Altro</td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>						Elem. Strutt.	1	Spalle	2	Pile	3	Impalcato	Materiale							A	C.a.p.	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>	B	C.a.	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>	C	Acciaio	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>	D	Acciaio - cls	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>	E	Muratura	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	F	Altro	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>
Elem. Strutt.	1	Spalle	2	Pile	3	Impalcato																																																							
Materiale																																																													
A	C.a.p.	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>																																																							
B	C.a.	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>																																																							
C	Acciaio	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>																																																							
D	Acciaio - cls	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="checkbox"/>																																																							
E	Muratura	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																																																							
F	Altro	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																																																							
<b>4) Dati di esposizione</b>																																																													
A	Numero autoveicoli transitanti nelle ore di traffico intenso (n° veicoli/ora) – per i ponti stradali			B	Numero treni/giorno transitanti (n° treni/gg) – per i ponti ferroviari																																																								
<b>5) Dati geomorfologici</b>																																																													
Morfologia del sito				Fenomeni franosi																																																									
<input type="radio"/> A Cresta	<input type="radio"/> B Pendio Forte	<input type="radio"/> C Pendio leggero	<input type="radio"/> D Pianura	<input type="radio"/> E Assenti	<input type="radio"/> F Presenti																																																								

### 6) Geometria generale

1	<i>Lunghezza delle campate</i>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
2	<i>Curve</i> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/>				<i>Raggio</i> (m)			<i>Verso</i> destra <input type="radio"/> sinistra <input type="radio"/>		

### 7) Impalcati

1	<i>Morfologia</i>					
	A <input type="checkbox"/> A travata	B <input type="checkbox"/> Solettone	C <input type="checkbox"/> Cassone	D <input type="checkbox"/> reticolare	D <input type="radio"/> muratura	
2	<i>Vincoli</i>					
A	<i>Tipo</i>	1 <input type="checkbox"/> Apparecchi in acciaio	2 <input type="checkbox"/> Apparecchi in gomma armata	3 <input type="checkbox"/> Apparecchi in piombo	4 <input type="checkbox"/> Strutture continue	5 <input type="checkbox"/> Altro
B	<i>Dispositivi antisismici</i>	1 <input type="checkbox"/> Isolatori gomma armata	2 <input type="checkbox"/> Isolatori in gomma con nucleo in piombo	3 <input type="checkbox"/> Isolatori a scorrimento con smorzatori viscosi	4 <input type="checkbox"/> Dispositivi di tipo isteretico	5 <input type="checkbox"/> Altro
C	<i>Distanze dal bordo</i>	1	Minima distanza appoggio da bordo pila         (cm)		2	Minima distanza appoggio da bordo spalla         (cm)
D	<i>Presenza ritegni</i>	1	Trasversali SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> 1		2	Longitudinali SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> 1
E	<i>Giunti longit.</i>	1	Giunto di spalla         (cm)		2	Giunto su pila         (cm)

### 8) Pile

1	<i>Tipologia d'insieme</i>								
A <input type="checkbox"/> <i>Fusto unico</i>	1	<input type="checkbox"/> Semplice	B <input type="checkbox"/> <i>Telaio</i>	1	<input type="checkbox"/> Semplice	C <input type="checkbox"/> <i>Altro</i>	1	<input type="checkbox"/>	
	2	<input type="checkbox"/> Multiplo		2	<input type="checkbox"/> Interconnesso		2	<input type="checkbox"/>	
				3	<input type="checkbox"/> Spaziale		3	<input type="checkbox"/>	
				4	<input type="checkbox"/> Diaframmato		4	<input type="checkbox"/>	
2	<i>Altezza totale Pila1</i>           (m)		3	<i>Dimensione massima della sezione di base</i>           (m)		4	<i>Dimensione minima della sezione di base</i>           (m)		
5	<i>Altezza totale Pila2</i>           (m)		6	<i>Dimensione massima della sezione di base</i>           (m)		7	<i>Dimensione minima della sezione di base</i>           (m)		
8	<i>Elemento Orizzontale</i>						SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> 1		
A	<i>Materiale</i>	1	<input type="checkbox"/> Acciaio	2	<input type="checkbox"/> C.A.	3	<input type="checkbox"/> C.A.P.		
B	<i>Sezione</i>	1	<input type="checkbox"/> Cava Aperta	2	<input type="checkbox"/> Cava Chiusa	3	<input type="checkbox"/> Piena		
9	<i>Elemento Verticale</i>								
A	<i>Sezione</i>	1	<input type="checkbox"/> Circolare o Poligonale	2	<input type="checkbox"/> Rettangolare	3	<input type="checkbox"/> Ellittica	4	<input type="checkbox"/> Altra

### 9) Spalle

A	<i>Tipologia spalla inizio</i>	1	<input type="radio"/> Muro a parete sottile	2	<input type="radio"/> Telaio	3	<input type="radio"/> Muro a gravità	4	<input type="radio"/> Altro
B	<i>Tipologia spalla fine</i>	1	<input type="radio"/> Muro a parete sottile	2	<input type="radio"/> Telaio	3	<input type="radio"/> Muro a gravità	4	<input type="radio"/> Altro



14) Fattore di importanza	
A	Ponti di importanza critica e ponti rilevanti ( $\gamma_i = 1.3$ ) <input type="radio"/>
B	Ponti di importanza normale ( $\gamma_i = 1.0$ ) <input type="radio"/>

15) Classificazione sismica	
1) Zona sismica:	1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/>
2) Valore dell'accelerazione orizzontale massima di ancoraggio spettro risposta elastico (suolo A) dedotto da:	0.
2.1) Allegato 1 all'Ordinanza n. 3274/2003	<input type="radio"/>
2.2) Delibera di Giunta Regionale	<input type="radio"/>
2.3) Studio più approfondito:	
2.3.1) Mappa di riferimento nazionale (INGV, 2004)	<input type="radio"/>
2.3.2) Studio regionale	<input type="radio"/>
2.3.3) Studio di letteratura	<input type="radio"/>
2.3.4) Studio effettuato direttamente	<input type="radio"/>

16) Categoria di suolo di fondazione			
1	Metodologia per l'attribuzione della categoria di suolo di fondazione	1) Sulla base di carte geologiche disponibili	<input type="checkbox"/>
		2) Sulla base di indagini esistenti	<input type="checkbox"/>
		3) Sulla base di prove in situ effettuate appositamente	<input type="checkbox"/>
2	Descrizione indagini effettuate o già disponibili	1) Sondaggi geognostici a distruzione o a carotaggio continuo	<input type="checkbox"/>
		2) Prova Standard Penetration Test (SPT) o Cone Penetration Test (CPT)	<input type="checkbox"/>
		3) Prospezione sismica in foro (Down-Hole o Cross-Hole)	<input type="checkbox"/>
		4) Prova sismica superficiale a rifrazione	<input type="checkbox"/>
		5) Analisi granulometrica	<input type="checkbox"/>
		6) Prove triassiali	<input type="checkbox"/>
		7) Prove di taglio diretto	<input type="checkbox"/>
		8) Altro	<input type="checkbox"/>
3	Eventuali anomalie	1) Presenza di cavità	SI <input type="radio"/> - NO <input type="radio"/>
		2) Presenza di terreni di fondazione di natura significativamente diversa	SI <input type="radio"/> - NO <input type="radio"/>

Categoria di suolo 1									
4	Velocità media onde di taglio $V_{s30}$           m/s	5	Resistenza Penetrometrica media $N_{SPT}$         colpi	6	Resistenza media alla punta $q_c$         kPa	7	Coesione non drenata media $c_u$           kPa		
8	Suscettibilità alla liquefazione SI <input type="radio"/> - NO <input type="radio"/> NB: In caso affermativo compilare la parte destra	1) Profondità della falda da piano di campagna		$Z_w$					
		2) Profondità della fondazione rispetto al piano di campagna		$Z_g$					
		3) Presenza di terreni a grana grossa sotto la quota di falda entro i primi 15 m di profondità:				SI <input type="radio"/> - NO <input type="radio"/>			
				sciolti	medie	dense			
		Spessore							
	3.1) Sabbie fini	m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	3.2) Sabbie medie	m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	3.3) Sabbie grosse	m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

9	Categoria di suolo di fondazione (par 5.1 All. 3 Ord3274/03) <input type="text"/>	10	1) Fattore S di amplificazione per profilo stratigrafico <input type="text"/> 2) Periodo $T_B$ dello spettro di risposta <input type="text"/> 3) Periodo $T_c$ dello spettro di risposta <input type="text"/> a) Valore di Norma <input type="radio"/> b) Valore desunto in letteratura <input type="radio"/> c) Valore desunto da analisi specifiche <input type="radio"/>
11	Coefficiente di amplificazione topografica $S_T$ <input type="text"/>		

Categoria di suolo 2 (solo in presenza di terreni di fondazione di natura significativamente diversa)							
12	Velocità media onde di taglio $V_{s30}$ <input type="text"/> m/s	13	Resistenza Penetrometrica media $N_{SPT}$ <input type="text"/> colpi	14	Resistenza media alla punta $q_c$ <input type="text"/> kPa	15	Coesione non drenata media $c_u$ <input type="text"/> kPa
16	Suscettibilità alla liquefazione $SI \circ_0 - NO \circ_1$ NB: In caso affermativo compilare la parte destra	1) Profondità della falda da piano di campagna					$Z_w$ <input type="text"/>
		2) Profondità della fondazione rispetto al piano di campagna					$Z_g$ <input type="text"/>
		3) Presenza di terreni a grana grossa sotto la quota di falda entro i primi 15 m di profondità:					$SI \circ_0 - NO \circ_1$
		densità		sciolte	medie	dense	
		Spessore					
		3.1) Sabbie fini	m <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3.2) Sabbie medie	m <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
3.3) Sabbie grosse	m <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
17	Categoria di suolo di fondazione (par 5.1 Ord3274/03) <input type="text"/>	18	1) Fattore S di amplificazione per profilo stratigrafico <input type="text"/> 2) Periodo $T_B$ dello spettro di risposta <input type="text"/> 3) Periodo $T_c$ dello spettro di risposta <input type="text"/> a) Valore di Norma <input type="radio"/> b) Valore desunto in letteratura <input type="radio"/> c) Valore desunto da analisi specifiche <input type="radio"/>				
19	Coefficiente di amplificazione topografica $S_T$ <input type="text"/>						

Categoria di suolo 3 (solo in presenza di terreni di fondazione di natura significativamente diversa)							
20	Velocità media onde di taglio $V_{s30}$ <input type="text"/> m/s	21	Resistenza Penetrometrica media $N_{SPT}$ <input type="text"/> colpi	22	Resistenza media alla punta $q_c$ <input type="text"/> kPa	23	Coesione non drenata media $c_u$ <input type="text"/> kPa
24	Suscettibilità alla liquefazione $SI \circ_0 - NO \circ_1$ NB: In caso affermativo compilare la parte destra	1) Profondità della falda da piano di campagna					$Z_w$ <input type="text"/>
		2) Profondità della fondazione rispetto al piano di campagna					$Z_g$ <input type="text"/>
		3) Presenza di terreni a grana grossa sotto la quota di falda entro i primi 15 m di profondità:					$SI \circ_0 - NO \circ_1$
		densità		sciolte	medie	dense	
		Spessore					
		3.1) Sabbie fini	m <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3.2) Sabbie medie	m <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
3.3) Sabbie grosse	m <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			







# VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO DELLA RETE STRADALE PER LA GESTIONE DELLE EMERGENZE

Salvatore Cafiso, Carmelo D'Agostino, Giuseppina Pappalardo

*Università di Catania - Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura.*

## **Sommario**

La rete stradale è considerata una delle principali linee vitali (lifelines) per il ruolo fondamentale che svolge sia nella vita quotidiana degli utenti che nell'occasione di calamità naturali.

Nel caso di danno prodotto da eventi sismici, l'effetto dell'interruzione dei collegamenti della rete stradale e la conseguente riduzione dell'efficienza di ciò che rimane disponibile profondamente condiziona il funzionamento complessivo del sistema con aumento dei tempi di viaggio, della distanza e dei costi se non addirittura con l'impossibilità di raggiungere la destinazione.

Nell'articolo è presentato un sistema complessivo per la valutazione del rischio sismico sulla rete stradale extraurbana basato su applicazioni GIS.

Il modello utilizzato per la valutazione del rischio sismico è basato sulla valutazione di tre fattori: la pericolosità sismica dell'area, l'esposizione sismica dei rami e la vulnerabilità dei ponti presenti sul ramo.

Questo approccio originale rende possibile identificare preventivamente tratti critici della rete stradale in riferimento a possibili danni strutturali e all'importanza del collegamento in relazione al numero di abitanti che potrebbero soffrire ritardi nei servizi di emergenza post sisma.

Un caso studio è presentato in riferimento a differenti scenari sismici per evidenziare le potenzialità di valutazione preventiva dei differenti livelli di rischio nei collegamenti per la gestione delle emergenze della protezione civile.

## **VALUTAZIONE DEL RISCHIO**

Un assunto di base nella gestione della rete è la rete stradale deve essere affidabile, cioè deve "... fornire un servizio sicuro e non fluttuante per il traffico e offrire agli utenti percorsi alternativi, anche se alcune parti del sistema non sono disponibili a causa di incidenti stradali, manutenzione o disastri naturali "(Wakabayashi et al., 1992).

Se l'affidabilità della rete è in grado di misurare la capacità del sistema di mantenere le sue prestazioni a causa della vulnerabilità di alcuni dei suoi componenti, la valutazione dei rischi è in grado di prendere in considerazione altri aspetti oltre alla funzionalità complessiva del sistema, ad esempio le conseguenze in termini di vittime che possono derivare dalla riduzione della sua funzionalità.

Poiché la gestione del rischio di una rete stradale è soggetta a costi elevati e benefici variabili, un'adeguata valutazione preventiva del rischio è fondamentale per attuare azioni di successo.

Il rischio può essere definito come *"la combinazione della probabilità di occorrenza di un evento pericoloso e la gravità delle conseguenze (perdite umane, sociali ed economiche) che possono essere causate dall'evento"*.

Basandosi su questa definizione, la valutazione del rischio di rete stradale può essere determinata dal prodotto di tre fattori indipendenti (Cafiso et al., 2004; Cafiso et al., 2005):

- 1) **Esposizione**, dato dal numero di persone (e/o merci) che possono essere danneggiati dall'evento;
- 2) **Pericolo**, legato alla probabilità che in un certo luogo ci sarà un evento di una certa intensità con un dato tempo di ritorno;
- 3) **Vulnerabilità**, che definisce la propensione di un elemento infrastrutturale a subire danni durante l'evento.

Di seguito sarà presentata una definizione completa di ogni termine e la metodologia adottata per determinarne una misura.

## **Esposizione**

L'esposizione sismica rappresenta l'estensione, la quantità e la qualità dei vari elementi antropici che compongono il contesto territoriale (popolazione, edifici, infrastrutture, ecc), le cui condizioni e il funzionamento

potrebbe essere danneggiati da un evento sismico. La popolazione è la categoria principale a rischio e il potenziale numero di feriti o morti è considerato come una misura dell'esposizione.

Nella valutazione del rischio sismico di una rete di trasporto solitamente si considera l' "esposizione diretta" degli utenti del sistema. Infatti, specialmente nell'area urbana, sulle infrastrutture stradali durante la maggior parte della giornata un numero elevato di persone sono esposte al rischio così come coloro che sono all'interno di edifici.

Nella zona extraurbana la presenza di utenti sulla strada è meno elevata e di conseguenza la stima più significativa dell'esposizione è legata al ruolo della strada come collegamento per i servizi di emergenza nella fase post terremoto. Nelle fasi di emergenza che seguono un evento sismico, la rete di trasporto ha il compito fondamentale di permettere l'assistenza alla zona colpita in modo che gli aiuti possano essere rapidi ed efficienti. Emblematico è il disastro di Kobe: nel terremoto di Kobe (Giappone, 17-01-1995, Magnitude MSW 6.92) l'interruzione delle vie di accesso ha impedito ai servizi di soccorso di raggiungere le zone devastate per molte ore. Come conseguenza, i danni da incendi indirettamente causati dal sisma ha determinato conseguenze paragonabili a quelle causate direttamente dal sisma (per un totale 5.500 decessi).

Sulla base di queste considerazioni una definizione originale di "**esposizione indiretta**" sui collegamenti della rete stradale può essere assunta in relazione al numero di persone che hanno subito un danno a causa del ritardo dei servizi di emergenza proprio a causa di un'interruzione di tale collegamento della rete. L'analisi dell'esposizione sismica indiretta consiste nella stima dei danni o delle lesioni alla popolazione che può derivare dal danneggiamento di una parte della rete stradale.

Da questo punto di vista, ogni città deve essere considerata come un generatore di richiesta di assistenza che è proporzionale alla popolazione residente. Pertanto, l'esposizione indiretta di un collegamento stradale aumenta con la popolazione residente potenzialmente colpita dal terremoto nelle città ad esso collegate.

Utilizzando strumenti GIS, l'attribuzione di esposizione indiretta ad un collegamento di rete segue le seguenti quattro fasi:

## **Pericolo**

La pericolosità sismica si definisce come la probabilità di accadimento di un evento sismico di determinata intensità, in una zona definita e in un determinato periodo di tempo. La valutazione della pericolosità sismica di un'area si basa sullo studio della sismologia storica e sull'analisi delle caratteristiche sismogenetiche del sito.

In questo studio, viene utilizzata l'accelerazione di picco (PGA) come parametro di pericolosità sismica. In Italia, questa misura viene fornita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V., 2006) in termini di PGA, con un 81%, 63%, 50%, 39%, 22%, 10%, 5% , 2% di probabilità di superamento di tale valore in 50 anni, corrispondente ad un periodo di tempo di ritorno di 30, 50, 72, 100, 200, 475, 975 e 2475 anni.

Riportando la mappa PGA in ambiente GIS, è possibile associare l'attributo PGA per ciascun oggetto che cade nella zona con un valore di PGA specifico.

## **Vulnerabilità**

La vulnerabilità sismica è definita come la propensione di un elemento, semplice o complesso, a subire danni, collasso o modifica durante un evento sismico. È una caratteristica intrinseca di ogni costruzione, che è indipendente da qualsiasi tipo di fattore esterno. Ad esempio, la vulnerabilità di un ponte dipende dalle tecnologie costruttive adottate, dai materiali impiegati, dalla sua configurazione strutturale, dalla sua età e lo stato di manutenzione, dalla qualità del progetto originario. Tutti questi fattori sono indipendenti dalla localizzazione dell'oggetto e della probabilità che un evento sismico possa avvenire lì.

Per definire la vulnerabilità di un tratto stradale, si deve considerare che ogni tratto è composto da una serie di componenti (ponti, scarpate, trincee, gallerie ...) con differenti caratteristiche di vulnerabilità e modelli di valutazione non sempre comparabili.

Se più di un componente vulnerabile è presente sullo stesso collegamento di rete, per caratterizzare con un solo indicatore di vulnerabilità un tratto di strada tra due nodi, possono essere usati vari criteri di aggregazione, tra i quali uno dei più efficaci e di immediata applicazione consiste nel dare per tutto il tratto il valore massimo tra gli indicatori di vulnerabilità dei componenti che la compongono.

Pertanto, basandosi sull'esperienza acquisita dopo forti terremoti, un primo livello di screening di grandi reti stradali può essere condotta considerando solo la vulnerabilità dei ponti, quale elemento strutturale più debole di una strada in caso di terremoto.

Sulla base di questa ipotesi, per valutare la vulnerabilità sismica dei ponti che fanno parte di una rete stradale, dalla letteratura è stato selezionato un modello (Buckle et al., 1995) perché particolarmente efficace per l'approccio proposto, in quanto:

- Minimizza l'arbitrarietà di giudizio soggettivo;
- Tutti i parametri indicati dalla procedura possono essere facilmente identificati nei ponti della zona oggetto di indagine;
- Il modo di determinare un danno come prodotto della pericolosità e vulnerabilità è adatto per il metodo di valutazione del rischio adottato;
- Il modello fornisce un indice di danno numerico.

Nel modello (Buckle et al., 1995), il livello di vulnerabilità (V) è ottenuto mediante una regressione lineare degli indicatori di danno registrati durante gli eventi sismici ed è correlato con i parametri di valutazione presenti nel modello:

$$V = \sum \beta_i \times X_i \quad (1)$$

dove:

$X_i$  ( $i = 1, \dots, 12$ ) è il valore assunto dai parametri del modello (intensità di accelerazione di picco, specifiche di progettazione, tipo di sovrastruttura, forma della sovrastruttura, giunto interno, tipo di pila, tipo di fondazione, materiale di sottostruttura, irregolarità nella geometria o in rigidità, condizione del sito, effetti di liquefazione, lunghezza);

$\beta_i$  sono i fattori di peso per ogni attributo stimato mediante analisi di regressione.

### Danno

Una volta definite vulnerabilità (V) e pericolosità (PGA), è possibile ottenere l'indice di danno per ogni ponte mediante la seguente relazione:

$$D = XPGA \times V \quad (2)$$

dove XPGA è l'indice di pericolosità assumendo i valori indicati nella tabella 1 (Buckle et al., 1995).

PGA	XPGA
PGA < 0,1 g	1
0,1 g < PGA < 0,2 g	2
0,2 g < PGA < 0,3 g	3
PGA > 0,3 g	4

**Tabella 0-1 Indice di pericolo XPGA**

Dalle equazioni (1) e (2), il danno D può assumere valori compresi tra 0 e 9 (0 = nessun danno, 9 = danno massimo).

### Rischio

Dopo un terremoto, il fattore di rischio è associato alla possibilità che i servizi di emergenza possano raggiungere, provenendo dall'origine (O), le città di destinazione (Di). Pertanto, la valutazione del rischio della rete stradale è stato definito associando il Danno (Pericolo x Vulnerabilità) e fattori di Esposizione ad ogni ramo della rete stradale.

La procedura comprende le seguenti cinque fasi (Cafiso et al., 2008), che si riferiscono alle diverse fasi del processo e dei diversi elementi del sistema di rete. Per ogni passo è associata un'apposita applicazione GIS ed una procedura. Alla fine del processo, il rischio sarà attribuito ai singoli collegamenti della rete stradale.

#### Fase 1 - Pericolo e Vulnerabilità (attributo: ponte)

Per ogni ponte nei valori della rete stradale di vulnerabilità (V) e XPGA sono associati come attributi a seconda delle caratteristiche strutturali del ponte (equazione 1) e allo scenario sismico atteso nella posizione dell'elemento (Tabella 1).

#### Fase 2 - Danno (attributo: collegamento)

Per ogni ponte, è calcolato un indice di Danno come prodotto della pericolosità e vulnerabilità (equazione 2). La presenza di un ponte (elemento puntuale) in un collegamento stradale (elemento lineare) può essere definita in GIS con una analisi spaziale di prossimità.

Quando si tratta di collegamenti stradali dove non ci sono ponti o cavalcavia, l'indice di Danno sarà pari a 0. Per quei tratti in cui vi è un solo ponte o cavalcavia, l'indice di danno è stato assegnato sulla base dei valori effettuate nella fase 1. Infine, se vi è più di un ponte e/o cavalcavia, l'Indice di danno del tratto è stato considerato come uguale al valore massimo dei valori attribuiti ai diversi ponti o viadotti.

#### Fase 3 - Itinerario O/D (attributo: città)

Dopo aver definito l'origine (O) e la destinazione (Di) nello scenario terremoto, le rotte che collegano ogni connessione O/D possono essere definiti in base a criteri diversi. Il Network Analysis di GIS consente di trovare il percorso lungo una rete che minimizza un dato attributo (ad esempio la lunghezza, il tempo di percorrenza, gli indici di danno).

**Fase 4** - Fattore di esposizione indiretta (attributo: collegamento)

Un valore di esposizione indiretta viene assegnato come attributo per ciascun collegamento della rete stradale che costituisce parte del percorso O/D pari all'esposizione diretta della città (il numero di abitanti nella città di destinazione moltiplicato per il suo indice di rischio sismico).

Una volta che tutti i percorsi O/D sono stati identificati per tutte le "i" destinazioni, può essere associato un valore complessivo di esposizione indiretta a ciascun collegamento di rete pari alla somma dei valori attribuiti a questo collegamento in ciascuno degli O/Di .

**Fase 5** - Valutazione del rischio (attributo: collegamento)

Quando per ciascun collegamento della rete stradale sono attribuiti il valore di danno (Fase 2) e l'esposizione indiretta (fase 4), è possibile ottenere il valore di rischio del collegamento come prodotto tra danno ed esposizione indiretta.

$$\text{Rischio} = \text{Esposizione indiretta} \times \text{Danno}$$

### CASO STUDIO

Riferendosi a una zona ad alto rischio sismico della Sicilia orientale (Italia) come caso di studio, è stato possibile verificare l'efficacia della procedura proposta. La metodologia è stata progettata per le applicazioni basate sul Sistema Informativo Geografico (GIS). In particolare, l'attuazione del metodo che utilizza il GIS ha permesso di elaborare mappe che identificano i tratti più critici per i diversi scenari di terremoto e le origini servizio di emergenza.

### Area di ricerca

La provincia di Catania ha una superficie di circa 3.552 Km<sup>2</sup> in cui ci sono 58 città con una popolazione complessiva di 1.054.778 abitanti.

Il GIS contiene tutti i dati necessari per l'analisi del rischio e gestione delle emergenze, organizzati in forma-file e

basi di dati relazionali. Tutti gli strati di dati sono nella stessa proiezione cartografica / sistema di coordinate.

I ponti e i cavalcavia presenti sulla rete stradale sono stati posizionati all'interno del GIS utilizzando mappe in scala 1:10.000 della provincia (Figura 1). Sono stati localizzati 321 ponti e viadotti situati su tratti di rete stradale all'interno della zona di studio. Per ogni ponte "j" è stato effettuato un controllo visivo ed i dati strutturali sono stati ottenuti dal Ministero dei trasporti e dagli enti gestori delle strade per valutare la vulnerabilità tramite i parametri del modello (1). Come risultato, ogni ponte localizzato nel GIS ha come attributo un indice di vulnerabilità V<sub>j</sub>:

$$V_j = \sum_i \beta_i \times X_{ji} \quad (3)$$

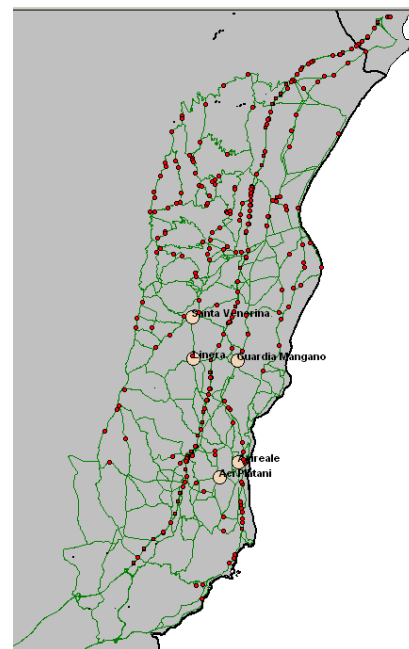
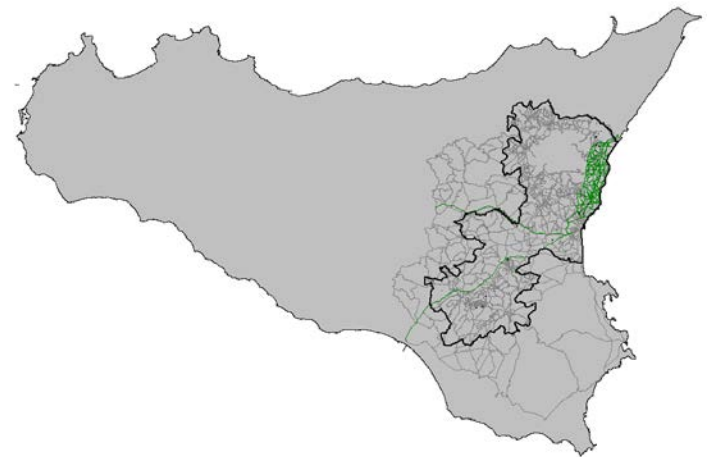


Figura 1 Area di indagine, rete stradale and localizzazione dei ponti (Cafiso et. al 2004)



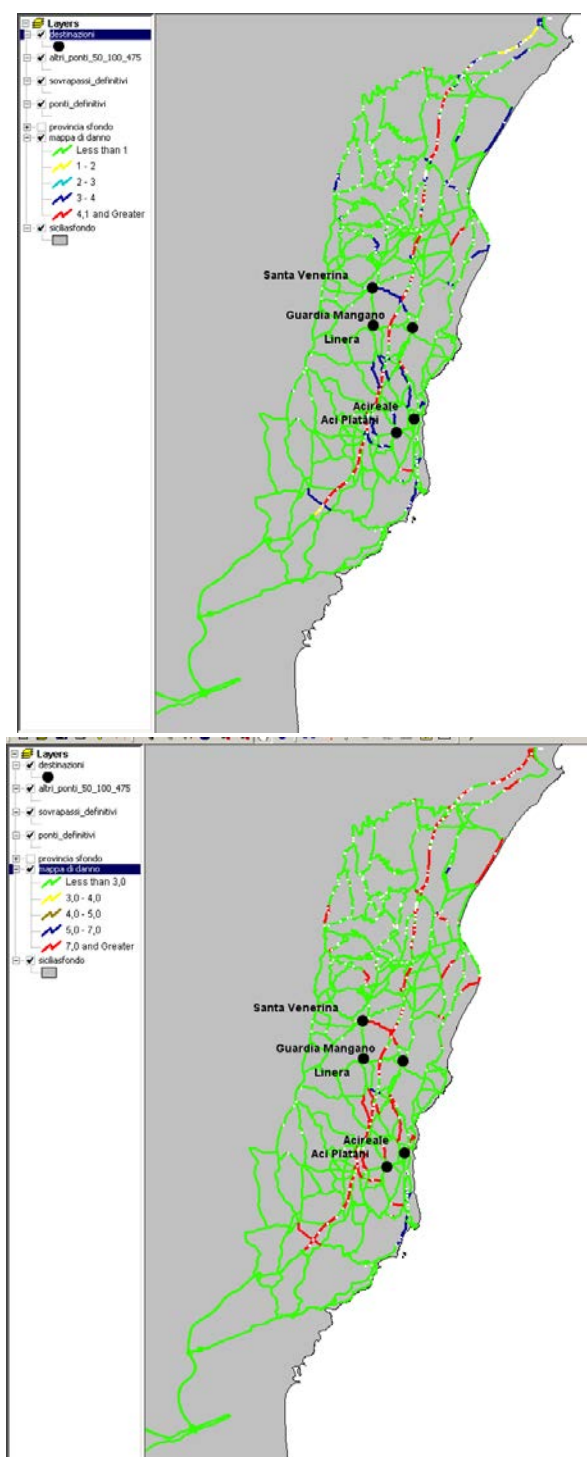


Figura 0-4 Mappa dei valori del Danno per i collegamenti stradali – Tempo di ritorno 50 anni (sinistra) e 475 anni (destra) (Cafiso et. al 2008)

### Fase 3 - Collegamenti O / D

Sono stati scelti due differenti origini del servizio di emergenza:

1) Origine Nord ( $O_N$ ): l'autostrada dalla città di Messina, che rappresenta il collegamento tra la Sicilia e la parte continentale dell'Italia;

2) Origine Ovest ( $O_W$ ): la tangenziale di Catania, relativa ai servizi di emergenza provenienti dalla Sicilia orientale e la parte meridionale della provincia di Catania.

Per quanto riguarda le destinazioni, sono stati considerati 5 comuni nell'area di studio:

Acireale (D1: 33.010 abitanti), Santa Venerina (D2: 4.056 abitanti), Aciclatani (D3: 3.269 abitanti), Linera (D5: 2.781 abitanti), Guardia Mangano (D6: 2.457 abitanti).

Lo shape-file relativo alle strade presenti nella provincia di Catania e la segmentazione della rete consente di utilizzare lo strumento GIS "analisi di rete" in grado di definire il percorso migliore da Origine ( $O_N$  o  $O_W$ ) alla destinazione ( $D_i$ ). Il miglior collegamento è quello tra tutte le alternative che riducono i costi di trasporto ottenuto come somma degli attributi di costo di ogni collegamento componente il percorso (Figura 5).

Dopo aver definito l'origine (O) e la destinazione (D) nello scenario terremoto, possono essere identificati 4 percorsi diversi per ogni connessione O / D utilizzando come funzione di costo Lunghezza, Tempo e Danni attribuiti a 50, 100 e 475 anni precedentemente assegnati ai rami della rete stradale.

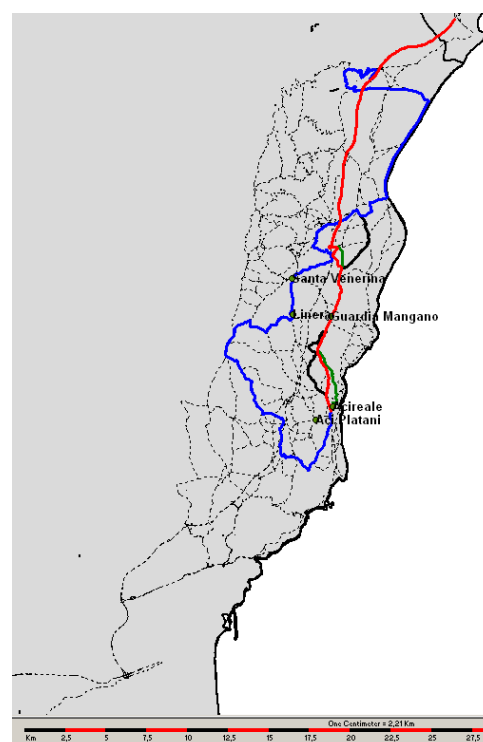


Figura 0-5 Origine Nord: minore lunghezza (linea rossa), tempo minore (linea verde), minor danno (linea blu) (Cafiso et. al 2008)

#### Fase 4 - Fattore di esposizione indiretta

Un valore di esposizione indiretta viene assegnato a ogni anello della rete stradale che costituisce parte del percorso O/D, uguale al numero di abitanti nella città di destinazione (Di) moltiplicato per il suo indice di rischio sismico (esposizione della città).

Una volta che tutti i percorsi O/D<sub>i</sub> sono stati identificati per tutte le "i" destinazioni, un valore complessivo di esposizione indiretta può essere associato a ciascun collegamento di rete pari alla somma dei valori attribuiti al collegamento in ciascuno degli O/D<sub>i</sub>.

Pertanto, alcuni tratti della rete hanno una esposizione pari a zero, perché non sono mai stati utilizzati per rotte O/D. Altri hanno un valore di esposizione basato su una singola destinazione, mentre quelli che sono stati usati un numero di volte per raggiungere destinazioni diverse hanno un valore di esposizione pari alla somma delle esposizioni dirette delle città per cui il tratto è utilizzato (figura 6).

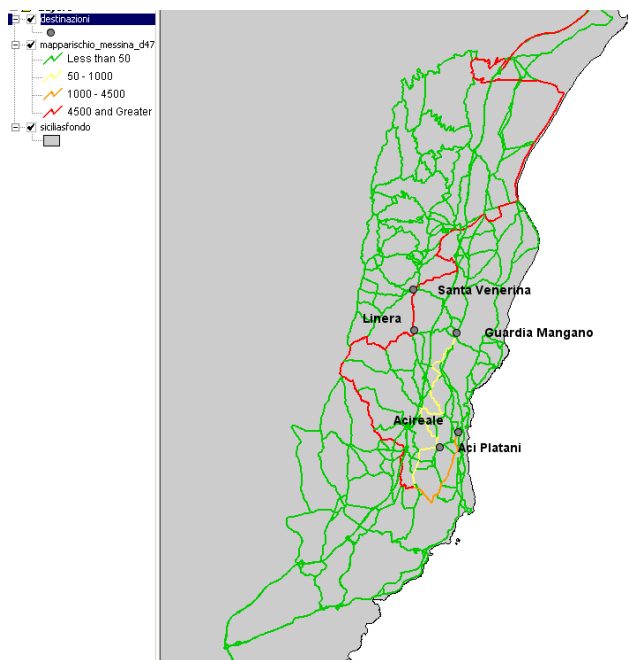


Figura 0-6 Classi di esposizione indiretta (Cafiso et. al 2008)

#### Fase 5 - Valutazione del rischio dei collegamenti

Quando il valore di danno (fase 3) e l'esposizione indiretta di ogni singolo collegamento della rete (fase 4) sono stati definiti, è possibile ottenere il valore di rischio relativo a quel particolare percorso f, moltiplicando il valore di danno per il valore dell'esposizione .

$$\text{Rischio} = \text{Esposizione indiretta} \times \text{Danni}$$

In ambiente GIS, possono essere redatte le mappe di rischio per ciascuna delle origini. Le carte tematiche evidenziano graficamente i tratti della rete stradale che hanno il più alto indice di rischio (Figura 7).

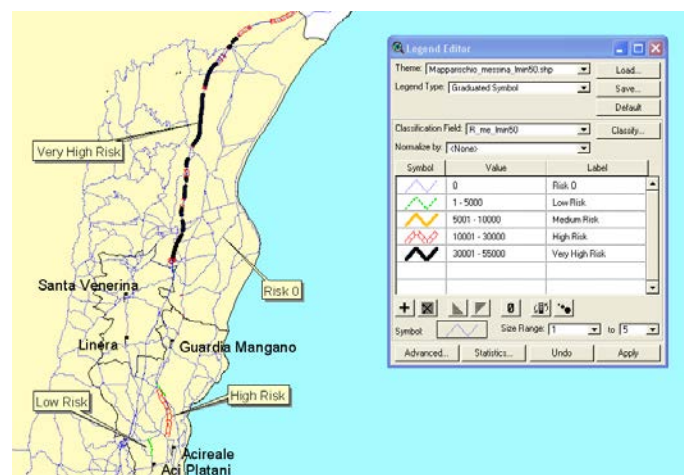


Figura 0-7 Mappe tematiche di rischio per i percorsi con minore lunghezza (Cafiso et al., 2008)

## CONCLUSIONI

La tradizionale valutazione del rischio sismico sulla rete stradale si concentra sulla vulnerabilità dei singoli elementi strutturali (soprattutto ponti) e sull'esposizione diretta degli utenti della strada, soprattutto in area urbana.

Nella gestione emergenza post disastro, l'efficienza della rete stradale extraurbana è essenziale per un consentire accesso alle zone urbane colpite e per un soccorso tempestivo della popolazione in modo da ridurre le conseguenze dell'evento. Pertanto, la valutazione preventiva del rischio sui rami della rete stradale è fondamentale al fine di programmare l'adeguamento sismico dei collegamenti che sono strategici per un suo efficiente funzionamento.

In tale prospettiva, i fattori di rischio specifici che devono essere attribuiti a ciascun collegamento della rete stradale attengono alla pericolosità dell'area, alla vulnerabilità degli elementi e all'esposizione indiretta del collegamento.

Per raggiungere questo obiettivo, è stata presentata in maniera organica un'originale metodologia di analisi e valutazione dei rischi, sviluppata nel corso di precedenti studi svolti presso l'Università di Catania, che permette di individuare i collegamenti della rete stradale con un

elevato livello di rischio sia per quanto riguarda possibili danni strutturali e sia per l'importanza della connessione relativa al numero di abitanti che possono essere raggiunti dai servizi di emergenza. Le analisi sono state effettuate considerando i ponti come elemento "debole" della infrastruttura stradale in caso di eventi sismici, ma la procedura potrebbero essere applicati anche a diversi tipi di elementi (trincee, scarpate, tombini, ecc).

Usando come caso studio un zona ad alto rischio sismico della Sicilia orientale, è stato possibile verificare l'efficacia della procedura proposta. In particolare, implementando tale metodologia in ambiente GIS, è possibile eseguire le varie fasi della procedura ed elaborare mappe di rischio che identificano i tratti più critici per i diversi scenari di terremoto (tempi di ritorno di 50, 100, 475 anni) e per diverse origini del servizio di emergenza.

#### **BIBLIOGRAFIA**

Buckle I.G., Kim S.H., A vulnerability assesment for highway bridge. ASCE. Lifeline Earthquake Engineering, 1995.

Cafiso S., Condorelli A., Cutrona G., Mussumeci G. A Seismic Network Reliability Evaluation on GIS Environment - A Case Study on Catania Province. Risk Analysis IV, 2004, pagg. 131-140 - WIT Press, – ISBN 1-85312-736-1.

Cafiso S., Condorelli A., D'Andrea A.. Methodological Considerations for the Evaluation of Seismic Risk on Road Network. Pure and Applied Geophysics, Vol. 162, n. 4, 2005. pagg.767-782.

Cafiso S., La Bruna A., La Cava G. "Seismic Risk Assessment of Rural Road Network". Risk Analysis, Simulation and Hazard Mitigation V. pp.91-100. WITpress, Southampton, United Kingdom, 2008. ISBN: 978-1-84564-104-7.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.). Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale PCM n. 3519, All. 1b. April 2006 in <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>

Ord.P.C.M. n. 2788 del 12/06/1998, Individuazione delle zone ad elevato rischio sismico del territorio nazionale, 1998.

Wakabayashi H., Idia Y., Upper and Lower bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with Boolean Algebra. Journal of Natural Disaster Science 14, pp. 29-44, 1992.

# RISCHIO SISMICO E RESILIENZA DI STRUTTURE SOGGETTE A DEGRADO

Andrea Titi, Fabio Biondini

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano*

*Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano*

*andrea.titi@polimi.it, fabio.biondini@polimi.it*

## **Sommario**

Nella valutazione del rischio sismico di strutture e infrastrutture è di fondamentale importanza tenere conto dei diversi fattori che possono alterare nel tempo le prestazioni del sistema. Tuttavia, nell'attuale approccio alla progettazione sismica le prestazioni strutturali si considerano tempo-invarianti e indipendenti dall'ambiente con cui il sistema interagisce. Tale approccio assume implicitamente un margine di sicurezza costante nel tempo. L'inevchiamento e il degrado di materiali e strutture conseguente all'esposizione ambientale mostra come tale impostazione debba essere rivista per tenere conto dell'evoluzione nel tempo delle prestazioni sismiche mediante un approccio a ciclo di vita. Inoltre, quando si considerano gli effetti di un danneggiamento progressivo, il processo decisionale alla base delle strategie di mitigazione del rischio deve basarsi su un insieme di indicatori prestazionali in grado di caratterizzare non solo i livelli di sicurezza e affidabilità strutturale, ma anche la capacità del sistema di contenere entro limiti accettabili gli effetti del danno indotto da un evento sismico e di garantire una adeguata capacità di recupero che consenta di tornare, in tempi rapidi, allo stato pre-evento. Tali aspetti possono essere efficacemente racchiusi nel concetto più generale di resilienza sismica. In questo lavoro si richiamano alcuni concetti di base per la valutazione del rischio e si presenta un approccio probabilistico a ciclo di vita per la valutazione delle prestazioni sismiche di strutture soggette a degrado, con particolare riferimento alla resilienza sismica. L'applicazione al caso di un ponte a travata continua in calcestruzzo armato mostra l'importanza degli effetti

combinati di danno sismico e degrado progressivo nella valutazione della resilienza e, quindi, del rischio sismico di strutture esposte a degrado ambientale.

## **Introduzione alla valutazione del rischio sismico**

Il rischio sismico può essere definito come l'insieme di tutte le conseguenze economiche, sociali e ambientali indotte da un evento sismico che può verificarsi in un dato territorio in un determinato istante temporale. Il rischio può essere associato a persone, strutture e reti infrastrutturali e le perdite sono intese come perdite di vite umane, danni e interruzioni di attività, a seconda del contesto di applicazione. La valutazione del rischio sismico costituisce il primo e fondamentale passo per una corretta pianificazione delle attività decisionali e delle strategie di mitigazione del rischio, che si può ottenere attraverso una corretta progettazione secondo criteri antisismici e predisponendo un sistema efficace di protezione civile (Faccioli & Paolucci, 2005). Per una caratterizzazione del rischio sismico occorre valutare la pericolosità sismica del sito di interesse, la vulnerabilità sismica del sistema e l'esposizione dei beni esposti al danno sismico (McGuire 2004).

La pericolosità sismica è il livello di scuotimento atteso in un determinato sito con un'assegnata probabilità di eccedenza in un dato intervallo di tempo. L'analisi di pericolosità sismica può essere condotta con approccio deterministico o probabilistico (Bommer 2002). L'approccio deterministico (Deterministic Seismic Hazard Assessment, DSHA) consente di determinare gli effetti di uno specifico terremoto caratterizzato da predefiniti valori di magnitudo e distanza epicentrale, ad esempio riferiti all'evento sismico più gravoso che si ritiene possa

manifestarsi nel sito di interesse. Tale approccio viene in genere adottato per la progettazione di strutture e infrastrutture di importanza strategica, per le quali si richiede un livello di protezione estremamente elevato nei confronti dei fenomeni di collasso strutturale. L'approccio probabilistico (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) consente invece di tenere conto di tutti i possibili terremoti che possono manifestarsi in un dato territorio attraverso la stima della probabilità di superamento di assegnate soglie dei parametri sismici durante un determinato intervallo temporale per il sito di studio (Cornell 1968). I risultati della PSHA sono sintetizzati in curve di pericolosità, che forniscono la probabilità annuale di superamento di un assegnato livello di intensità sismica, come ad esempio l'accelerazione di picco del terreno o l'accelerazione pseudo-spettrale, per un dato periodo di vibrazione (Baker 2013).

La vulnerabilità sismica è una proprietà intrinseca del sistema studiato e rappresenta la prestazione della struttura (o di sue componenti) qualora fosse sottoposta ad un terremoto considerando la pericolosità sismica attesa nel sito di interesse. I risultati di un'analisi di vulnerabilità sono generalmente rappresentati in termini di curve di fragilità, che forniscono la probabilità di superamento di un dato parametro di risposta strutturale, che misura il danno, per un assegnato livello di intensità sismica (Lupoi et al. 2006).

Infine, l'esposizione può essere definita come l'insieme dei beni che possono subire perdite o danni a seguito di un evento sismico. I principali beni sono di natura sociale ed economica e comprendono le vite umane e il parco immobiliare e infrastrutturale (Thibert 2008). È quindi importante affiancare le valutazioni di pericolosità e vulnerabilità con una analisi dei costi totali attesi, tenendo conto in particolare della quota parte relativa all'intervento di adeguamento sismico e di quella relativa ai costi di gestione durante la vita di servizio dell'opera, in modo da fornire ai decisori gli strumenti necessari per pianificare una corretta politica di mitigazione del rischio (Guagenti & Brambilla 1986).

Ciò premesso, il rischio sismico può essere definito come la convoluzione di pericolosità  $H$ , vulnerabilità  $V$  ed esposizione  $E$  (Crowley et al. 2009):

$$R = H \times V \times E \quad (1)$$

L'Italia presenta un elevato rischio sismico, in quanto caratterizzata da un livello di pericolosità sismica medio-alto (in termini di frequenza e intensità dei terremoti), una elevata vulnerabilità (a causa dell'intrinseca fragilità delle strutture e delle reti infrastrutturali) e una esposizione particolarmente significativa, dovuta all'alta densità abitativa e all'importanza del patrimonio storico-culturale. Gli attuali codici normativi, in particolare la normativa italiana (D.M. 14/01/2008) ed europea (CEN-EN 1998-1), prevedono di valutare esplicitamente solo i termini di pericolosità e vulnerabilità. Nell'ottica di un approccio di tipo prestazionale (Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE), l'orientamento più recente è di operare con metodologie generali che consentano una analisi completa degli aspetti coinvolti nella valutazione del rischio sismico. Nel seguito si richiamano brevemente gli aspetti salienti dell'approccio proposto dal Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

#### ***Approccio PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)***

Gli approcci prestazionali possiedono numerosi vantaggi rispetto a quelli fondati su regole prescrittive. In particolare, consentono di considerare diverse metriche prestazionali di interesse per gli investitori e forniscono strumenti efficaci affinché i decisori politici possano essere coinvolti responsabilmente nella definizione delle soglie di accettabilità del rischio sismico (Yang et al. 2006). Costituiscono inoltre un punto di raccordo tra due diverse visioni del medesimo problema, in quanto il mondo ingegneristico opera tipicamente con misure prestazionali legate alla risposta strutturale, come spostamenti e accelerazioni di piano, mentre l'ente decisore è legato a misure prestazionali legate al fattore economico, quali i periodi di inattività, i costi di riparazione e la perdita di vite umane. Il risultato finale è rappresentato da una valutazione probabilistica

quantitativa delle prestazioni sismiche di una struttura o di una rete infrastrutturale mediante parametri che siano di immediata comprensione e utilizzo sia per gli ingegneri, sia per gli investitori (Deierlein 2004, Baker & Cornell 2008). L'approccio proposto dal Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) per le analisi di rischio sismico si può suddividere in quattro fasi: analisi di pericolosità, analisi strutturale, analisi di danno e analisi delle conseguenze. Ogni fase è caratterizzata dalla valutazione di una probabilità condizionata, che richiede l'integrazione numerica di ciascun contributo per una corretta propagazione delle incertezze da un livello di analisi al successivo, al fine di ottenere una stima probabilistica delle prestazioni (Goulet et al. 2007).

Nella prima fase si valuta la pericolosità sismica del sito di interesse, al fine di ottenere un insieme di accelerogrammi la cui misura di intensità sismica (Intensity Measure, IM) sia commisurata ai diversi livelli di pericolosità (Porter 2003). Come parametri di intensità sismica si assumono tipicamente l'accelerazione di picco del terreno (Peak Ground Acceleration, PGA) o l'ordinata dello spettro di accelerazione valutata in corrispondenza del periodo fondamentale della struttura.

Gli accelerogrammi così individuati vengono impiegati nella seconda fase per analisi dinamiche non lineari della struttura in esame, al fine di valutarne le prestazioni sismiche attraverso il monitoraggio di opportuni parametri di risposta (Engineering Demand Parameters, EDPs). Ad esempio, nel caso di edifici, indicatori efficaci del livello di danno sismico raggiunto sono lo spostamento di interpiano per gli elementi strutturali e l'accelerazione massima di piano per gli elementi non-strutturali. Se si opera con impostazione probabilistica, in questa fase dell'analisi è possibile tenere conto anche delle incertezze coinvolte nel problema, come i parametri del modello strutturale e le proprietà meccaniche dei materiali.

Nella terza fase si procede all'analisi di danno, nella quale i parametri di risposta EDP sono utilizzati per costruire le curve di fragilità e le corrispondenti misure di danno (Damage Measure, DM). Le curve di fragilità forniscono la probabilità condizionata che un elemento, strutturale o non-strutturale, violi un particolare stato limite (Goulet et

al. 2007). Il parametro di danno può coincidere con il parametro EDP di risposta strutturale, rispetto al quale si definiscono opportune soglie, o può essere espresso attraverso un funzionale di danno valutato mediante prove sperimentali, metodi analitici, dati acquisiti da precedenti terremoti e giudizio di esperti (Wen et al. 2004, Ellingwood 2005, Wen & Ellingwood 2005, Ellingwood et al. 2007).

Infine, nella quarta ed ultima fase si esegue una analisi delle conseguenze nella quale, in funzione della misura di danno DM, si valutano i corrispondenti costi associati agli interventi di riparazione, ai periodi di inattività e alla perdita di vite umane. Si individuano in tal modo delle variabili decisionali (Decision Variables, DVs) che possono essere utilizzate dagli enti decisori e dagli investitori per definire opportune e mirate strategie di mitigazione del rischio sismico (Porter 2003).

La metodologia PEER è riassunta nel diagramma a blocchi di Figura 1. Da un punto di vista matematico, l'approccio PEER si basa sul teorema della probabilità totale e combina i risultati parziali delle diverse fasi come segue (Porter 2003):

$$\lambda[DV | D] = \iiint p[DV | DM, D] p[DM | EDP, D] p[EDP | IM, D] \lambda[IM | D] dIM dEDP dDM \quad (2)$$

dove D rappresenta il sistema strutturale,  $p[X|Y]$  è la densità di probabilità di X condizionata a Y e  $\lambda[X|Y]$  è la frequenza di occorrenza di X dato Y. Il risultato finale dell'analisi di rischio è quindi una curva di perdita attesa, come quella mostrata in Figura 2, che fornisce la frequenza media annuale di superamento  $\lambda[DV]$  di un assegnato valore di soglia di una variabile decisionale DV, ad esempio il costo di riparazione, il numero di vittime, il periodo di inattività a seguito di un evento sismico, oppure un qualunque altro parametro di interesse per il decisore.

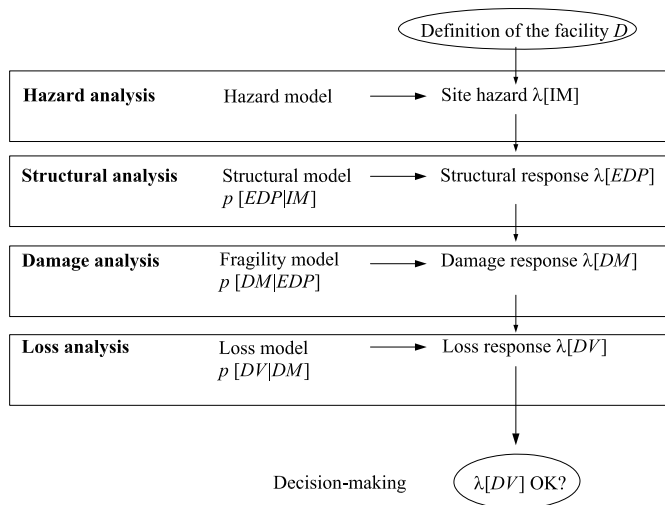


Figura 1. Schema a blocchi della metodologia PEER (Porter 2003).

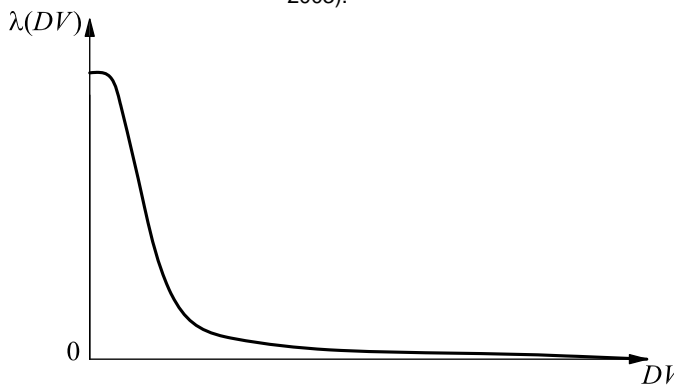


Figura 2. Curva di perdita attesa (Yang et al. 2006).

### Effetti del degrado sulle prestazioni sismiche

Nella progettazione sismica delle strutture le prestazioni del sistema si considerano tempo-invarianti e indipendenti dall'ambiente con cui la struttura interagisce. Tale approccio assume implicitamente un margine di sicurezza costante nel tempo e, di conseguenza, un livello di rischio sismico costante durante la vita di servizio dell'opera. Il rapido degrado in termini di resistenza e duttilità di strutture esposte a degrado, in particolare strutture in calcestruzzo esposte a corrosione delle barre di armatura, mostra tuttavia come tale impostazione debba essere rivista per tenere conto dell'evoluzione nel tempo delle prestazioni sismiche.

Il progetto di strutture durevoli e una corretta stima della vita residua deve operare con un approccio globale in

grado di porre in relazione l'evoluzione nel tempo del degrado e delle prestazioni strutturali non solo con le proprietà dei materiali, ma anche con la qualità dei dettagli costruttivi, la tipologia dello schema strutturale e le condizioni di esposizione, tenendo conto delle incertezze coinvolte nel problema in un quadro complessivo probabilistico (Biondini et al. 2004, 2006, Frangopol & Ellingwood 2010).

Questi aspetti risultano particolarmente importanti nell'ambito di una progettazione sismica basata sui criteri di gerarchia delle resistenze. Il degrado può infatti causare nel tempo variazioni significative delle caratteristiche di resistenza e duttilità dei singoli componenti strutturali, con possibili modifiche del meccanismo di collasso atteso e, quindi, delle capacità dissipative del sistema sismo-resistente (Biondini et al. 2011, 2014).

Recentemente sono state proposte metodologie efficaci per l'analisi a ciclo di vita e la valutazione della sicurezza di strutture in calcestruzzo soggette a corrosione considerando l'interazione fra pericolosità sismica ed esposizione ambientale (Akiyama et al. 2011, 2012, Biondini et al. 2011, 2014, Titi 2012, Titi & Biondini 2014). Particolare attenzione è stata dedicata anche alla pianificazione di attività di manutenzione di strutture e infrastrutture soggette a un degrado progressivo (Kong & Frangopol 2005, Zhou & Frangopol 2013, Barone & Frangopol 2014). I risultati di questi studi mostrano come strutture progettate per la stessa azione sismica possano avere nel tempo differenti prestazioni e costi in funzione dell'esposizione ambientale, che pertanto rappresenta un fattore determinante per una corretta valutazione del rischio sismico. Ciò dimostra la necessità di un approccio a ciclo di vita sia per la valutazione del comportamento sismico di strutture esistenti, sia per la progettazione di strutture nuove e indica come i criteri di gerarchia delle resistenze debbano tenere conto delle condizioni di aggressività ambientale e della vita di servizio richiesta. Inoltre, quando si considerano gli effetti di un danneggiamento progressivo, il processo decisionale alla base delle strategie di mitigazione del rischio deve basarsi su un insieme di indicatori prestazionali in grado

di caratterizzare non solo i livelli di sicurezza e affidabilità strutturale, ma anche la capacità del sistema di contenere entro limiti accettabili gli effetti del danno indotto da un evento sismico e di garantire una adeguata capacità di recupero che consenta di tornare, in tempi rapidi, allo stato pre-evento. Tali aspetti possono essere efficacemente racchiusi nel concetto più generale di resilienza sismica.

### **Resilienza sismica di strutture soggette a degrado**

Le prestazioni dei sistemi strutturali possono evolvere nel tempo a seguito del degrado indotto da eventi eccezionali quali urti, esplosioni, incendi ed eventi sismici. Con riferimento a tali scenari di impegno strutturale emerge la necessità di valutare, in forma quantitativa, la capacità del sistema di sostenere gli effetti del danneggiamento mantenendo le proprie prestazioni a livelli accettabili e di garantire una adeguata capacità di recupero dello stato pre-evento. A tale scopo è utile riferirsi al concetto di resilienza, che recentemente ha riscontrato un crescente interesse in diversi campi dell'ingegneria, con significativi sviluppi e applicazioni soprattutto nell'ambito della progettazione sismica di strutture e reti infrastrutturali (Bruneau et al. 2003, Chang & Shinozuka 2004, Bruneau & Reinhorn 2007, Cimellaro et al. 2010a,b, Bocchini et al. 2012, Bocchini & Frangopol 2012, Decò et al. 2013).

La resilienza viene in genere definita come la capacità di un sistema di sostenere gli effetti di un evento estremo e di ripristinare in maniera rapida le prestazioni e la funzionalità originarie (Bruneau et al. 2003). Fenomeni di degrado possono tuttavia verificarsi anche gradualmente nel tempo, a causa dell'invecchiamento dei materiali e dell'aggressività ambientale, determinando un cambiamento nel comportamento strutturale atteso e una conseguente variazione della resilienza del sistema (Titi & Biondini 2013). Le strutture in calcestruzzo armato sono particolarmente sensibili a queste forme di degrado, in quanto l'esposizione ad agenti aggressivi, come i cloruri, può innescare fenomeni corrosivi nelle barre di armatura e un danneggiamento della matrice cementizia,

determinando nel tempo una riduzione della resilienza strutturale.

Sia  $Q = Q(t)$  un indicatore di funzionalità del sistema strutturale definito nell'intervallo  $[0,1]$ , con  $Q = 1$  per il sistema non danneggiato e  $Q = 0$  per il sistema completamente danneggiato. L'eventuale perdita di funzionalità  $\Delta Q$  associata al verificarsi di un evento eccezionale al tempo  $t_0$  potrà essere recuperata in parte o integralmente in funzione delle attività di ripristino attuate nel periodo  $\Delta t = t_f - t_i$ , con  $t_i \geq t_0$  e  $t_f$  istanti iniziale e finale del processo di recupero. Una misura di resilienza è rappresentata dal valore medio della funzionalità post-evento su un assegnato orizzonte temporale  $t_h \geq t_f$  (Bocchini et al. 2012):

$$R = \frac{1}{t_h - t_0} \int_{t_0}^{t_h} Q(t) dt \quad (3)$$

Tale concetto è illustrato in Figura 3.a per  $t_i = t_0$  e  $t_h = t_f$ . Nella valutazione della resilienza si assume in genere una funzionalità costante nel tempo sia prima dell'evento, sia dopo il completamento del processo di recupero, come mostrato in Figura 3.a. In tale ipotesi, la resilienza dipende solo dal profilo di recupero  $Q = Q(t)$  nell'intervallo  $[t_0, t_h]$  e risulta indipendente dall'istante temporale  $t_0$  in cui tale evento si verifica. Nel caso di sistemi soggetti a degrado la funzionalità  $Q = Q(t)$  varia nel tempo anche in assenza di altre fonti di danneggiamento e, di conseguenza, la resilienza  $R = R(t_0)$  dipende dall'istante  $t_0$  in cui si verifica l'evento, come mostrato in Figura 3.b (Titi & Biondini 2013, Titi et al. 2014). È importante notare come la variazione nel tempo della resilienza dipende da diversi fattori relativi al processo di danneggiamento progressivo, quali lo scenario di esposizione ambientale, l'efficacia degli interventi di recupero, che possono ripristinare in parte o integralmente la funzionalità originaria della struttura integra, e il programma di manutenzione.

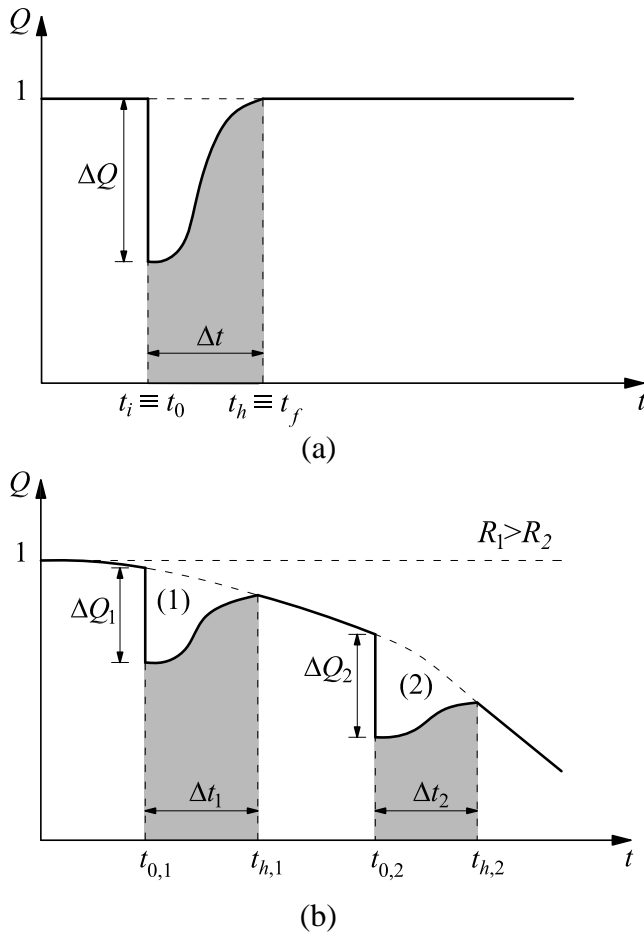
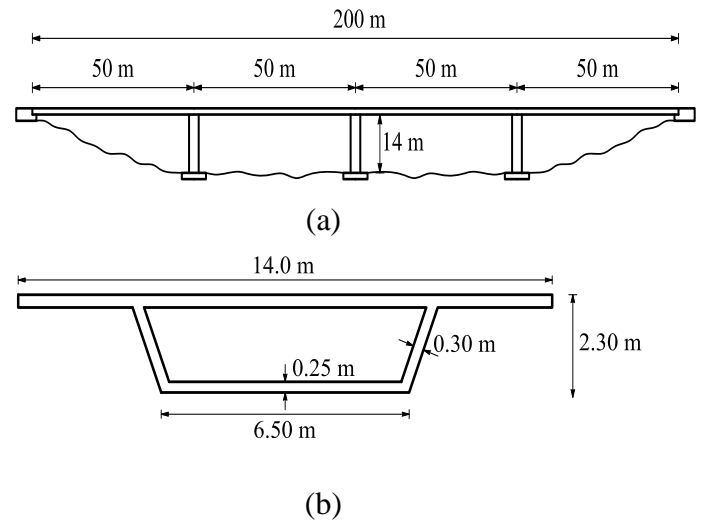


Figura 3. Funzionalità  $Q$  e misura della resilienza. (a) Sistema non soggetto a degrado, con perdita di funzionalità  $\Delta Q$  associata a un evento eccezionale all'istante  $t_0$  e successivo recupero nell'intervallo  $\Delta t = t_f - t_i$  ( $t_i = t_0$ ,  $t_h = t_f$ ). (b) Sistema soggetto a degrado: perdite di funzionalità  $\Delta Q_k$  a seguito degli eventi eccezionali  $k = 1, 2, \dots$ , agli istanti temporali  $t_{0,k}$  e conseguente recupero negli intervalli  $\Delta t_k$ .

### Valutazione a ciclo di vita della resilienza sismica di un ponte in calcestruzzo armato

Si considera il ponte in calcestruzzo mostrato in Figura 4 (Pinto et al. 1996, Ni et al. 2013, Titi et al. 2014). Per il calcestruzzo e l'acciaio si considerano resistenze nominali  $f_c = 40$  MPa e  $f_y = 450$  MPa. Si assume lo scenario di esposizione indicato in Figura 4.c, considerando un attacco da cloruri localizzati sul perimetro interno ed esterno delle sezioni trasversali delle pile. Si assumono inoltre un valore nominale della concentrazione superficiale  $C_0 = 3\%$  [wt.%/c] e un valore nominale del coefficiente di diffusione  $D = 15.8 \times 10^{-12}$

$m^2/\text{sec}$ . Il tempo di innesco della corrosione delle barre d'armatura è associato a una soglia critica di concentrazione  $C_{cr} = 0.6\%$  [wt.%/c]. La velocità di corrosione della sezione resistente delle barre di armatura si assume proporzionale al livello di concentrazione dei cloruri con coefficiente di proporzionalità  $\rho$  definito dal valore nominale  $\rho C_0 = 0.02 \text{ sec}^{-1}$  (Titi et al. 2014). Il degrado del calcestruzzo è modellato attraverso una riduzione della resistenza a compressione e dipende dal degrado delle barre di armatura come mostrato in Biondini & Vergani (2014). Si assume un carico gravitazionale uniforme sull'impalcato  $p = 315 \text{ kN/m}$ , comprensivo di peso proprio, carichi permanenti e una quota parte dei carichi variabili. Si conduce un'analisi sismica considerando un set di 10 accelerogrammi spettro-compatibili e si valuta la capacità sismica con riferimento a una soglia massima di spostamento adimensionale  $\theta_{max} = \Delta_{max}/h = 4.70\%$ , dove  $\Delta_{max}$  è il massimo spostamento e  $h$  è l'altezza delle pile. Si conduce un'analisi probabilistica sulla base dei dati forniti in Titi et al. (2014).



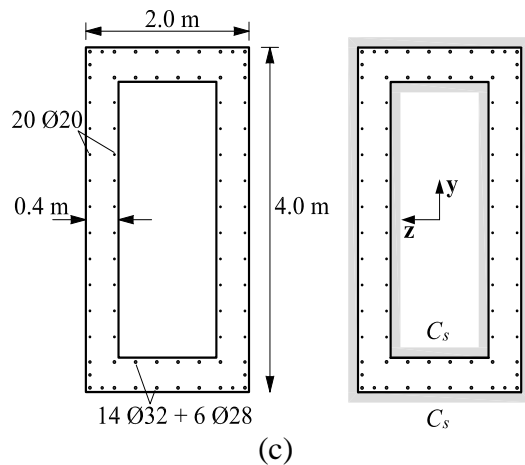


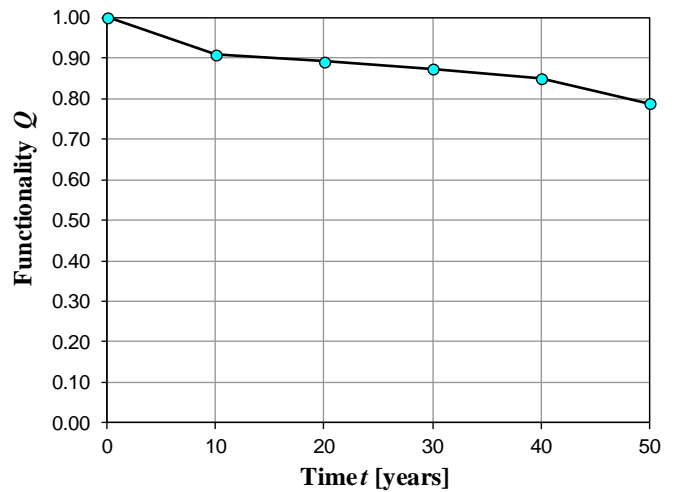
Figure 4: Ponte a travata in calcestruzzo armato. (a) Schema longitudinale del ponte. (b) Sezione dell'impalcato. (c) Sezione delle pile e scenario di esposizione.

Per la misura della resilienza sismica si considera il seguente indicatore di funzionalità  $Q = Q(t) \leq 1$ :

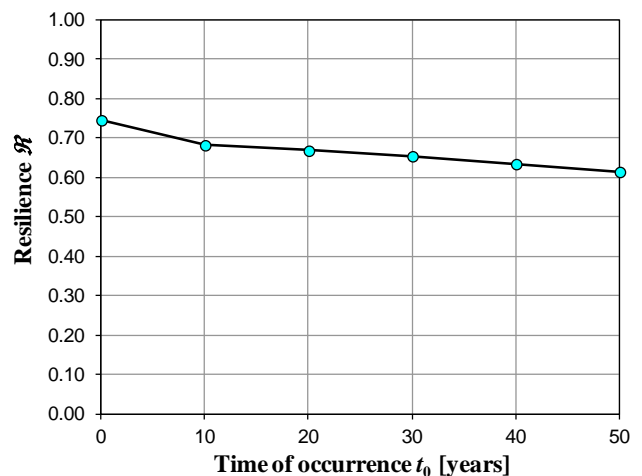
$$Q(t) = \frac{a_g(t)}{a_{g0}} \quad (4)$$

dove  $a_g = a_g(t)$  è la capacità sismica del sistema soggetto a degrado, espressa in termini di PGA, e  $a_{g0} = a_g(0)$  è la capacità del sistema non danneggiato. La Figura 5.a mostra l'evoluzione nel tempo del valore medio della funzionalità  $Q = Q(t)$  associata alla capacità sismica del ponte. La Figura 5.b mostra l'andamento del valore medio della resilienza sismica  $R = R(t_0)$  in funzione dell'istante di accadimento dell'evento sismico per una perdita di funzionalità  $\Delta Q(t_0) = 0.5 Q(t_0)$  e assumendo un profilo di recupero sinusoidale e un ripristino parziale della funzionalità originaria. I risultati di Figura 5 mostrano chiaramente come gli effetti di un danneggiamento progressivo riducono la funzionalità del sistema strutturale e, di conseguenza, rendono la resilienza dipendente dall'istante temporale in cui si verifica l'evento sismico. Ciò dimostra l'importanza di un'adeguata valutazione degli effetti combinati di danno sismico e degrado progressivo per una corretta stima della resilienza sismica di strutture soggette a degrado

ambientale. Risultati di maggiore dettaglio e ulteriori approfondimenti sono disponibili in Titi et al. (2014).



(a)



(b)

Figura 5. Ponte a travata in calcestruzzo armato esposto a corrosione. Evoluzione nel tempo del valore medio di (a) funzionalità  $Q=Q(t)$  e (b) resilienza sismica  $R=R(t_0)$ .

### Conclusioni

In questo lavoro sono stati esaminati i principali fattori che intervengono nella valutazione del rischio sismico. Si è in particolare mostrata l'importanza di un approccio a ciclo di vita nella valutazione delle prestazioni sismiche di strutture soggette a degrado, con particolare riferimento alla resilienza sismica di strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione. I risultati di una applicazione al

caso di un ponte a travata continua hanno consentito di evidenziare la necessità di considerare gli effetti combinati di danno sismico e degrado progressivo nella valutazione della resilienza e, quindi, del rischio sismico di strutture esposte a degrado ambientale.

### **Bibliografia**

- Akiyama, M., Frangopol, D.M. & Suzuki, M. (2011). *Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(15), 1671-1687.
- Akiyama, M., Frangopol, D.M. & Suzuki, M. (2012). *Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of reinforced concrete structures in a marine environment*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(2), 125–134.
- Baker, J.W. & Cornell, C.A. (2008). *Uncertainty propagation in probabilistic seismic loss estimation*. *Structural Safety*, 30(3): 236–252.
- Baker, J.W. (2013). *Probabilistic seismic hazard analysis. White Paper Version 2.0*, 79 pp.
- Barone, G. & Frangopol, D.M. (2014). *Reliability, risk and lifetime distributions as performance indicators for life-cycle maintenance of deteriorating structures*. *Reliability Engineering & System Safety*, 123, 21–37.
- Biondini, F., Bontempi, F., Frangopol, D.M., & Malerba, P.G. (2004). *Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments*. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 130(11), 1724–1737.
- Biondini, F., Bontempi, F., Frangopol, D.M., & Malerba, P.G. (2006). *Probabilistic service life assessment and maintenance planning of concrete structures*. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 132(5), 810–825.
- Biondini, F., Palermo, A. & Toniolo, G. (2011). *Seismic performance of concrete structures exposed to corrosion: case studies of low-rise precast buildings*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(1–2), 109–119.
- Biondini, F., Camnasio, E. & Palermo, A. (2014). *Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(7), 880–900.
- Biondini, F., Vergani, M. (2014). *Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion*. *Structure and Infrastructure Engineering*, (In press). DOI: 10.1080/15732479.2014.951863
- Bocchini, P., Decò, A. & Frangopol, D.M. (2012). *Probabilistic functionality recovery model for resilience analysis*. *Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012)*, Stresa, Italy, July 8-12, 2012. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, F. Biondini, D.M. Frangopol (Eds.), CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, London, UK, 2012.
- Bocchini, P. & Frangopol, D.M. (2012). *Restoration of bridge networks after an earthquake: multi-criteria intervention optimization*. *Earthquake Spectra*, 28(2), 2012, 426-455.
- Bommer, J.J. (2002). *Deterministic vs probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy*. *Journal of Earthquake Engineering*, 6:S1, 43–73.
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K.J., Wallace, W.A. & von Winterfeldt, D. (2003). *A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities*. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.

- Bruneau, M. & Reinhorn, A.M. (2007). *Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. Earthquake Spectra*, 23(1), 2007, 41-62.
- CEN-EN 1998-1 (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.*
- Chang, S.E. & Shinozuka, M. (2004). *Measuring improvements in the disaster resilience of communities. Earthquake Spectra*, 20(3), 2004, 739-755.
- Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. & Bruneau, M. (2010a). *Seismic resilience of a hospital system. Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 127-144.
- Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. & Bruneau, M. (2010b). *Framework for analytical quantification of disaster resilience. Engineering Structures*, 32(11), 3639-3649.
- Cornell, C.A. (1968). *Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606.
- Crowley, H., Colombi, M., Borzi, B., Faravelli, M., Onida, M., Lopez, M., Polli, D., Meroni, F. & Pinho, R. (2009). *A comparison of seismic risk maps for Italy. Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1), 149–180.
- D.M. 14/01/2008 – *Norme Tecniche per le Costruzioni, Italy.*
- Decò, A., Bocchini, P. & Frangopol, D.M. (2013). *A probabilistic approach for the prediction of seismic resilience of bridges. Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(10), 1469-1487.
- Deierlein, G.G. (2004). *Overview of a comprehensive framework for earthquake performance assessment. International Workshop on Performance-Based Seismic Design, Bled, Slovenia, 28 Giugno – 1 Luglio, 2004. In: Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation, P. Fajfar & H. Krawinkler (Eds.), PEER Report 2004/05, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA.*
- Ellingwood, B. (2005). *Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: state of practice and research issues. Structure and Infrastructure Engineering*, 1(1), 7–18.
- Ellingwood, B.R., Celik, O.C. & Kinali, K. (2007). *Fragility assessment of building structural systems in Mid-America. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(13): 1935–1952.
- Faccioli, E. & Paolucci, R. (2005). *Elementi di Sismologia applicate all'Ingegneria. Pitagora Editrice Bologna, Bologna, Italy.*
- Frangopol, D.M. & Ellingwood, B.R. (2010). *Life-cycle performance, safety, reliability and risk of structural systems. Editorial, Structure Magazine, Joint Publication of NCSEA, CASE, SEI.*
- Goulet, C.A., Haselton, C.B., Mitrani-Reisner, J., Beck, J.L., Deierlein, G.G., Porter, K.A. & Stewart, J.P. (2007). *Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete frame building – from seismic hazard to collapse safety and economic losses. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(13): 1973–1997.
- Guagenti, E.G. & Brambilla, M. (1986). *Rischio e soglia di rischio accettabile nei problemi di pianificazione ambientale. Edizioni Clup, Milano.*
- Kong, J.S. & Frangopol, D.M. (2005). *Probabilistic optimization of aging structures considering maintenance and failure costs. Journal of Structural Engineering, ASCE*, 131(4), 600–616.

- Lupoi, G., Franchin, P., Lupoi, A. & Pinto, P.E. (2006). Seismic fragility analysis of structural systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(4): 385–395.
- McGuire, R.K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, USA.
- Ni, P., Petrini, L. & Paolucci, R. (2014). Direct displacement-based assessment with nonlinear soil-structure interaction for multi-span reinforced concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(9): 1211–1227.
- Pinto, A.V., Verzeletti, G., Magonette, G., Pegon, P., Negro, P. & Guedes, J. (1996). Pseudo-dynamic testing of large-scale R/C bridges in ELSA. 11th World Conference on Earthquake Engineering (11th WCEE), Acapulco, Mexico, June 23-28.
- Porter, K.A. (2003). An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology. 9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9), 6–9 Luglio, 2003, San Francisco, CA, USA. In: *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, A. der Kiureghian, S. Madanat & J.M. Pestana (Eds.), Ios Press Inc, Amsterdam, The Netherlands, 2003.
- Thibert, K.M. (2008). *A methodology for assessing the seismic risk of buildings*. Tesi Magistrale, The University of British Columbia, Canada.
- Titi, A. (2012). *Lifetime probabilistic seismic assessment of multistory precast buildings*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano, Italy.
- Titi, A. & Biondini, F. (2013). Resilience of concrete frame structures under corrosion. 11th International Conference on Structural, Safety & Reliability (ICOSSAR 2013), New York, NY, USA, June 16-20, 2013. In: *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures*, G. Deodatis, B.R. Ellingwood, D.M. Frangopol (Eds.), CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, London, UK, 2014.
- Titi, A. & Biondini, F. (2014). Probabilistic seismic assessment of multistory precast concrete structures exposed to corrosion. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (In press). DOI: 10.1007/s10518-014-9620-2
- Titi, A., Biondini, F. & Frangopol, D.M. (2014). Lifetime resilience of aging concrete bridges under corrosion. Seventh International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2014), Shanghai, China, July 7-11, 2014. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, A. Chen, D.M. Frangopol & X. Ruan (Eds.), CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, London, UK, 2014.
- Wen, Y.K., Ellingwood, B.R. & Bracci, J.M. (2004). Vulnerability function framework for consequence-based engineering. Mid-America Earthquake Center Project DS-4 Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA.
- Wen, Y.K. & Ellingwood, B.R. (2005). The role of fragility assessment in consequence-based engineering. *Earthquake Spectra*, 21(3): 867–877.
- Yang, T.Y., Moehle, J., Stojadinovic, B. & der Kiureghian, A. (2006). An application of PEER performance-based earthquake engineering methodology. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 18–22 Aprile, 2006, San Francisco, CA, USA. In: *Proceeding of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Oakland, CA, USA.
- Zhou, B. & Frangopol, D.M. (2013). Risk-based approach for optimum maintenance of bridges under traffic and earthquake loads. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 139(3), 422–434.

# RISCHIO IDROGEOLOGICO LUNGO LE STRADE DELLA REGIONE LOMBARDIA

Cinzia Secchi\*, Massimo Ceriani\*, Carmela Melzi\*, Laura Scesi\*\*

\* D.G. Sicurezza, Protezione Civile /U.O. Sistema Integrato di Prevenzione, Regione Lombardia

\*\* DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

## **Premessa**

Il Comitato Tecnico 1.5, che opera all'intero del Tema Strategico 1: Gestione e prestazioni, ha focalizzato la propria attenzione sul ruolo delle politiche di gestione e pianificazione delle emergenze, includendo quindi tutti quei fattori che determinano le cause scatenanti e le conseguenze dei fenomeni. Il presente contributo si inserisce all'interno di tale problematica e, nello specifico, viene analizzato il rischio idrogeologico lungo le infrastrutture stradali della regione Lombardia.

## **Rischio idrogeologico**

I dissesti idrogeologici rappresentano per il nostro paese un problema di notevole rilevanza e attualità, visti gli ingenti danni arrecati, e determinano la perdita di molte vite umane.

In Italia il rischio idrogeologico è diffuso in modo capillare e varia a seconda dell'assetto geomorfologico del territorio: frane in tutte le zone montane, alpine e il programma prevede l'analisi e la mappatura regionale di diversi rischi (sismico, meteorologico, tecnologico, incidenti stradali, incendi, incidenti sul lavoro e anche quello idrogeologico).

Tra i fattori naturali che predispongono il nostro territorio a frane e alluvioni, rientra senza dubbio la conformazione geologica e geomorfologica.

Oltre a tali fattori naturali il rischio idrogeologico è condizionato fortemente dall'intervento dell'uomo e dalle continue modificazioni del territorio che hanno, da un lato, incrementato la possibilità di accadimento di tali fenomeni e dall'altro, aumentato la presenza di beni e di persone nelle zone dove tali eventi erano possibili e si sono poi manifestati. L'occupazione delle aree golenali con insediamenti abitativi o industriali, la presenza di aree inquinate e discariche abusive, la cementificazione e il disboscamento selvaggio lungo i fiumi, oltre all'insufficiente manutenzione geologica-idraulica del

territorio, hanno sicuramente aggravato le condizioni di un territorio già di per sé strutturalmente fragile.

Ancora più pericolosi questi fenomeni lo sono se avvengono in prossimità di strade interessate da elevato traffico veicolare causando disagi dovuti a lunghe interruzioni di vie di comunicazioni fondamentali per l'economia del nostro paese, danneggiamenti delle infrastrutture e perdita di vite umane (Figure 1, 2, 3, 4 e 5).



Figura 1: Il crollo del terrapieno sulla provinciale 38 Olbia-Tempio in cui sono morte 3 persone (18 Novembre 2013)

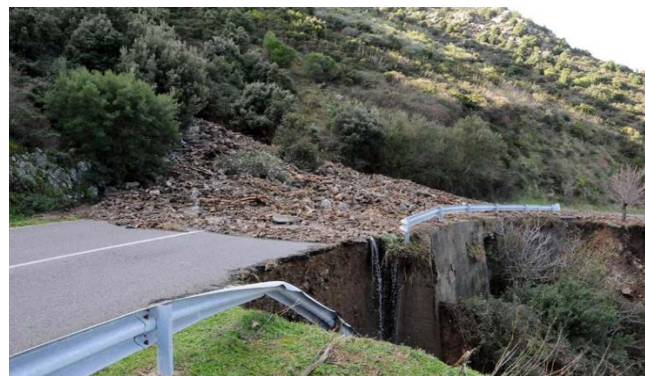


Figura 2: Dissesto lungo una strada nella zona di Olbia



Figura 3: Immagine dell'alluvione del 18 Novembre 2013



Figura 4: Interruzione dei flussi di traffico



Figura 5: Rottura della pavimentazione stradale

### **Gestione e manutenzione della rete stradale italiana**

In Italia la gestione e la manutenzione ordinaria delle strade extraurbane è demandata ai seguenti Enti:

- ANAS per la rete statale
- Province per la rete provinciale
- Regioni: forniscono le direttive e gli indirizzi agli Enti Locali (es. Comuni)

Per quanto riguarda invece la “Programmazione degli interventi di ammodernamento” le competenze sono:

- Del Ministero delle Infrastrutture per la rete statale (Programmi triennali)
- Delle Regioni e Province per la rete provinciale (Programmi D.lgs112/98)

Esaminando il caso specifico della Regione Lombardia, l'estensione chilometrica della sua rete stradale supera i 70.000 km. In dettaglio: le Autostrade rappresentano l'1% della rete lombarda ed hanno lunghezza pari a 560km; le Strade Statali rappresentano il 2% con lunghezza totale pari a 900 km; le Strade Provinciali rappresentano il 16% con una lunghezza di 11.000 km

ed infine le Strade Comunali sono la maggioranza e rappresentano l'81% con una estensione di 58.000 km.

### **Gestione del rischio in Regione Lombardia**

Al fine di costruire le politiche regionali sulla sicurezza dei cittadini, coniugando gli aspetti della safety e della security, è stato definito un Programma Regionale integrato di Mitigazione dei rischi denominato PRIM (Programma Regionale Integrato di Mitigazione dei rischi) 2007-2010.

La più innovativa caratteristica del PRIM è il passaggio da una logica di semplice “gestione del rischio” (risk management) a quella più complessa e articolata di “governo del rischio” (risk governance), ottenuta accoppiando l'analisi e la valutazione del rischio integrato con una opportuna sequenza di politiche di prevenzione e mitigazione.

Tale approccio richiede una specifica definizione di analisi multi-rischio in grado di riconoscere le differenze qualitative tra le differenti tipologie di rischio, la scelta di un opportuno quadro operativo e la rappresentazione territoriale (mappatura) del rischio integrato (Figura 6). Lo scopo generale del PRIM è quello di identificare le aree più critiche a livello regionale al fine di sviluppare una specifica strategia di mitigazione dei rischi.

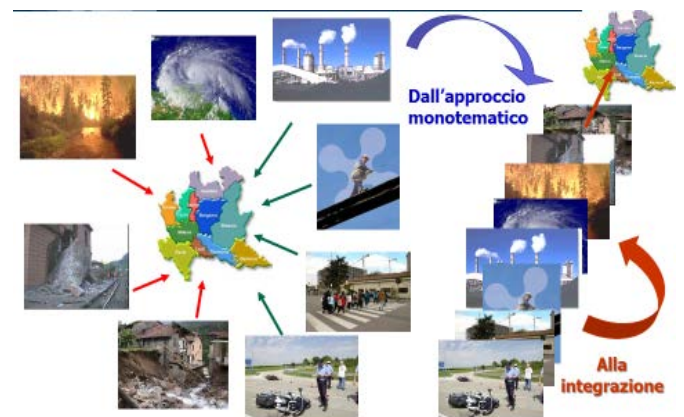


Figura 6: Metodologia PRIM (Integrated Regional Program for risk Mitigation)

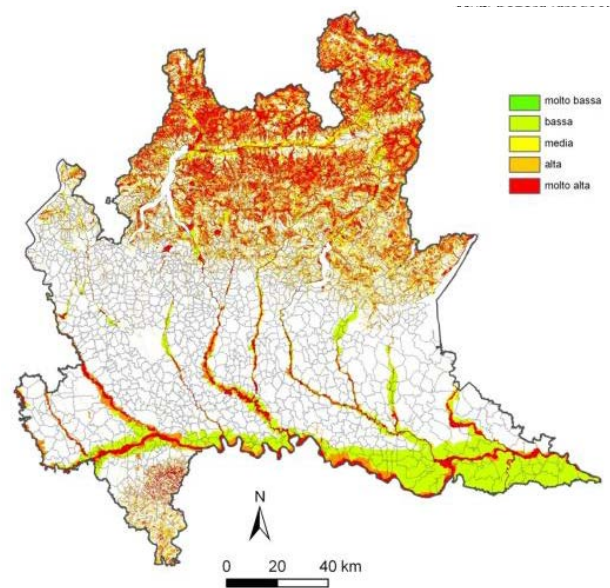
Nella sua accezione canonica, il rischio può essere definito come una funzione della probabilità di occorrenza di un dato evento, della magnitudo del fenomeno e dei danni che esso può arrecare. L'analisi di rischio viene quindi tradizionalmente condotta con l'ausilio di modelli matematici. Essi, a partire da

serie storiche di dati e tramite l'acquisizione di specifiche informazioni analitiche, valutano la probabilità che un certo evento si verifichi in un certo luogo, in un determinato tempo e con una certa intensità e pericolosità. Sottoponendo un modello del sistema bersaglio (esposto e vulnerabile) alle sollecitazioni previste, si delineano gli scenari possibili e si stimano i danni materiali che ne possono conseguire. Nel caso del PRIM la valutazione del rischio consiste nell'individuare le aree ad elevata criticità, dove l'azione integrata di diverse tipologie di rischio (**Rischi naturali** (incendio forestale, idrogeologico, sismico e meteo-climatico); **Rischi tecnologici** (industriale); **Rischi legati ad eventi socialmente rilevanti** (incidenti stradali, incidenti sul lavoro ed insicurezza urbana) deve essere contrastata con appropriatezza ed incisività.

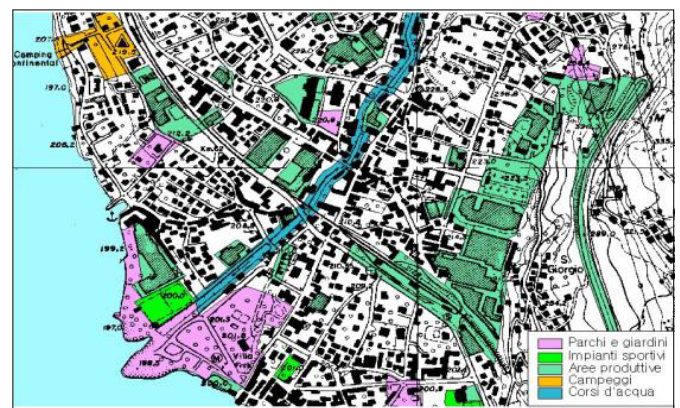
Per l'elaborazione del PRIM è stato sviluppato un sistema, prevalentemente basato su tecniche di analisi spaziale, che ha consentito:

- Di produrre mappe che riportano il livello di criticità regionale per ogni singolo rischio identificato dal PRIM (Figura 7a);
- Di integrare tali mappe con un approccio analitico per identificare gli elementi a rischio (hot spot o elementi sensibili) a cui viene attribuito un peso (Figura 7 b e c) e verso i quali indirizzare gli interventi di mitigazione.
- Di produrre sia mappe relative alle singole tipologie di rischio (Figura 8) sia mappe relative a tutti i rischi considerati (mappe di rischio integrato – Figura 9)

Nell'approccio adottato, i termini "rischio" e "rischio integrato" vanno sempre intesi come "grado o livello di criticità" o "insicurezza". La metodologia adottata identifica infatti come aree "a rischio" quelle in cui si verifica la presenza concomitante di sorgenti di pericolo e di elementi esposti a tali sorgenti e ad esse vulnerabili, considerato il grado di resilienza (o coping capacity) del territorio.



a)



b)

#	Elemento a rischio	vite	ambientale	econ diretto	econ ind	strategico	peso
1	RESID. CONT.	5	0	5	4	2	0.7187
2	RESID. DISCON.	4	0	4	3	2	0.5866
3	VIABILITA' PRI.	4	0	3	4	4	0.6166
4	VIABILITA' SEC.	3	0	2	3	3	0.2766
5	RETE FERROV.	4	0	3	4	5	0.6359
6	RETE ELETTR.	0	0	1	4	4	0.7353
7	IMPIANTI ELET.	0	0	4	4	3	0.6027
8	SCUOLE	5	0	4	1	4	0.772
9	OSPEDALI	5	0	5	5	5	0.9318
10	STRUTT.TURIST.	2	0	3	1	1	0.2555
11	STRUTT. SPORT	2	0	1	1	1	0.0855
12	RIR	3	0	4	4	0	0.5888
13	STAZIONI	4	0	4	4	4	0.7663
14	AEROPORTI	4	0	3	4	1	0.6024
15	AREE PRODUTT.	4	0	4	4	2	0.6928
16	BOSCHI FUSTO	0	2	1	0.2	0	0.0174
17	BOSCHI CEDUI	0	1	0.5	0.2	0	0.0055
18	VEGETAZ.RIPAR	0	1	0	0.2	0	0.0032
19	PRATI	0	1	0	0.2	0	0.0032
20	AREE PROTETT	0	3	0.5	0.2	0	0.014
21	COLTURE LEGN	0	1	1	1	1	0.0171
22	COLTURE SEMI	0	1	1	1	1	0.0171
23	VERDE	1	1	1	1	1	0.019
	Peso	1	0.001	0.8	0.7	0.7	

c)

Figura 7: a) esempio di carta della pericolosità idrogeologica; b) esempio di carta dei bersagli sensibili; c) esempio dei pesi attribuiti ai vari bersagli sensibili

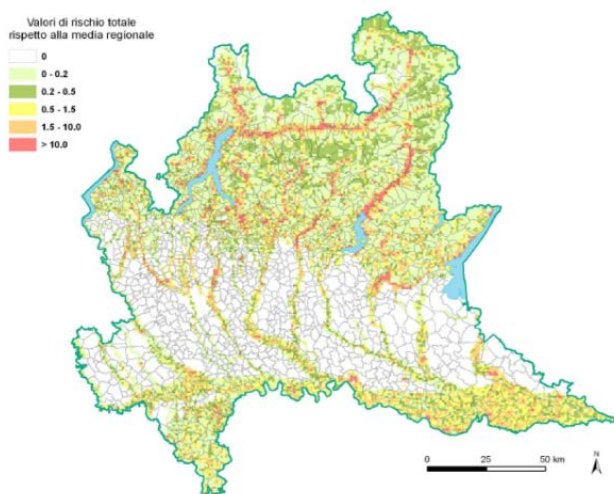


Figura 8: esempio di carta del rischio idrogeologico

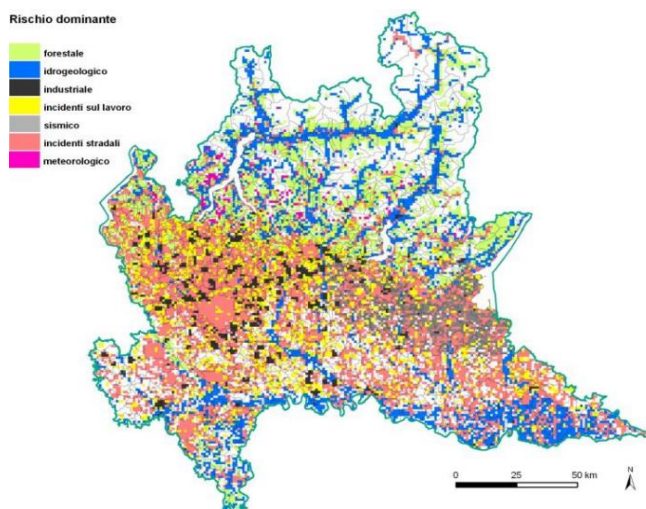


Figura 9: esempio di carta del rischio dominante

Il 14 dicembre 2010 è stato firmato un protocollo d'intesa tra Regione Lombardia e gli Enti gestori delle infrastrutture critiche (per il settore energia i distributori di gas ed elettricità; per il settore trasporti i gestori di strade, ferrovie, aeroporti). Scopo fondamentale del Protocollo è di garantire sempre maggiori misure di efficacia ed efficienza del sistema delle Infrastrutture Critiche nel territorio lombardo ed in particolare si procede a scambiare informazioni e banche dati, individuare le aree critiche, avere un censimento dei sistemi di monitoraggio e delle azioni di resilienza,

condividere e azioni per ridurre la vulnerabilità e/o l'impatto, condividere le priorità, nonché delineare piani coordinati per gestire situazioni critiche e/o emergenziali.

Un esempio di un'area di particolare interesse per le infrastrutture critiche riguarda l'area dei "Torrioni di Rialba" (comune di Abbadia Lariana in provincia di Lecco), dove la S.S. 36 e la linea ferroviaria Milano - Lecco - Sondrio sono potenzialmente minacciate dal crollo di imponenti masse rocciose costituite dai Conglomerati di Rialba (Figura 10). L'area è attualmente monitorata con sensori sperimentali sviluppati dal Politecnico di Milano nell'ambito di un progetto INTERREG ITALIA - SVIZZERA.



Figura 10: Area dei torrioni di Rialba, con al piede la SS 36 e la linea ferroviaria Milano-Lecco-Sondrio. Nei riquadri un particolare delle fratture che interessano i Torrioni di Rialba e i fenomeni franosi che interessano le Infrastrutture Critiche.

Il Politecnico ha quindi effettuato una approfondita analisi tecnico-scientifica a supporto delle decisioni prendendo in considerazione altri due aspetti:

- Il primo riguarda l'analisi della rete stradale principale della Regione Lombardia per identificare tutte quelle arterie prive di strade alternative in occasione di un evento naturale calamitoso (ad esempio una frana);
- Il secondo è stato quello di definire quale tipo di azione deve essere intrapresa una volta determinate le strade a rischio. Tutto ciò per garantire che tali strade siano sempre percorribili e sicure.

Per prima cosa sono state cartografate le frane presenti su tutto il territorio regionale (Figura 11). A tale carte è stata sovrapposta la carta inerente la rete viabilistica lombarda (Figura 12). Quindi si sono identificati solo i dissesti presenti lungo le strade (Figura 13).

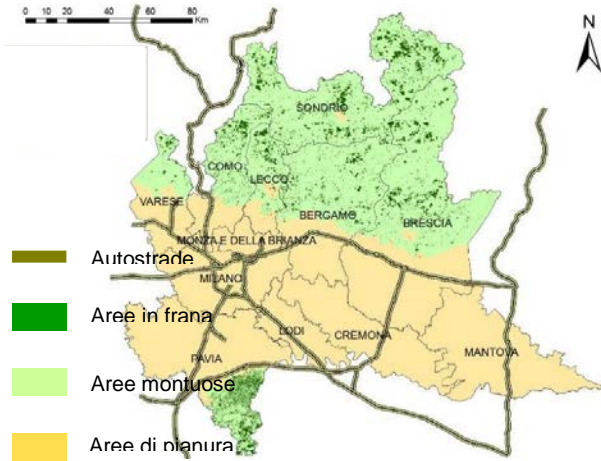


Figura: 11: censimento delle aree in frana i Regione Lombardia (da APAT, Rapporto sulle frane. Il Progetto IFFI – Metodologia, risultati e rapporti regionali- 2007)

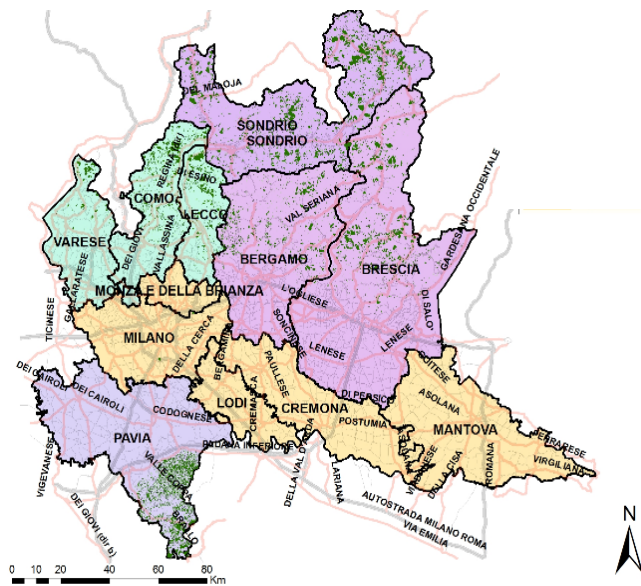


Figura 12: aree in frana lungo le principali arterie della Regione Lombardia

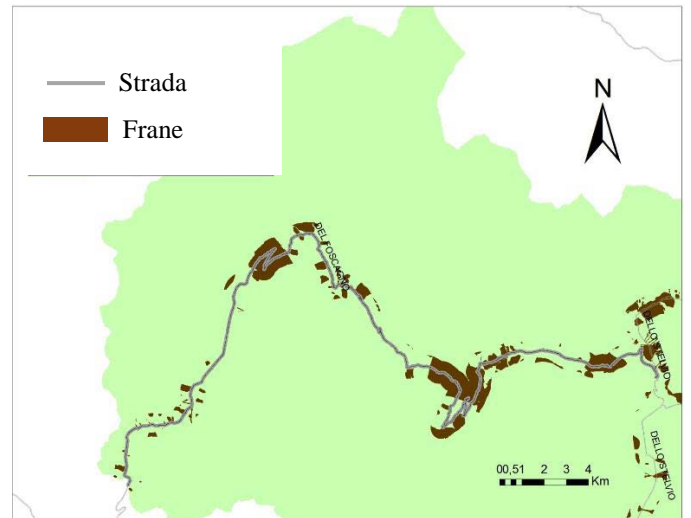


Figura 13: particolare che mostra le aree in frana lungo un'arteria stradale lombarda.

Infine si è determinato un indice che definisce il “rischio Idrogeologico lungo le strade” (Hydrogeological Road Risk).

$$HRR = f \times TV \times (\alpha \times \beta \times \gamma)$$

Tale indice si ricava moltiplicando i seguenti fattori:

- f = la frequenza delle frane (percentuale di strada in frana rispetto alla lunghezza della strada considerata), Figura 14
- TV = Il volume di traffico (Figura 15)
- $\alpha$  = il coefficiente di occupazione
- $\beta$  = la sismicità (Figura 16)
- $\gamma$  = la presenza o meno di strade alternative (strade che richiedono un tempo di percorrenza non superiore ad una volta e mezzo il tempo di percorrenza in condizioni ottimali)

Per quanto riguarda il volume di traffico si è considerato il valore massimo nelle quattro stagioni considerate. Il coefficiente di occupazione è stato valutato in funzione della tipologia di traffico (si è considerato un valore medio pari a 1.76), mentre per la sismicità si sono considerati tre livelli di rischio (alto = 1.5; medio = 1.2 e basso = 1.0). Infine è stato attribuito un coefficiente pari a 1.5 in caso di strade prive di alternative, un coefficiente pari a 1.2 alle strade aventi parziali

alternative e un coefficiente pari a 1 alle strade prive di alternative.

Al termine dell'elaborazione si sono individuate le strade a maggior indice HRR e quindi le strade che presentano un elevato rischio idrogeologico (Figure 17 e 18).

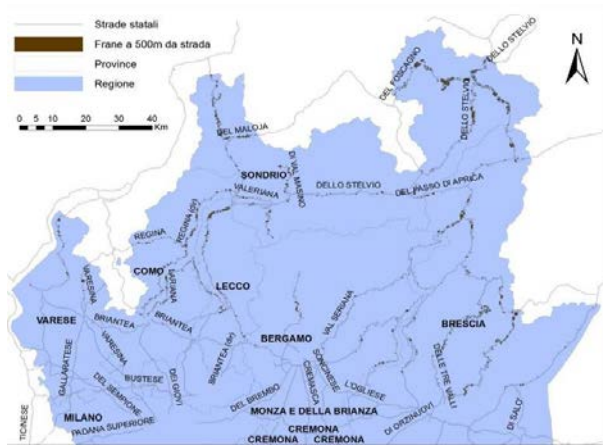


Figura 14: carta delle principali frane presenti lungo le strade

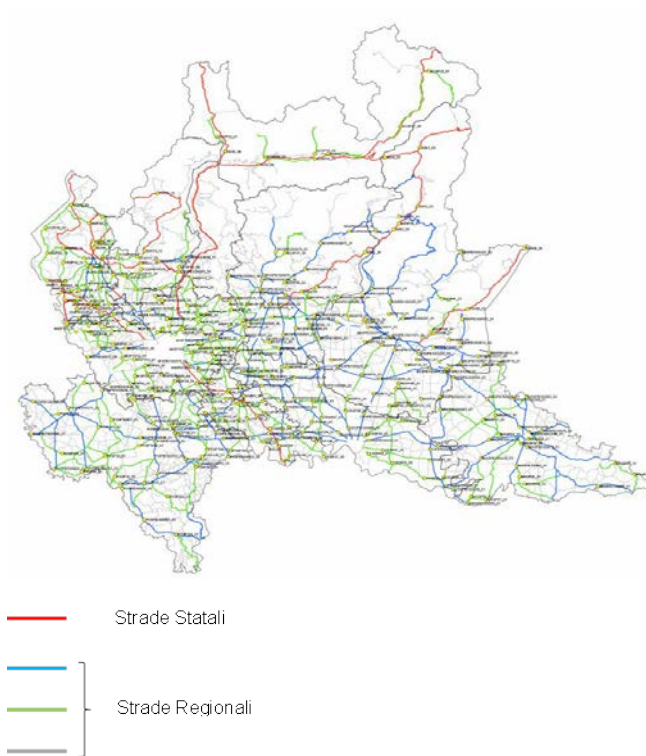


Figura 15: traffico giornaliero medio

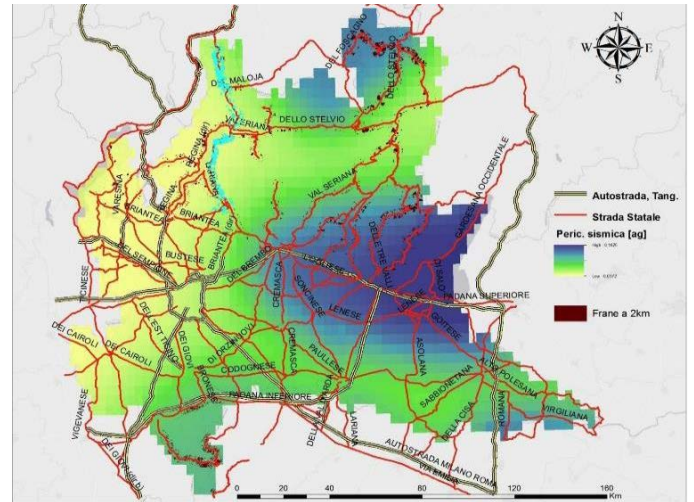


Figura 16: carta della sismicità

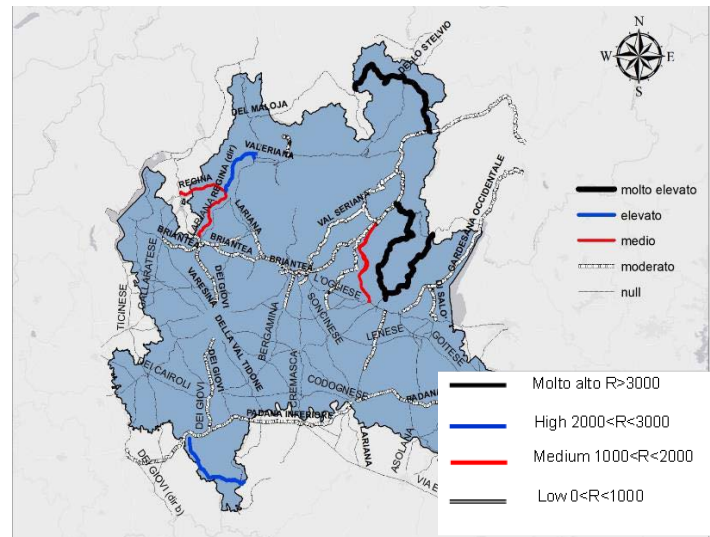


Figura 17: carta dell'indice HRR

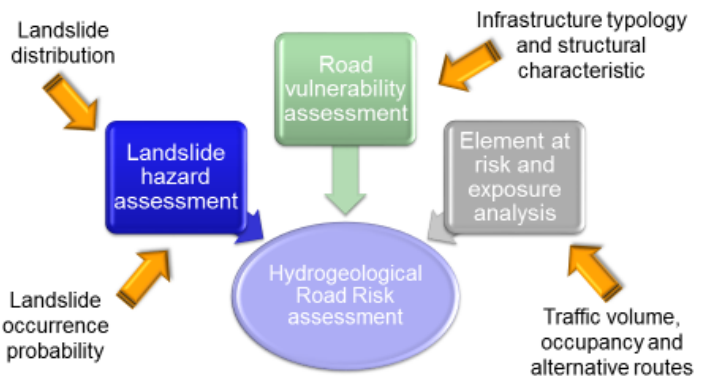
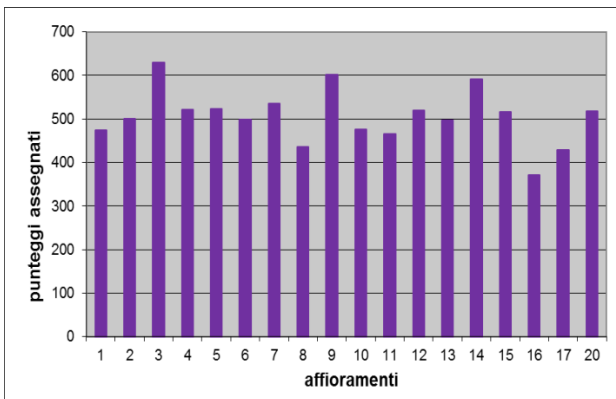


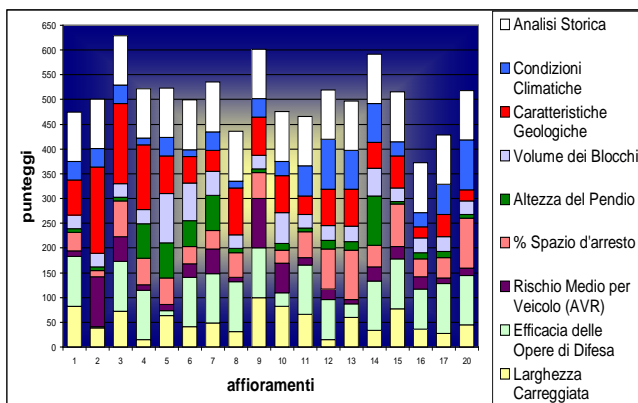
Figura 18: schema di lavoro che ha permesso di individuare l'Hydrogeological Road Risk

Solo per queste strade si è quindi cercato di fornire indicazioni circa le priorità degli interventi da effettuare per mettere in sicurezza le vie di comunicazione. E' stato utilizzato il metodo RHRS che prende in

considerazione sia i fattori ambientali che quelli legati alla geometria, al tipo di strada e alle sue caratteristiche costruttive. Ciò permette di capire quali sono i tratti di strada che necessitano di un intervento immediato e se questo intervento riguarda prevalentemente gli aspetti costruttivi o gli aspetti ambientali (Figure 19a, 19b e 19c).



a)



b)

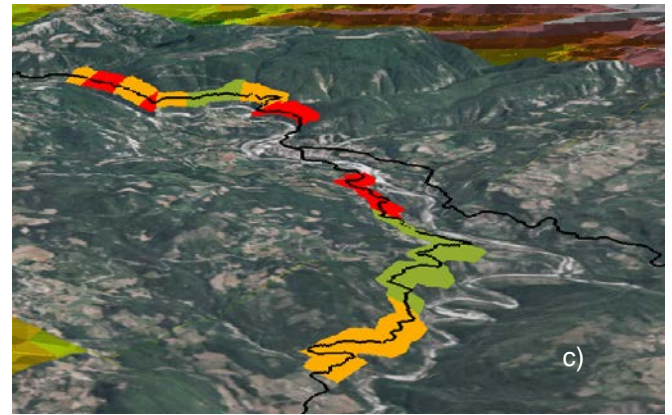


Figura 19: esempio di applicazione lungo un tratto stradale del metodo RHRs: a). Punteggi totali ottenuti in seguito all'analisi effettuata per tutti gli affioramenti considerati; b) Punteggi disaggregati; c) individuazione dei tratti a priorità alta (colore rosso)

### Conclusioni

Le collaborazioni e le attività di studio e di indagine intraprese dalla Pubblica Amministrazione, dalle Università e dai Gestori delle infrastrutture è senz'altro la modalità più indicata per individuare le criticità e per definire le priorità di intervento, onde poi programmare gli interventi strutturali e non strutturali atti a risolvere le problematiche individuate o comunque a mitigare il rischio esistente.

# LA GESTIONE DEI TRASPORTI IN EMERGENZA: ATTIVITÀ, PRODOTTI E RISULTATI DELL'ESERCITAZIONE NAZIONALE DI PROTEZIONE CIVILE IN VALTELLINA

Luca Studer, Giovanna Marchionni, Fabio Borghetti, Paolo Gandini, Marco Ponti, Roberto Maja  
*Laboratorio Mobilità e Trasporti – Dip. Design - Politecnico di Milano*  
*luca.studer@polimi.it; www.trasporti.polimi.it*

## **Premessa**

Il presente articolo riporta l'esperienza maturata dal Laboratorio Mobilità e Trasporti del Politecnico di Milano in qualità di Centro di Competenza per la Gestione e la Sicurezza dei Trasporti per il Dipartimento di Protezione Civile Nazionale durante l'esercitazione nazionale di Protezione Civile in Valtellina.

Le attività svolte, i prodotti realizzati e utilizzati ma soprattutto i risultati e l'esperienza emersi da una esercitazione temporalmente estesa e di estremo rilievo in ambito di Protezione Civile, si ritiene siano ancora estremamente attuali e utili come esempio per la gestione dei trasporti in caso di emergenze rilevanti.

## **Introduzione**

L'esercitazione Nazionale di Protezione Civile Valtellina 2007 ha simulato una situazione meteorologica simile a quella verificatasi nel Luglio 1987 con il conseguente accadimento di fenomeni di tipo franoso ed alluvionale, ed ha interessato le province di Brescia, Bergamo, Como, Lecco e Sondrio. L'esercitazione ha portato alla simulazione di situazioni critiche diffuse sul territorio e ha coinvolto complessivamente 27 comuni appartenenti alle suddette province.

La risposta operativa per fronteggiare gli effetti dell'evento simulato ha richiesto l'impiego di risorse e poteri straordinari (evento di tipo C, ai sensi del comma 2 lettera c) previsti dalla L 225/1992.

Lo scopo principale è stato quello di far prendere coscienza del ruolo che ciascuna componente del sistema di protezione civile deve svolgere durante un evento reale e di testare il modello di risposta pianificato, utilizzando linguaggi e procedure comuni e condivise a livello nazionale.

Coerentemente con le finalità dell'esercitazione il Laboratorio Mobilità e Trasporti ha potuto, partecipando attivamente a tutte le fasi dell'esercitazione, perseguire i seguenti obiettivi:

- realizzare un primo prototipo operativo di sistema informativo della rete stradale e di sistema di supporto alle decisioni sviluppato per l'area territoriale interessata dall'esercitazione;
- testare la validità dei contenuti e delle funzioni del sistema informativo sviluppato;
- testare le procedure di indirizzamento e telecontrollo della colonne mobili dei soccorritori;
- identificare le criticità emerse nell'utilizzo e nella gestione della rete dei trasporti durante una situazione di crisi (seppure simulata) e di conseguenza affinare gli strumenti teorici in fase di sviluppo per rispondere con efficacia alle problematiche di gestione del traffico in emergenza.

## **Attività svolte**

Durante l'esercitazione gli Autori del presente contributo erano presenti nei punti di particolare interesse per la gestione della viabilità:

- nella sala Di.Coma.C all'interno della funzione logistica, viabilità e trasporti dove, in accordo con le altre componenti preposte alla gestione della viabilità (ANAS, RFI, Trenitalia e Società Autostrade), hanno contribuito alla gestione dell'emergenza fornendo informazioni sulla viabilità, suggerendo provvedimenti di gestione del traffico e controllando in tempo reale il movimento dei mezzi di soccorso;
- presso il Check Point di Lecco Bione, ovvero un'area esterna alle caotiche aree dove si è verificata l'emergenza, ideata per dare ospitalità alle colonne mobili. La funzione del check point è stata quella di filtrare il flusso delle risorse verso le zone colpite permettendo il transito solo quando gli Organi superiori lo hanno ritenuto opportuno. Il Centro di Competenza, in accordo con le organizzazioni di volontariato operanti in tale area, ha realizzato e compilato il "database colonne mobili", fornito le informazioni relative

all'itinerario calcolato alle colonne mobili in partenza e distribuito gli apparecchi radio indispensabili per eseguire il telecontrollo dalla sala Di.Coma.C.

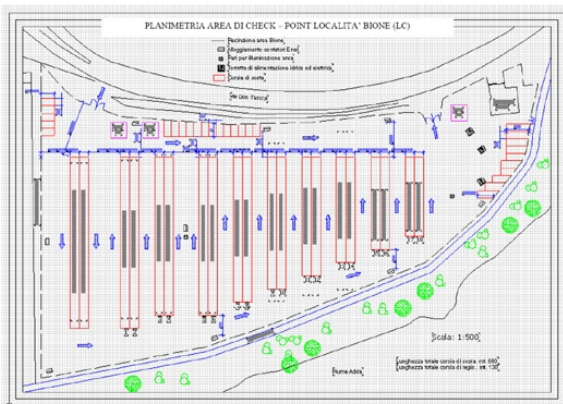


Figura 2-1 – Check Point di Lecco Bione: planimetria e dettaglio di un'area di sosta.

- nella Sala Operativa provinciale di Lecco o sala CE.SI. (Centro Situazioni) dove la Provincia di Lecco svolge le seguenti funzioni:
  - monitoraggio delle condizioni meteo e degli eventi calamitosi in atto sul territorio provinciale, attraverso l'acquisizione di informazioni dalle centraline meteo e direttamente dagli avvisi da parte degli operatori in loco nella specifica situazione di criticità;
  - informazione alla popolazione attraverso anche la diffusione di comunicati stampa;
  - supporto alle decisioni in fase di emergenza, in sinergia con la sala di emergenza unificata della Prefettura/Provincia di Lecco;
  - attivazione dei servizi urgenti così come indicato nel Piano Provinciale di Emergenza.

In particolare, è stato testato il servizio di messaggistica in tempo reale sulla viabilità predisponendo l'inoltro di

messaggi SMS contenenti informazioni aggiornate sulle varie fasi dell'esercitazione a vari soggetti diversamente coinvolti.

Sempre da parte del personale del Centro di Competenza, all'interno della sala CE.SI., è stato aggiornato il sito dei settori di Viabilità e Protezione Civile della Provincia di Lecco, dedicato all'esercitazione, in modo da fornire agli utenti e alla popolazione informazioni e immagini in tempo reale.

Le principali attività del Laboratorio Mobilità e Trasporti svolte durante l'esercitazione possono essere classificate nei punti descritti di seguito.

#### *Monitoraggio della viabilità e gestione del traffico ordinario*

Il Centro di Competenza nell'ambito dell'esercitazione ha fornito una visione generale e in tempo reale della situazione viabilistica della rete stradale principale nelle aree provinciali interessate dall'esercitazione.

In particolare oltre allo stato in tempo reale della rete stradale principale dell'area interessata è stata visualizzata l'ubicazione dei punti di interesse per la gestione dell'emergenza (aree e luoghi interessati da eventi, strade interrotte, ubicazione di "check point", aree di ammassamento, centri operativi) ed eventuali altri importanti eventi rilevanti non pianificati che hanno coinvolto la rete stradale (interruzioni non programmate, blocchi della circolazione, ecc.).

Sono stati inoltre elaborati e visualizzati gli itinerari alternativi di media e lunga percorrenza per la gestione traffico ordinario in seguito all'interruzione di alcune tratte stradali interessate dagli eventi. Lo sviluppo degli itinerari è stato finalizzato a garantire, quando possibile, i principali collegamenti viabilistici tra le diverse aree provinciali e vallate alpine e a minimizzare i disagi per l'utenza stradale. L'opportunità di attivare gli itinerari alternativi proposti è stata valutata con gli altri soggetti interessati all'interno della Di.Coma.C in modo da ridurre al minimo le interferenze tra il traffico ordinario e le colonne mobili dei mezzi di soccorso. Particolare attenzione è stata posta inoltre all'individuazione degli snodi di traffico dove fornire informazioni all'utenza riguardanti la chiusura delle strade e gli itinerari alternativi, e alla tipologia e modalità di fornitura dei messaggi di informazione (messaggi testuali su PMV sulla rete autostradale limitrofa, predisposizione di cartellonistica, presidi

da parte di apposito personale, utilizzo di vettori di diffusione di massa, ecc.).

La tempistica di attuazione degli itinerari e le relative informazioni da diffondere all'utenza sono state determinate in base ad un'analisi in tempo reale dell'effettivo stato di percorribilità delle diverse sezioni stradali.

#### *Definizione degli itinerari dei soccorritori*

Sono stati elaborati Piani di Gestione dei Trasporti in Emergenza o TEMP - Transport Emergency Management Plan, finalizzati alla individuazione dei percorsi più efficienti per le colonne di soccorritori in avvicinamento alle zone colpite in funzione delle condizioni di carico prevedibili sulla rete.

Il Centro di Competenza ha quindi elaborato un itinerario per ogni colonna mobile utilizzata durante l'esercitazione (caratterizzato da una visualizzazione cartografica degli itinerari e da una descrizione testuale dettagliata dei percorsi suggeriti) e ha garantito

l'elaborazione in tempo reale di nuovi itinerari al verificarsi di blocchi o eventi non pianificati.

Alle colonne mobili dirette verso le zone interessate da eventi calamitosi è stata fornita una "schede di vettura" contenente l'itinerario da seguire ed eventuali avvertenze particolari utili per garantire il viaggio nella modalità più rapida e sicura possibile.

#### *Gestione delle colonne mobili in tempo reale*

Durante l'Esercitazione Nazionale di Protezione Civile in Valtellina il Laboratorio Mobilità e Trasporti del Politecnico di Milano ha inoltre sperimentato un sistema di telecontrollo delle colonne mobili, garantendo, in questo modo, supporto qual ora si fosse verificata un'anomalia durante il viaggio o consigliando percorsi alternativi nel caso fossero variate le condizioni di transitabilità delle strade.



Figura 2-1 - Esempio di visualizzazione posizione veicoli durante l'esercitazione.

È stato in questa occasione possibile visualizzare in tempo reale la posizione dei veicoli aventi a bordo un apparato radio dotato di ricevitore GPS che ha inviato le coordinate geografiche necessarie alla localizzazione dei veicoli stessi alla sala DICOMAC (Direzione Comando e Controllo) del Dipartimento della Protezione

Civile, presso la Sala Operativa di Protezione Civile della Regione Lombardia.

Durante l'esercitazione è stato possibile controllare il viaggio di circa 14 veicoli tra i quali numerose colonne mobili, gli autobus che trasportavano gli osservatori tecnici e altri partecipanti alla sperimentazione che sono transitati nell'area di studio.

L'esercitazione è servita per testare il sistema di telecontrollo e individuate gli aspetti tecnici e procedurali che è necessario affinare per garantire un telecontrollo affidabile qualora si verificasse un'emergenza reale.

Le conoscenze maturate durante l'esercitazione hanno comunque rafforzato la convinzione che per gestire in modo efficace la viabilità in fase di emergenza e per garantire alle colonne mobili un viaggio rapido e sicuro è necessario conoscere in ogni momento la posizione di tutti i veicoli (o almeno dei più importanti) di Protezione Civile operanti nella zona.

**Schema logico delle attività svolte**

I prodotti realizzati e utilizzati sono stati messi a sistema e utilizzati in sinergia per rispondere al meglio alle attività all'interno dell'esercitazione in Valtellina.

In Figura 4-1 viene schematicamente illustrato il ruolo del sistema informativo della rete stradale realizzato e l'interazione del sistema con la struttura Di.Coma.C., all'interno della quale se ne è sperimentato l'utilizzo.

Il sistema informativo è stato utilizzato per acquisire in ingresso tutte le informazioni utili riguardanti la viabilità e lo stato degli eventi che provenivano al Di.Coma.C. da fonti esterne e in particolare dai C.C.S. delle cinque province interessate. Le stesse informazioni venivano validate ed integrate attraverso un confronto con altre componenti della funzioni viabilità e con componenti di altre funzioni presenti in sala Di.Coma.C. e successivamente inserite e riorganizzate all'interno del sistema informativo.

Grazie alle possibili elaborazioni e visualizzazioni ottenibili con il sistema informativo, era possibile produrre in uscita un report aggiornato dello stato della viabilità nelle zone interessate dagli eventi e di quelle limitrofe, segnalando in particolare interruzioni in corso, difficoltà di transito e forti rallentamenti.

Inoltre venivano prodotte delle proposte di misure gestione del traffico (TMP), che venivano poi valutate e validate tramite il confronto con le altre componenti delle funzioni presenti in Di.Coma.C., e successivamente attivate.

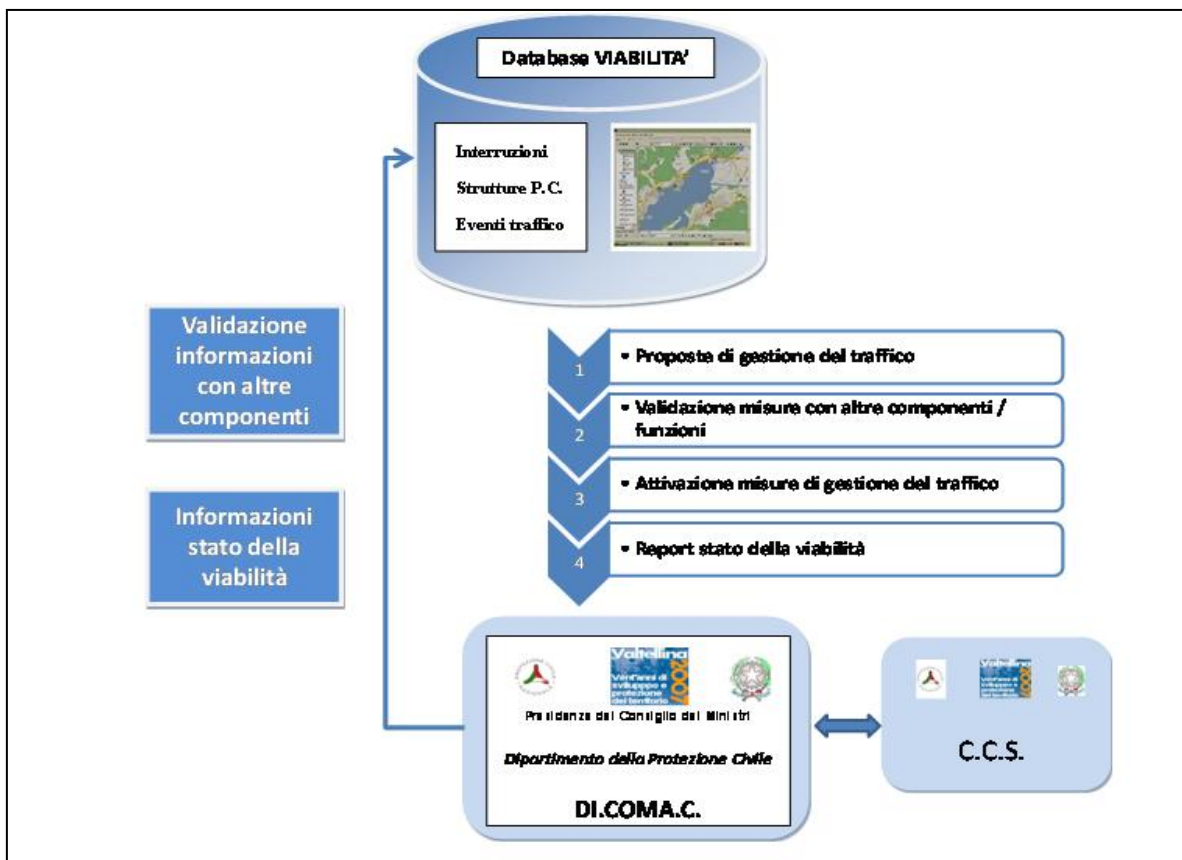


Figura 4-1 – Interazioni del sistema informativo della rete stradale con la struttura Di.Coma.C.

Per quanto riguarda le attività di gestione degli spostamenti dei soccorritori e del loro telecontrollo, il flusso di

informazioni e le relazioni tra i diversi prodotti utilizzati sono riassunte in Figura 4-2.

Da una parte il database colonne mobili fornisce in ingresso al sistema informativo della rete stradale le informazioni relativi ai viaggi pianificati dei soccorritori (in particolar modo origine e destinazione, entità numerica delle colonne mobili e dimensioni dei veicoli più critici, radio assegnata ad ogni colonna), dall'altra parte il sistema informativo è in grado di decodificare e integrare, tramite un'opportuna applicazione software, i segnali di

telecontrollo provenienti dalle radio in dotazione ai soccorritori.

In questo modo il sistema informativo è in grado di elaborare e fornire in uscita gli itinerari consigliati per i soccorritori e di visualizzare in seguito su cartografia la posizione attuale delle colonne mobili e il tragitto realmente seguito.

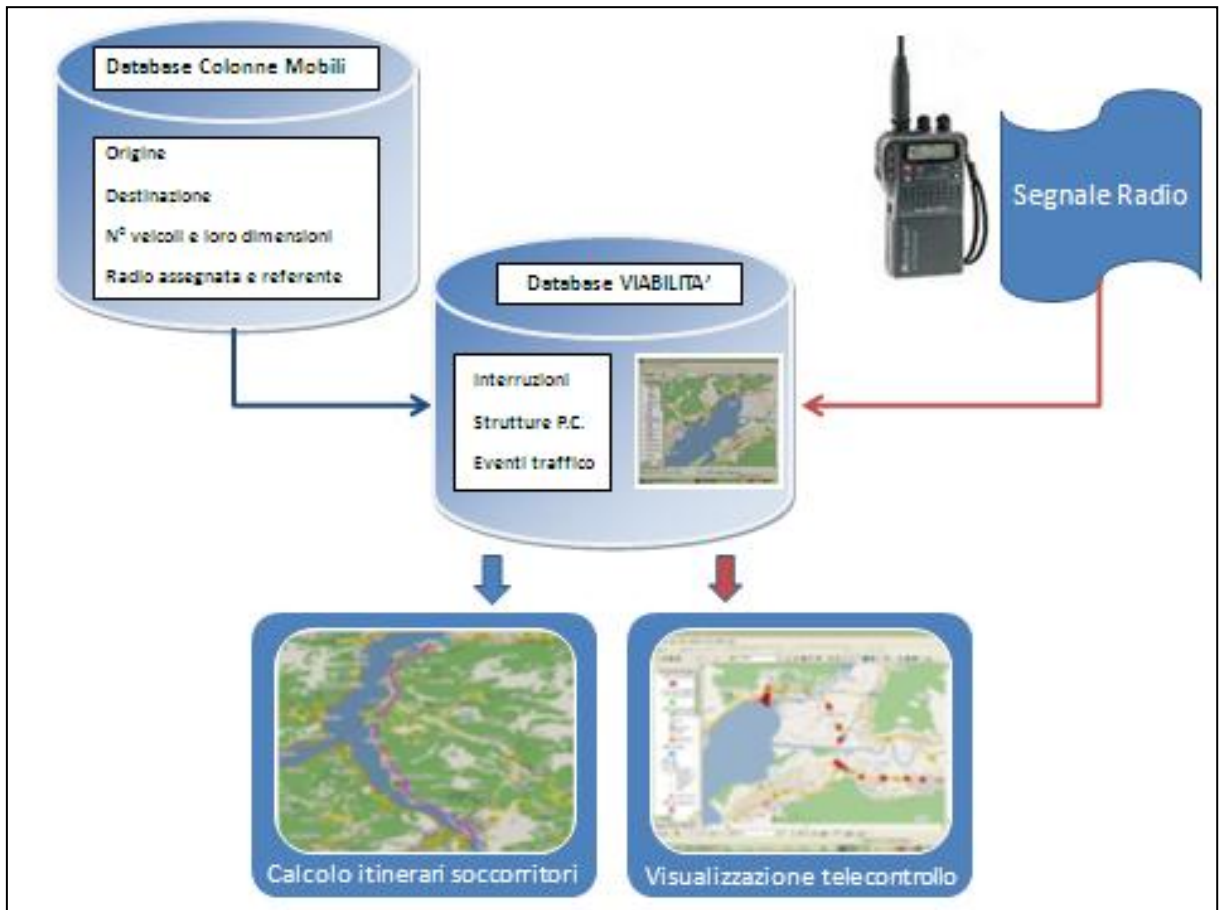


Figura 4-2 – Interazione del sistema informativo della rete stradale con il database delle colonne mobili.