

UN APPROCCIO SEMPLIFICATO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA FRANA NELLE INFRASTRUTTURE LINEARI DI TRASPORTO

Giosuè Distefano

Università degli Studi di Enna Kore

giosue.distefano@unikore.it

Valentina Lentini

Università degli Studi di Enna Kore

valentina.lentini@unikore.it

Francesco Castelli

Università degli Studi di Enna Kore

francesco.castelli@unikore.it

Sommario

Una delle problematiche che interessa maggiormente le infrastrutture viarie riguarda il potenziale innesco di fenomeni franosi, che possono compromettere le condizioni di esercizio delle infrastrutture stesse e rappresentare un rischio per l'incolumità degli utenti.

Per tale ragione, in questi ultimi anni, l'attenzione della comunità scientifica, delle pubbliche amministrazioni ed in generale degli enti gestori, è stata rivolta alla messa a punto di procedure per la valutazione del rischio idrogeologico da applicare al sistema di gestione delle infrastrutture viarie.

In considerazione di ciò, il presente lavoro rappresenta un contributo alla definizione di una metodologia finalizzata alla riduzione delle conseguenze indotte da eventi franosi nel caso delle infrastrutture lineari di trasporto. Si pone, in particolare, l'attenzione sull'adeguatezza delle infrastrutture viarie lineari e sulla necessità di un sistema gestionale volto al miglioramento del livello di sicurezza ed affidabilità offerto agli utilizzatori, dal momento che molte infrastrutture in esercizio presentano oggi prestazioni spesso insufficienti.

Lo studio si inquadra tra le attività di ricerca nell'ambito del progetto "TEMI MIRATI - *Tecnologie e Modelli Innovativi per la Mitigazione del Rischio nelle Infrastrutture critiche*" finanziato dal PNR 2015-2020 e presenta la procedura utilizzata per la valutazione del rischio indotto da fenomeni di caduta massi in un tratto della SS113 "Settentrionale Sicula" una importante infrastruttura stradale lungo la costa settentrionale della Sicilia.

1. Introduzione

L'analisi del rischio può costituire un valido supporto per orientare programmi tecnici e politici, così da indirizzare le risorse pubbliche laddove ci siano maggiori priorità. Questo approccio consentirebbe il superamento del tradizionale metodo di gestione delle infrastrutture, basato sul conseguimento di standard prestazionali minimi, definiti in relazione all'importanza dell'infrastruttura ed alle caratteristiche di esercizio ammesse sulla tratta, consentendo di tenere in conto, oltre agli aspetti legati alla funzionalità dell'infrastruttura ed alle condizioni strutturali del singolo manufatto, quelli connessi all'interazione infrastruttura-territorio (Montepara et al. 2008).

Nell'ultimo decennio diversi eventi catastrofici naturali, come alluvioni, frane e terremoti hanno coinvolto le infrastrutture stradali, evidenziandone la elevata vulnerabilità. Ne deriva, quindi, la necessità di individuare specifici indicatori associati ad ogni sorgente di rischio, opportunamente

pesati, al fine di dare adeguata importanza alle diverse componenti che caratterizzano le reali condizioni in cui è inserita l'infrastruttura (Castelli, 2017; Lentini et al., 2018).

2. Approccio metodologico per la valutazione del rischio da frana

Il rischio da frana è dato dalla combinazione di Pericolosità, Esposizione e Vulnerabilità (Varnes D.J., 1984) e rappresenta il livello di danno complessivo associato ad un particolare evento che si può verificare in una determinata area e con un prefissato tempo di ritorno.

In riferimento ai fenomeni di instabilità dei versanti ed al fine di ottenere una gerarchizzazione delle priorità di intervento scaturita sulla base di reale valore di rischio, è stato applicato l'iter procedurale proposto da Lentini et al. (2019), che si snoda attraverso un processo multifase che, partendo da una approfondita conoscenza del territorio, conduce all'individuazione delle infrastrutture o di tratti di infrastrutture più esposti a rischio e, quindi, consente di definire gli interventi prioritari in sede di pianificazione e programmazione degli interventi.

La prima fase è mirata ad ottenere informazioni sullo stato attuale delle infrastrutture (caratteristiche geometriche, volumi di traffico, ecc.), sull'importanza dell'infrastruttura nel contesto di rete, sul ruolo assunto nei Piani di Protezione Civile, nonché sui fenomeni di dissesto che hanno interessato le infrastrutture in esame.

La seconda fase consiste nell'analisi per scenari delle conseguenze indotte dall'innescarsi di fenomeni franosi sull'infrastruttura.

Successivamente, tenendo in considerazione il livello d'importanza strategica dell'arco stradale considerato nel contesto di rete e nella viabilità di protezione civile, è possibile associare alla infrastruttura in studio un "Indicatore di Priorità di Intervento" (I_{PI}) a supporto delle decisioni, secondo quanto descritto in dettaglio da Lentini et al. (2019).

3. Identificazione e caratterizzazione dei fenomeni franosi

Il presente contributo è incentrato sulla interazione tra il fenomeno di instabilità di versante per crollo in roccia e le infrastrutture di trasporto, con particolare riferimento al caso della Strada Statale 113 - "Settentrionale Sicula", che si snoda lungo la costa settentrionale della Sicilia, andando da Messina a Trapani, passando per Palermo.

Il tratto oggetto di studio (Fig.1), situato tra le località Patti e Acquedolci (tra i km 78+00 e 125+50), rappresenta la zona più critica dove, nel corso degli anni, si sono verificati vari fenomeni di dissesto che hanno comportato anche lunghe chiusure al traffico della sede stradale.

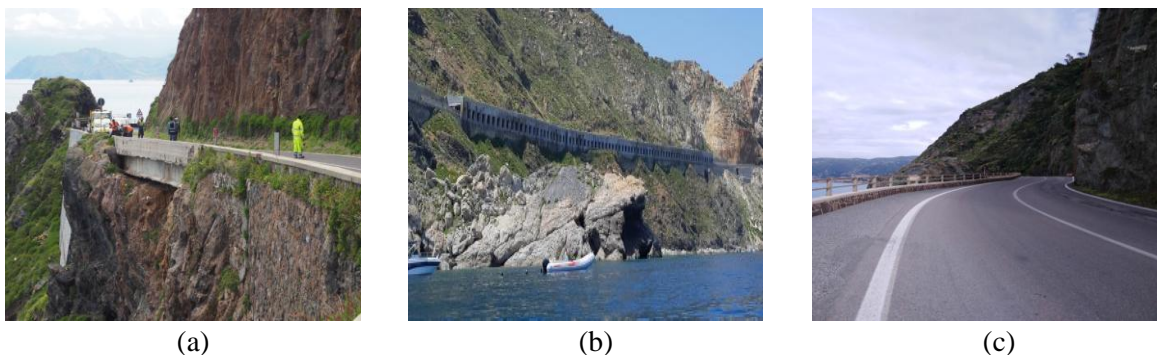


Fig. 1 Principali siti di interesse lungo la SS113, (a) località Scoglio Nero, (b) località Capo Calavà, (c) località Torre delle Ciavole

La SS113, infatti, a seguito di eventi franosi accaduti nel tratto in questione, è stata più volte chiusa al traffico veicolare. In particolare, dal 2008 ad oggi, l'arteria è stata interdetta al traffico per complessivi 1738 giorni. Nell'area in esame sono presenti diversi interventi di protezione quali galleria paramassi e

barriere (Fig.2) in evidenti condizioni di degrado e che non sempre garantiscono la circolazione viaria in sicurezza. Sulla base delle informazioni raccolte si è proceduto all'analisi del rischio per crollo per l'area in esame.



Fig. 2 Opere di difesa esistenti lungo la SS113 in evidente stato di degrado

4. Definizione degli scenari di incidentalità e analisi delle conseguenze indotte dalle frane

Il modello usato per l'analisi delle conseguenze si basa sull'approccio metodologico proposto da Fell et al. (2005) per la stima quantitativa del rischio da frana e consiste nel calcolo del rischio mediante l'equazione (1) per determinare la probabilità annuale che una persona possa perdere la vita $P_{(LOL)}^i$:

$$P_{(LOL)}^i = P_{(L)}^i \cdot P_{(T:L)}^i \cdot P_{(S:T)} \cdot V_{(D:T)}^i \quad (1)$$

dove $P_{(L)}^i$ è la frequenza degli eventi franosi di una data magnitudo; $P_{(T:L)}^i$ è la probabilità che la frana raggiunga l'elemento a rischio; $P_{(S:T)}$ è la probabilità spazio temporale dell'elemento a rischio; $V_{(D:T)}^i$ è la vulnerabilità della persona rispetto all'evento franoso.

Riferendo l'analisi alla perdita annuale di vite umane causata da n movimenti franosi indipendenti tra loro, $P_{(LOL)}$ può essere calcolata mediante la seguente espressione:

$$P_{(LOL)} = \sum_{i=1}^n (P_{(L)}^i \cdot P_{(T:L)}^i \cdot P_{(S:T)} \cdot V_{(D:T)}^i) \quad (2)$$

Per ciò che concerne l'analisi di frequenza $P_{(L)}^i$ che rappresenta la probabilità annuale che si verifichi un fenomeno di assegnata intensità, si è fatto riferimento agli eventi di crollo che si sono verificati negli ultimi dieci anni e opportunamente suddivisi in due classi in funzione del volume di materiale mobilitato. E' stata così definita la probabilità annuale di accadimento $P_{(L)}^A$ pari, per il tratto di interesse, a $1,9 \cdot 10^{-1}$ eventi/anno/km (blocchi di volume $< 1 \text{ m}^3$) e $P_{(L)}^B$ pari a $3,6 \cdot 10^{-2}$ eventi/anno/km (blocchi di volume $> 1 \text{ m}^3$).

La previsione del meccanismo di collasso e la stima del movimento del fenomeno franoso ("runout") consente la determinazione della probabilità che la frana raggiunga l'elemento a rischio, funzione della posizione relativa dell'elemento a rischio e del fronte di frana. Per infrastrutture che si trovano sulla direzione principale della frana generalmente si assume un valore di $P_{(T:L)}$ unitario.

La probabilità spazio-temporale $P_{(S:T)}$ che rappresenta la probabilità che l'elemento a rischio si trovi nell'area interessata dal pericolo al momento del suo verificarsi è stata calcolata distinguendo tre scenari di incidentalità causati dai fenomeni franosi (Bunce et al, 1997; Roberds, 2005).

Il primo scenario comprende gli incidenti causati dall'impatto diretto del materiale in frana contro il veicolo in movimento; il secondo è relativo ad incidenti determinati dall'impatto di un veicolo contro il materiale franato e depositato sulla carreggiata; il terzo riguarda gli eventi determinati dall'impatto di diretto del materiale in frana contro un veicolo fermo.

Per la stima della probabilità spazio temporale, con riferimento ai tre scenari (Tabella 1), si è tenuto conto delle reali condizioni funzionali e geometriche della strada, secondo la procedura descritta dal Highway Capacity Manual (2010) del Transportation Research Board. $P_{(S:T)}$ è stata valutata in funzione del traffico giornaliero medio (TGM=349 veic/g), della lunghezza media del veicolo ($L=4m$) e della velocità media di viaggio ($V_m=33,8$ km/h). La velocità V_m è stata determinata partendo dalla velocità di flusso libero di base, posta pari al limite massimo consentito pari a 50 km/h (Bunce et al., 1997; Budetta 2004), considerando una percentuale di veicoli pesanti pari al 25% ed una percentuale di veicoli turistici pari al 10% e nelle condizioni di distribuzione omogenea del traffico sulle due corsie e tempo di stazionamento in prossimità dell'area a rischio di circa 30 minuti in un anno.

Tabella 1. Probabilità spazio-temporale $P_{(S:T)}$ per i tre scenari di incidentalità

ID	$P^1_{(S:T)}$	$P^2_{(S:T)}$	$P^3_{(S:T)}$
SS113	$1,72 \times 10^{-3}$	$1,72 \times 10^{-1}$	$2,54 \times 10^{-6}$

La vulnerabilità $V_{(D:T)}$, rappresenta il grado di perdita (o danno) di un dato elemento o insieme di elementi all'interno dell'area interessata dal pericolo. Per tenere in considerazione la dipendenza del danno dalla tipologia di movimento e dall'entità del movimento franoso, i fenomeni franosi sono stati classificati in funzione delle dimensioni dei blocchi riscontrati in corrispondenza delle opere di protezione ed in prossimità della sede stradale (Papa, 2021; Rapporto ANAS, 2019).

I valori di $V_{(D:T)}$ sono riportati in Tabella 2 in funzione dei volumi di materiale trasportato sull'infrastruttura (Ferlisi et al., 2012).

Tabella 2. Classi di vulnerabilità per utenti esposti a rischio da crolli.

Classe	Volume [m^3]	$V_{(D:T)}$
Crolli		
A	<1	0,3
B	1-10	0,5
C	>10	1

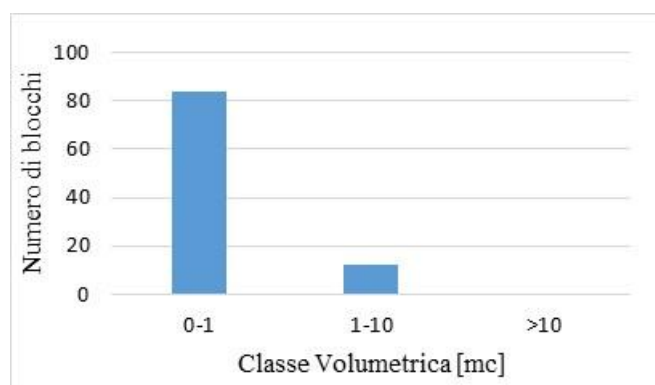


Fig. 3 Distribuzione statistica dei volumi dei blocchi

E' stata quindi calcolata la probabilità annuale che una persona possa perdere la vita $P^i_{(LOL)}$, i cui valori sono riportati in Tabella 3 con riferimento ai differenti scenari.

Tabella 3. Valori annuali di perdita di vite umane

ID	$P^1_{(LOL)}$	$P^2_{(LOL)}$	$P^3_{(LOL)}$
SS113	$1,27 \times 10^{-4}$	$1,27 \times 10^{-2}$	$1,42 \times 10^{-7}$

5. L'analisi del rischio a supporto delle decisioni

L'Indice di Severità I_s è stato definito come un indicatore delle mancate condizioni di sicurezza nella quale versa l'infrastruttura in esame. I valori di I_s sono riportati in Tabella 4, assumendo che l'infrastruttura si trovi in uno stato non più compatibile con la fruizione da parte degli utenti quando il valore di probabilità di perdita di vite umane risulta superiore alla soglia di tollerabilità stabilita dal Geotechnical Engineering Office di Hong Kong pari a 10^{-4} (AGS, 2007; Fell et al, 2008).

Tabella 4. Valori dell'indice di severità

Livello	$P_{(LOL)}$	I_s
Molto alto	$P_{(LOL)} > 10^{-3}/\text{anno}$	50
Alto	$10^{-4} < P_{(LOL)} < 10^{-3}/\text{anno}$	40
Moderato	$10^{-5} < P_{(LOL)} < 10^{-4}/\text{anno}$	30
Basso	$10^{-6} < P_{(LOL)} < 10^{-5}/\text{anno}$	20
Molto basso	$< 10^{-6}/\text{anno}$	10

Al fine di tenere in considerazione le reali condizioni e l'importanza dell'infrastruttura nel contesto di rete si definisce un coefficiente α mediante la seguente espressione:

$$\alpha = 1 + \frac{I_Q + I_{IMP} + I_{PC}}{100} \quad (3)$$

I_Q , rappresenta l'indicatore utilizzato per esprimere una misura della qualità della circolazione e corrisponde ai sei livelli di servizio previsti dal Highway Capacity Manual ($0 < I_Q < 50$).

I_{IMP} , rappresenta l'indice di importanza delle infrastrutture secondo quanto previsto dal DM 05.11.2001 "Norme Funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" (rete primaria: $I_{IMP} = 50$; rete principale: $I_{IMP} = 35$; rete secondaria: $I_{IMP} = 20$; rete locale: $I_{IMP} = 5$).

I_{PC} rappresenta l'indice di protezione civile che permette di tenere in considerazione l'importanza dell'infrastruttura in esame nella rete di protezione civile e della presenza o meno di percorsi alternativi. In particolare, $I_{PC} = 0$ per infrastrutture non facenti parte di un tratto di viabilità strategica ed $I_{PC} = 50$ per infrastrutture facenti parte di un tratto di viabilità strategica.

Per il caso in esame sono stati considerati i seguenti valori: $I_Q = 40$, $I_{IMP} = 20$, $I_{PC} = 0$.

Infine, è stato possibile definire un indicatore di Priorità di Intervento (I_{PI}) pari al prodotto dell'indice di severità I_s e del coefficiente α ($1,05 < \alpha < 2,50$) i cui valori sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5. Indice di priorità

Livello di priorità	Descrizione	Indice di priorità
Molto elevato	Massima urgenza di intervento	$100 \leq I_{PI}$
Elevato	Intervento a breve termine	$75 \leq I_{PI} \leq 100$
Moderato	Intervento a medio termine	$50 \leq I_{PI} \leq 75$
Basso	Intervento a lungo termine	$25 \leq I_{PI} \leq 50$
Molto basso	Intervento non necessario	$I_{PI} \leq 25$

Per il tratto studiato, I_{PI} è risultato pari a 80 (intervento a breve termine), che rappresenta l'indicatore finale sul quale è possibile basare in prima approssimazione la programmazione degli interventi di messa in sicurezza.

6. Conclusioni

Lo studio è incentrato sull'elaborazione di una procedura utile all'individuazione delle aree a rischio e di prioritario intervento, ed in tal senso fornisce una guida pratica per la gestione delle infrastrutture di trasporto, al fine di prevenire conseguenze potenzialmente catastrofiche.

La probabilità annuale di perdita della vita lungo la SS113 "Settentrionale Sicula" - un'importante infrastruttura stradale lungo la costa settentrionale dell'isola è stata calcolata mediante una analisi quantitativa del rischio da frana per tre differenti scenari: *i*) incidenti causati dall'impatto diretto di un veicolo in movimento con il blocco in frana; *ii*) impatto di veicolo in movimento con il blocco depositato sulla sede stradale; *iii*) impatto del blocco in frana con il veicolo stazionario.

Bibliografia

- Rapporto tecnico ANAS Area Compartmentale di Catania (2019). "Servizi per l'esecuzione del rilievo geostrutturale e geomeccanico dei versanti della SS113 in tratti saltuari tra il km 78+000 ed il km 125+520 in ordine alla stesura del piano di salvaguardia e riqualificazione SS113 da Patti ad Acquadolci".
- Bunce C.M., Cruden D.M., Morgenstern N.R. (1997). "Assessment of the hazard from a rockfall on a highway", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, pp.344-356.
- Budetta P. (2004). "Assessment of rockfall risk along roads". *Nat Hazards Earth Syst Sci* 4:71-81. doi:1684-9981/nhess/2004-4-71.
- Castelli F., (2017). "Aspetti geotecnici nella valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto". Atti Convegno Nazionale di Geotecnica, Roma, 20-22 Giugno.
- Fell R., Ho K.S., Lacasse S., Leroi E. (2005). "A framework for landslide risk assessment and management", In: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (Ed.). *Landslide risk management*. Taylor & Francis, London, pp.3-26.
- Fell R., Corominas S., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z., on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslide and Engineered Slopes (2008). "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning", *Engineering Geology*, 102: 85-98.
- Ferlisi S., Cascini L., Corominas J., Matano F., (2012). "Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (southern Italy)". *Nat Hazards* 62:691-72, DOI 10.1007/s11069-012-0102-z
- Lentini V., Distefano G., Castelli F. (2018). "Consequence analyses induced by landslides along transport infrastructures in the Enna area (South Italy)", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Lentini V., Castelli F., Distefano G. (2019). "A Procedure to Assess the Landslide Risk", In: Calvetti F., Cotecchia F., Galli A., Jommi C. (eds) *Geotechnical Research for Land Protection and Development*. CNRIG 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 40. Springer, Cham, pp 121-128, 23 Giugno 2019 National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering.
- Montepara A., Merusi F., Giuliani F., (2008). "Sviluppo di una nuova metodologia per la valutazione delle priorità di intervento di manutenzione di ponti e viadotti". Atti XVII Convegno Nazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie (SIIV), Enna, Italia.
- Papa M.N., (2021). "Studio di un area soggetta a crolli in roccia: il sito pilota di Capo Calavà (Messina)" Tesi di Laurea Magistrale, Torino.
- Roberds W. (2005). "Estimating temporal and spatial variability and vulnerability", In: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (Ed.). *Landslide risk management*. Taylor & Francis, London, pp. 129-157.
- Transportation Research Board, (2010). *Highway Capacity Manual*, National Research Council Washington, D.C. 2000.
- Varnes D.J., (1984). "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". *Natural Hazard Series*, Vol.3, UNESCO, Parigi.