

## **COMPORAMENTO SISMICO DI UN RILEVATO STABILIZZATO**

Lorenza Evangelista

*DIGA, Università di Napoli Federico II*

[lorenza.evangelista@unina.it](mailto:lorenza.evangelista@unina.it)

Valeria Licata

*DIGA, Università di Napoli Federico II*

[valeria.licata@gmail.com](mailto:valeria.licata@gmail.com)

Francesco Silvestri

*DIGA, Università di Napoli Federico II*

[francesco.silvestri@unina.it](mailto:francesco.silvestri@unina.it)

### **Sommario**

Il contributo illustra i risultati di analisi dinamiche semplificate ed avanzate, condotte secondo l'approccio progettuale agli Stati Limite delle Norme Tecniche per le Costruzioni, per la verifica sismica di un rilevato stradale. In virtù dell'importanza strategica dell'infrastruttura, lo studio è stato finalizzato alla valutazione dell'efficacia di un duplice intervento di consolidamento, predisposto per la stabilizzazione dei terreni di fondazione e da costruzione, sulla verifica di agibilità e stabilità globale dell'opera.

### **Introduzione**

Come in ogni pendio naturale o artificiale, all'interno di un rilevato un terremoto induce la propagazione di onde sismiche che danno luogo ad azioni inerziali proporzionali all'accelerazione sismica, variabili nel tempo, in intensità, direzione e verso. La combinazione delle stesse con le azioni statiche iniziali modifica le condizioni di stabilità del rilevato e può indurre deformazioni permanenti. Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/1/2008), nonché le Linee Guida AGI (2005), suggeriscono che le verifiche sismiche dei rilevati stradali siano realizzate, sulla base dell'importanza strategica dell'opera e della pericolosità sismica del sito, secondo un approccio prestazionale, in virtù del quale vanno individuati i metodi di analisi ed i criteri di verifica, confrontando gli eventuali spostamenti permanenti previsti con opportuni valori di soglia, associabili ai diversi stati limite. Tale approccio è stato applicato per la verifica sismica di un rilevato stradale interessato, già in condizioni statiche, da problemi di instabilità sia nei terreni di fondazione, sia nel corpo del rilevato. L'opera è stata infatti soggetta ad interventi di stabilizzazione, applicando due diverse tecniche di consolidamento: il *Fast Deep Mixing* per i terreni di fondazione, e la miscelazione a calce per il corpo del rilevato. Le verifiche di stabilità, condotte con analisi dinamiche semplificate e avanzate a partire da azioni sismiche di progetto derivante da studi di pericolosità sismica del sito, sono state finalizzate alla verifica dell'efficacia degli interventi di stabilizzazione predisposti.

### **Caso di studio**

Lo studio ha interessato un tratto di rilevato stradale a mezza costa, di altezza variabile tra 2.5 e 6 m, e con sviluppo longitudinale di circa 150 m. In seguito a lavori di ampliamento della piattaforma stradale, il rilevato è stato interessato da dissesti superficiali e scorrimenti

profondi, evidenziati dalla presenza di lesioni nella pavimentazione e rigonfiamenti al piede della scarpata. Il rilevato è costituito da un terreno sabbio-limoso derivante da riporti, ed caratterizzato da uno strato superficiale rimaneggiato di bassa resistenza. I terreni di fondazione sono costituiti da una coltre di alterazione limo-sabbiosa, con spessore dell'ordine di 3 m, al tetto di un banco di depositi fluvio-lacustri di litologia comparabile, con spessore pari a 8 ÷ 10 m. Alla base si ritrova una formazione di argille omogenee grigio-azzurre. Le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, illustrate in Tabella 1, sono state prevalentemente ottenute da prove in laboratorio triassiali (CIU), in parte dedotte da correlazioni con prove penetrometriche e, per il rilevato, calibrate in base a *back analysis* (Papa e Ramondini, 2011). L'analisi a ritroso è stata effettuata con il metodo di Morgenstern e Price (1965), facendo riferimento a condizioni di equilibrio limite lungo superfici mistilinee, individuate sulla base del monitoraggio del cinematiso profondo. Le misure inclinometriche, infatti, hanno mostrato che i maggiori scorrimenti al piede della scarpata si localizzano a circa 3 m di profondità, cioè al letto della coltre alterata, mentre in sommità si concentrano ad una profondità di circa 5 m dal piano stradale, in corrispondenza cioè del passaggio tra il corpo del rilevato ed il terreno di fondazione. Ulteriori informazioni sono derivate dal monitoraggio piezometrico, con intercettazione della falda a 2 m di profondità dal piede del rilevato ed a circa 1 m dal piano stradale a monte del ciglio della scarpata. Alla luce del meccanismo di instabilità osservato, gli interventi di messa in sicurezza dell'opera hanno previsto la realizzazione di gabbionate al piede, una trincea drenante a monte e una doppia tecnica di consolidamento, messa in opera per tutto lo sviluppo longitudinale del rilevato. I materiali da costruzione sono stati trattati con calce, mentre i terreni di fondazione sono stati consolidati con la tecnica del *Fast Deep Mixing* (Papa e Ramondini, 2011). Per verificare l'efficacia di quest'ultima, sono state eseguite, prima e dopo il trattamento, prove MASW lungo due stendimenti paralleli all'asse del rilevato (Evangelista et al, 2011). La Tabella 1 riporta la sintesi delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni prima e dopo i trattamenti.

Tabella 1: Parametri fisico-meccanici dei terreni in assenza ed in presenza dei trattamenti.

Materiali	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\phi'$ °	$c'$ kPa	Materiali trattati	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\phi'$ °	$c'$ kPa
Rilevato rimaneggiato	19.00	13	3	Rilevato stabilizzato	21.00	21	40
Rilevato intatto	19.00	25	3				
Coltre alterata	20.00	16	17	Fast Deep Mixing	21.00	30	2264
Fluvio - Lacustri	20.00	25	50				
Argille Grigio azzurre	20.00	35	50				

### Verifica sismica

La previsione degli spostamenti in condizioni sismiche è stata condotta attraverso verifiche di stabilità sismica con analisi dinamiche semplificate ed avanzate.

Le azioni sismiche di progetto sono state definite, in relazione agli stati limite, a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione. Data la valenza strategica dal raccordo viario (rete di tipo A secondo il D.M. 6792 del 5/11/2001), è stata assunta una vita nominale dell'opera di 100 anni e una classe d'uso IV (CU pari a 2), il che si traduce in una vita di riferimento di 200 anni. Dalla Mappa di Pericolosità Sismica nazionale (Gruppo di Lavoro MPS, 2004), sono state estratte accelerazioni massime di riferimento pari a 0.17g (in corrispondenza di un periodo di ritorno  $T_r=200$  anni) e 0.49g ( $T_r=2475$  anni), rispettivamente per lo stato limite di danno (SLD) e di collasso (SLC). Come richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), per le analisi dinamiche sono stati selezionati accelerogrammi

naturali rappresentativi delle azioni di progetto relative ad entrambi gli stati limite considerati, cercando di soddisfare criteri di compatibilità sia con la pericolosità sismica locale, sia con gli spettri di riferimento indicati dalle stesse NTC. Dai database accelerometrici *online* internazionali (*KNet* e *PEER*) e nazionali (*ITACA*), sono state estratte, per ogni stato limite, cinque storie temporali registrate su affioramenti rigidi, fra quelle compatibili con le analisi di disaggregazione della MPS in termini di intervalli di magnitudo e distanza dalle possibili sorgenti. Nel dettaglio, per lo SLD l'intervallo di magnitudo è stato posto pari a 4.5-6 entro una distanza di 20 km, mentre per lo SLC sono stati considerati eventi sismici di magnitudo fra 6 e 7.5 entro una distanza di 30 km. La selezione dei cinque accelerogrammi più rappresentativi in termini di spettro-compatibilità è stata basata su un criterio di minimizzazione dei rapporti tra le accelerazioni di picco e degli scarti rispetto alle forme spettrali, seguendo un metodo analogo a quelli adottati da Pagliaroli e Lanzo (2008) e Costanzo *et al.* (2011). Come mostra la Figura 1, per entrambi gli stati limite la forma spettrale media delle registrazioni è molto prossima a quella prescritta dalle NTC.

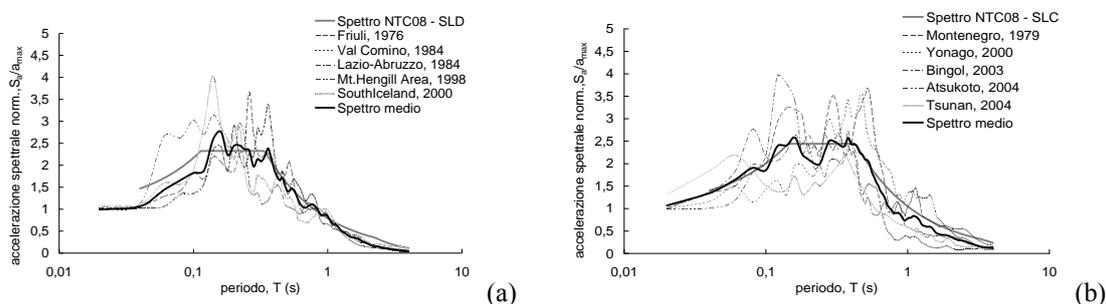


Figura 1: Spettri di risposta degli accelerogrammi selezionati per Stato Limite di Danno (a) e di Collasso (b).

### Analisi dinamica semplificata

La previsione degli spostamenti permanenti indotti dall'azione sismica è stata valutata in funzione degli accelerogrammi di progetto,  $a(t)$ , ottenuti scalando quelli selezionati per le accelerazioni di riferimento relative ai due diversi stati limite, moltiplicate per i coefficienti di amplificazione stratigrafica, ottenuti assegnando cautelativamente il volume potenzialmente instabile ad una classe di sottosuolo C.

Il calcolo non ha tenuto prudenzialmente conto di eventuali fenomeni di non sincronismo del moto sismico nel rilevato, ed è stato effettuato attraverso il classico modello di blocco rigido scorrevole su un piano inclinato (Newmark, 1965), in cui lo scorrimento tra blocco e piano s'innescia quando  $a(t)$  oltrepassa la soglia definita dall'accelerazione critica,  $a_c$ . Quest'ultima è stata calcolata applicando iterativamente il metodo di Sarma (1973) sui diversi modelli di rilevato stabilizzato (Fig. 2a), ed è pari a 0.03g ipotizzando esclusivamente il trattamento a calce, ed aumenta fino a 0.12g in presenza di stabilizzazione combinata, calce + FDM (Fig. 2b). Tali variazioni sono riconducibili all'innalzamento della superficie di scorrimento critica, che risulta via via meno profonda di quella stimata per il fenomeno di instabilità osservato.

Il grafico di Figura 3 riassume la variabilità degli spostamenti calcolati nei diversi casi, illustrando la marcata dipendenza dello spostamento previsto con il contenuto energetico dell'accelerogramma di riferimento, espresso attraverso l'intensità di Arias,  $I_a$ . In presenza del solo intervento a calce, le analisi allo SLD e SLC hanno restituito spostamenti rispettivamente superiori a 5 e 50 cm per quasi tutti gli accelerogrammi considerati. In base ai criteri suggeriti da Silvestri *et al.* (2006) per le infrastrutture viarie, questi valori non risultano compatibili con l'agibilità dell'opera. Sotto le stesse azioni sismiche, nell'ipotesi di realizzazione del trattamento combinato, le analisi eseguite hanno mostrato spostamenti inferiori ai valori di soglia precedentemente indicati, con valori massimi per lo SLC intorno ai 30 cm, che

comunque non inducono a temere il collasso dell'opera.

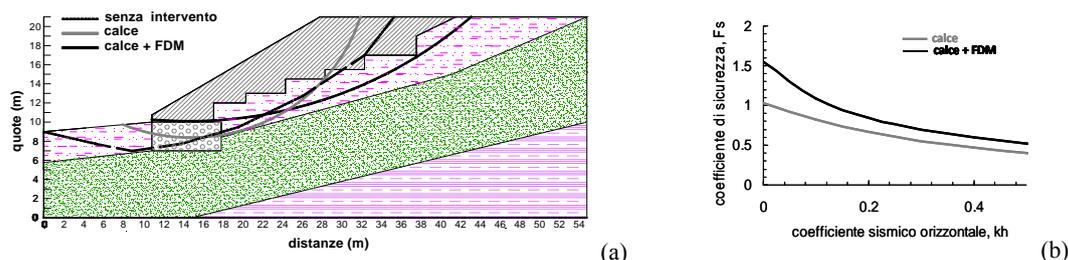


Figura 2. Modello di rilevato stabilizzato con superfici di scorrimento critiche in condizioni sismiche (a) confrontate con quella stimata in assenza di interventi; variazione del coefficiente di sicurezza con la componente orizzontale dell'azione sismica (b).

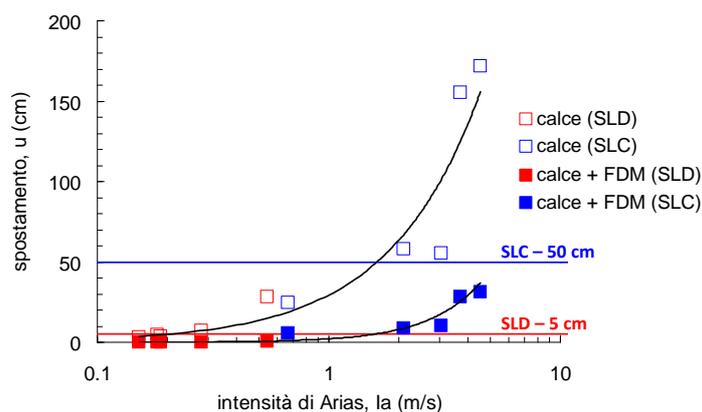


Figura 3. Relazione Intensità di Arias e spostamenti.

### Analisi dinamica avanzata

Al fine di valutare anche l'influenza sulla stabilità globale dell'opera delle proprietà di rigidità dei terreni interessati, il comportamento sismico del rilevato è stato investigato, attraverso un approccio al continuo, modellando in condizioni bidimensionali piane la sezione maestra del corpo del rilevato ed il terreno di fondazione con essa interagente. La tecnica di risoluzione numerica adoperata è quella delle differenze finite, implementata nel codice di calcolo FLAC<sup>TM</sup>, versione 5.0 (ITASCA, 2005), operante nel dominio del tempo attraverso l'analisi lineare equivalente.

Il modello geometrico messo a punto ha un'estensione di 150x70 m, superiore alle dimensioni trasversali del rilevato, al fine di limitare l'influenza dei contorni laterali e per rispettare le condizioni di moto sismico monodimensionale in prossimità di esse, preventivamente verificate confrontando i risultati con quelli del codice di calcolo EERA (Bardet et al., 2000). La discretizzazione è avvenuta con una maglia ad elementi quadrangolari, le cui dimensioni sono state stabilite in funzione delle lunghezze d'onda minime caratterizzanti il fenomeno di propagazione sismica, determinabili con la relazione di Kuhlemeyer & Lysmer (1973).

Ai terreni del corpo del rilevato e della coltre alterata è stato assegnato un legame elastico-perfettamente plastico alla Mohr-Coulomb, attribuendovi i parametri di resistenza derivanti dalle prove di laboratorio e dalle stime preliminari degli effetti dei trattamenti applicati; per i terreni di fondazione è stato invece utilizzato un modello elastico, essendo note le rigidità a partire dai risultati delle prove di superficie. Per modellare lo smorzamento, ci si è avvalsi della formulazione di Rayleigh.

Lungo le frontiere laterali del terreno di fondazione sono stati utilizzati particolari elementi assorbenti (*free-field boundaries*), che, oltre ad evitare la riflessione delle onde in maniera analoga agli smorzatori viscosi introdotti da Lysmer & Kuhlemeyer (1969), forzano i nodi

delle frontiere laterali a seguire il moto di *free-field*, ricavato da analisi di risposta sismica locale 1D. All'interfaccia tra bedrock e deposito di terreno, invece, sono stati applicati i contorni 'quiet' costituiti, secondo la formulazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969), da smorzatori viscosi vincolati alla griglia ed agenti in direzione normale e tangenziale al contorno stesso. Infine l'input sismico è stato applicato sotto forma di storia temporale di tensioni tangenziali.

Preliminarmente è stata verificata la condizione di equilibrio statico, riproducendo le effettive fasi di costruzione, asportazione di terreno e stabilizzazione del rilevato, al fine di determinare lo stato tensionale e deformativo all'interno del modello, sia in presenza del solo trattamento a calce, sia ipotizzando l'intervento combinato calce + FDM. In questo ultimo caso, inizialmente è stata effettuata l'analisi statica considerando il rilevato stradale costituito dai terreni di costruzione originari. Successivamente, l'analisi ha simulato la fase di asportazione del materiale scadente costituente il corpo del rilevato. Nella fase successiva, si è riprodotto l'incremento di proprietà dei terreni di fondazione stabilizzati con il *Fast Deep Mixing*. Quindi è stato simulato il definitivo trattamento a calce del corpo del rilevato. Nelle analisi è stato tenuto conto dell'abbattimento della falda, per mezzo del dreno superiore e della gabbionata al piede. In assenza di riscontri sull'effettiva entità dell'abbattimento, il pelo libero della falda è stato assunto coincidente con l'interfaccia tra i materiali fluvio-lacustri e la coltre di alterazione, nell'ipotesi di completa efficacia del sistema di drenaggio.

La verifica di stabilità si è concentrata principalmente sullo stato limite di collasso, applicando come input sismico l'accelerogramma relativo all'evento sismico di Montenegro, che nelle analisi semplificate aveva fornito il massimo valore di spostamento.

Il confronto tra i risultati in termini di spostamenti permanenti in presenza del solo trattamento a calce (Figura 4a) ed in presenza anche dell'intervento di stabilizzazione al piede con il *Fast Deep Mixing* (Figura 4b), mostra in quest'ultimo caso un'evidente riduzione del volume interessato da significative deformazioni plastiche, associabile all'innalzamento della superficie di scorrimento critica precedentemente osservato nelle analisi semplificate. A ciò corrisponde all'incirca un dimezzamento dello spostamento massimo, il che conferma gli effetti benefici del FDM sulla stabilità globale del rilevato.

Sono state infine confrontati gli spostamenti medi calcolati con le analisi dinamiche avanzate con quelli calcolati con le analisi alla Newmark. Per la stabilizzazione combinata, calce e FDM, FLAC<sup>TM</sup> ha restituito uno spostamento medio pari a 65 cm, invece Newmark uno spostamento di 31 cm, pari alla metà di quello di Flac. Tale discrepanza è ascrivibile agli effetti di amplificazione topografica e stratigrafica di cui si tiene conto nell'analisi 2D. Gli elevati valori di accelerazione massima osservati alla cresta del rilevato fanno presupporre che il fenomeno di amplificazione è attribuibile alla focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta a seguito della riflessione sulla superficie libera ed all'interazione fra il campo d'onda incidente e quello diffratto.

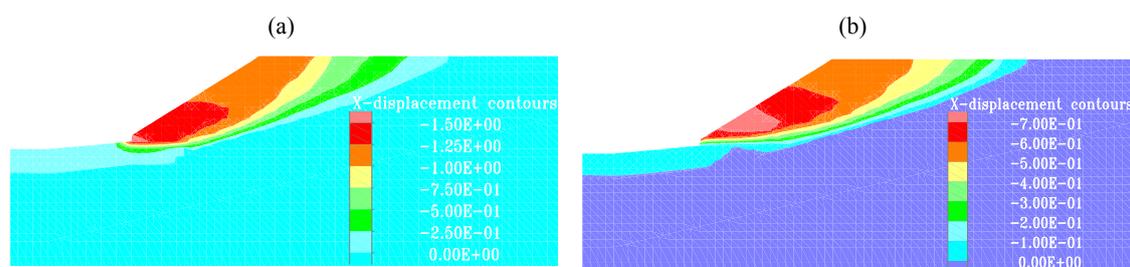


Figura 4. Distribuzione degli spostamenti permanenti: (a) consolidamento a calce del corpo del rilevato; (b) consolidamento a calce del corpo del rilevato e Fast Deep Mixing per i terreni di fondazione.

## Conclusioni

L'obiettivo dello studio è stato la verifica dell'efficacia dei trattamenti di stabilizzazione previsti per un rilevato stradale sotto azioni sismiche e la comprensione del beneficio indotto dall'utilizzo della tecnica *Fast Deep Mixing* per il consolidamento dei terreni di fondazione rispetto all'impiego del solo trattamento a calce.

A partire dal modello di rilevato stabilizzato, sono state eseguite analisi dinamiche semplificate ed avanzate, nel rispetto dell'approccio agli stati limite delle NTC. Dall'analisi dei risultati ottenuti con l'analisi dinamica semplificata, si osserva che l'intervento integrativo di consolidamento mediante incremento di resistenza al piede con il *Fast Deep Mixing* è particolarmente efficace per la riduzione degli spostamenti in condizioni sismiche, rispetto all'intervento con sola stabilizzazione a calce. L'analisi dinamica avanzata ha permesso di tenere conto anche delle variazioni di rigidità e delle effettive condizioni geometriche, fornendo risultati nel complesso in linea con quelli ottenuti tramite l'approccio di Newmark, anche se con spostamenti assoluti più elevati, per effetto dell'amplificazione topografica e stratigrafica.

## Bibliografia

- AGI, Associazione Geotecnica Italiana, 2005. *Aspetti Geotecnici per la Progettazione in Zona Sismica*, Patron Editore, Bologna, pp. 416.
- Bardet, J.P., Ichii, K., Lin, C.H., 2000. EERA a Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Univ. of Southern California, Dep. of Civil Eng.
- Costanzo A., Sica S., Silvestri F., 2011. *Verifica della sicurezza in condizioni sismiche della diga sul fiume Melito*. Rivista Italiana di Geotecnica, accettato per la pubblicazione.
- Gruppo di Lavoro MPS (2004). *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.
- Evangelista L., d'Onofrio A., Silvestri F., Santucci de Magistris F., 2011. Un'Applicazione della Tecnica Sperimentale MASW per il Controllo del Consolidamento dei Terreni. XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica
- ITASCA (2005). *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua – Version 5.0*. User's Guide, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- KNet. [http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/index\\_en.cgi](http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/index_en.cgi) M.LL.PP. (2008). *Norme Tecniche per le Costruzioni*. DM 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 29.
- Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. (1969). *Finite dynamic model for infinite media*. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 95(EM4): 859-877.
- Morgenstern N.R., Price V.E. (1965). *The analysis of stability of general slip surfaces*. Geotechnique, 15: 181-189.
- PEER. *Pacific Earthquake Engineering Research Center - Strong Ground Motion Database*. [http://peer.berkeley.edu/products/strong\\_ground\\_motion\\_db.html](http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html)
- Papa R., Ramondini M. (2011). *Il consolidamento dei terreni mediante Fast Deep Mixing*. XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica.
- Sarma S.K. (1973). *Stability analysis of embankments and slopes*. Geotechnique, 23(3): 423-433.