

SPOSTAMENTI E PRESSIONI INTERSTIZIALI DI UNA GRANDE FRANA IN FORMAZIONI STRUTTURALMENTE COMPLESSE: EFFETTI DI UN SISTEMA DI POZZI DRENANTI

Roberto Vassallo, Jacopo De Rosa, Caterina Di Maio
Università della Basilicata

roberto.vassallo@unibas.it, jacopo.derosa@unibas.it, caterina.dimaio@unibas.it

Gianluca Cutrera, Roberto Murtas
Rete Ferroviaria Italiana
g.cutrera@rfi.it, r.murtas@rfi.it

Gianfranco Vincenzo Pandiscia, Francesco Trillo
e-GEOS

gianfranco.pandiscia@e-geos.it, francesco.trillo@e-geos.it

Sommario

Nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato alla mitigazione dei rischi naturali per i collegamenti viari, e di convenzioni con Rete Ferroviaria Italiana, si sta approfondendo l'analisi di un grande sistema franoso che si sviluppa in formazioni strutturalmente complesse del Miocene in destra idraulica del fiume Basento. Il sistema franoso interessa la S.S. Basentana e, in misura maggiore, la linea ferroviaria Potenza-Metaponto; pertanto, a partire dagli anni '90, a valle e a monte della linea ferroviaria sono stati realizzati sistemi di pozzi drenanti. L'analisi dei dati inclinometri e dei dati DInSAR disponibili per l'area suggerisce che i sistemi drenanti abbiano ridotto le velocità del sistema franoso in prossimità della linea ferroviaria. In particolare, prima della realizzazione del sistema drenante nel 2016-2017, a valle della linea le velocità medie annue massime stimate erano di circa 1 cm/anno, successivamente si sono ridotte di circa la metà. A monte della linea, dove le velocità negli ultimi decenni sono state maggiori, alcuni nuovi pozzi si muovono attualmente con velocità medie di circa 1÷2 cm/anno, altri sono fermi. Nell'insieme, le velocità rilevate nel sistema franoso sono molto disuniformi, coerentemente con la complessità e l'eterogeneità dei terreni in frana.

Alcuni fori di sondaggio hanno evidenziato la presenza di terreni a granulometria prevalentemente sabbiosa, altri prevalentemente argillosa. Coerentemente, le prove di permeabilità eseguite nei piezometri Casagrande installati a varie profondità nel corpo di frana mostrano che la permeabilità varia fra 10^{-5} m/s e 10^{-9} m/s. I risultati preliminari del calcolo con il codice alle differenze finite MODFLOW 3D mostrano l'efficacia del sistema di drenaggio, con riduzioni di pressioni interstiziali prossime a quelle registrate sperimentalmente.

1. Introduzione

Il territorio del Comune di Calciano (MT) è interessato, in località Bosco San Domenico, in destra idraulica del fiume Basento, da un grande fenomeno franoso che interseca la linea ferroviaria Potenza-Metaponto. Nella zona della frana affiorano le formazioni mioceniche strutturalmente complesse del Flysch Numidico e di Serra Palazzo. Il Flysch Numidico è costituito da quarzoareniti compatte ben stratificate in strati e banchi fratturati con livelli di argille e marne argillose. La Formazione di Serra Palazzo è costituita da una successione irregolare di marne, argille e calcari in strati o banchi molto fratturati. Il fenomeno franoso si presenta come un complesso sistema di frane eterogenee costituite dai terreni di entrambe le formazioni, distinti oppure rimescolati fra loro. Il sistema franoso si

sviluppa, per una lunghezza di circa 1400 m, da una quota di circa 410 m s.l.m. alla quota di 240 m s.l.m. in corrispondenza della piana alluvionale del fiume Basento (Fig. 1). Esso è caratterizzato dal susseguirsi di numerose scarpate principali e secondarie, estesi terrazzi a volte in contropendenza. La profondità massima rilevata in precedenti indagini è di circa 30 m; sono stati da poco installati nuovi inclinometri per definirla con maggiore precisione. Il volume della massa in frana è di oltre 9 milioni di metri cubi. La pendenza media della frana, dalla testa al piede, è di circa 7°. I terreni in frana sono in alcune zone costituiti essenzialmente da sabbie e limi, in altre da limi e argille, e in entrambi i casi inglobano elementi lapidei di dimensioni estremamente variabili. L'eterogeneità dei terreni si ripercuote sulla permeabilità che risulta variabile in un intervallo largo al punto da influenzare significativamente l'efficienza a regime di sistemi drenanti della tipologia realizzata sul versante. Al fine di ridurre il rischio da frana, sono stati realizzati due sistemi drenanti: uno a valle della linea ferroviaria nel 1994 e un secondo a monte tra il 2016 e il 2017. Il nuovo sistema consiste di 5 pozzi di diametro pari a 7,5 m e profondità 15 m. Le pareti dei pozzi sono costituite da pali $\phi 1000$ mm con interasse di 1,15 m, di lunghezza 21 m, disposti lungo una circonferenza di raggio 3,70 m. Dai pozzi si dipartono ventagli di microdreni suborizzontali disposti su tre livelli.

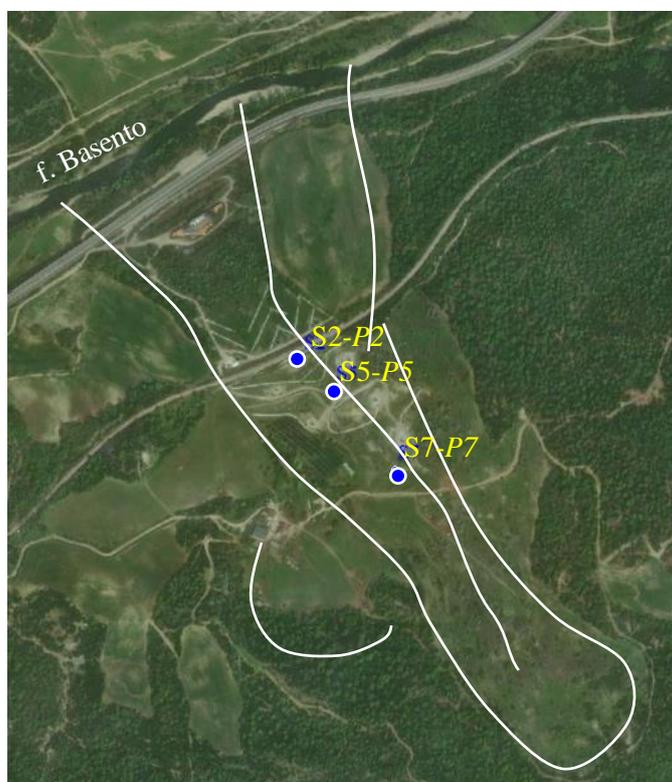


Fig. 1. Alcuni contorni del sistema franoso.

2. Spostamenti del sistema franoso valutati mediante misure inclinometriche e tecnica DInSAR

I dati sull'evoluzione temporale degli spostamenti derivanti da misure inclinometriche tra il 1993 e il 2017 risultano piuttosto discontinui. Dal 2018 al 2021 sono state eseguite misure inclinometriche con catene di sonde fisse nelle verticali S2, S5 e S7. Grazie a misure eseguite con sonde mobili nel 2021 è stato possibile risalire ai profili inclinometrici riportati in Figura 2. I profili mostrano che gli spostamenti sono essenzialmente concentrati lungo la banda di taglio, il che rende i dati satellitari significativi per la ricostruzione dei movimenti di alcune parti del sistema franoso. Si osserva inoltre che i primi 2÷3 m di terreno possono essere soggetti a movimenti di tipo viscoso più veloci. Le velocità basali rilevate dagli inclinometri S2 e S5 sono dell'ordine del cm/anno. Nella documentazione fornita da RFI sono riportate misure inclinometriche eseguite negli anni '90 che indicano in prossimità

dell'inclinometro S2 velocità molto maggiori di quelle rilevate attualmente (IGEM 2000). Sono stati presi in considerazione i dati DInSAR relativi alle costellazioni COSMO-SkyMED (CSK) su orbita ascendente e Sentinel-1 su orbite ascendente e discendente, elaborati da e-GEOS nell'ambito del progetto PON Mitigo. In Figura 2 vengono riportati i vettori spostamento ricavati dalle componenti lungo la linea di vista satellitare (LOS) per Sentinel-1 su orbita discendente con il procedimento descritto da Di Maio et al. (2018). Data la direzione degli spostamenti inclinometrici a p.c., circa il 63% di questi viene rilevato come componente lungo la LOS. Le componenti rilevate per le orbite ascendenti delle due diverse costellazioni corrispondono invece a una percentuale nettamente più piccola. Considerata la maggior densità di punti CSK visibili a terra, in corrispondenza della S.S. Basentana e del vicino motel vengono riportate in figura le componenti LOS rilevate in orbita ascendente da tale costellazione che evidenziano la deformata della strada e gli spostamenti del motel. I dati, nel loro insieme, mostrano che nella zona a valle della linea ferroviaria il pozzo centrale P1 si muove con velocità leggermente maggiore dei pozzi laterali P2 e P3. A monte della linea ferroviaria, i pozzi W2 e W4, realizzati nel corpo di frana più attivo, esibiscono velocità di 1÷2 cm/anno. I pozzi W1, W3 e W5, realizzati su un corpo secondario del sistema franoso, sono praticamente fermi. In definitiva, le velocità basali rilevate da misure inclinometriche e quelle da satellite CSK e Sentinel-1 rilevate su strutture profonde vanno da pochi mm/anno a 6÷7 cm/anno. I valori più elevati si osservano a monte, dove una sola sonda fissa dell'inclinometro S7 ha registrato 16 cm in circa 3 anni. Considerando anche i dati Envisat del Piano Straordinario di Telerilevamento è possibile, per il pozzo P1, ricostruire la storia degli spostamenti dal 2003 (Fig. 3a). La Figura 3b, in cui è indicato il periodo di realizzazione dei nuovi pozzi drenanti, mostra che dopo la loro realizzazione la componente lungo la LOS della velocità di movimento verso valle dei tre i pozzi del 1994 si è quasi dimezzata. Sono in

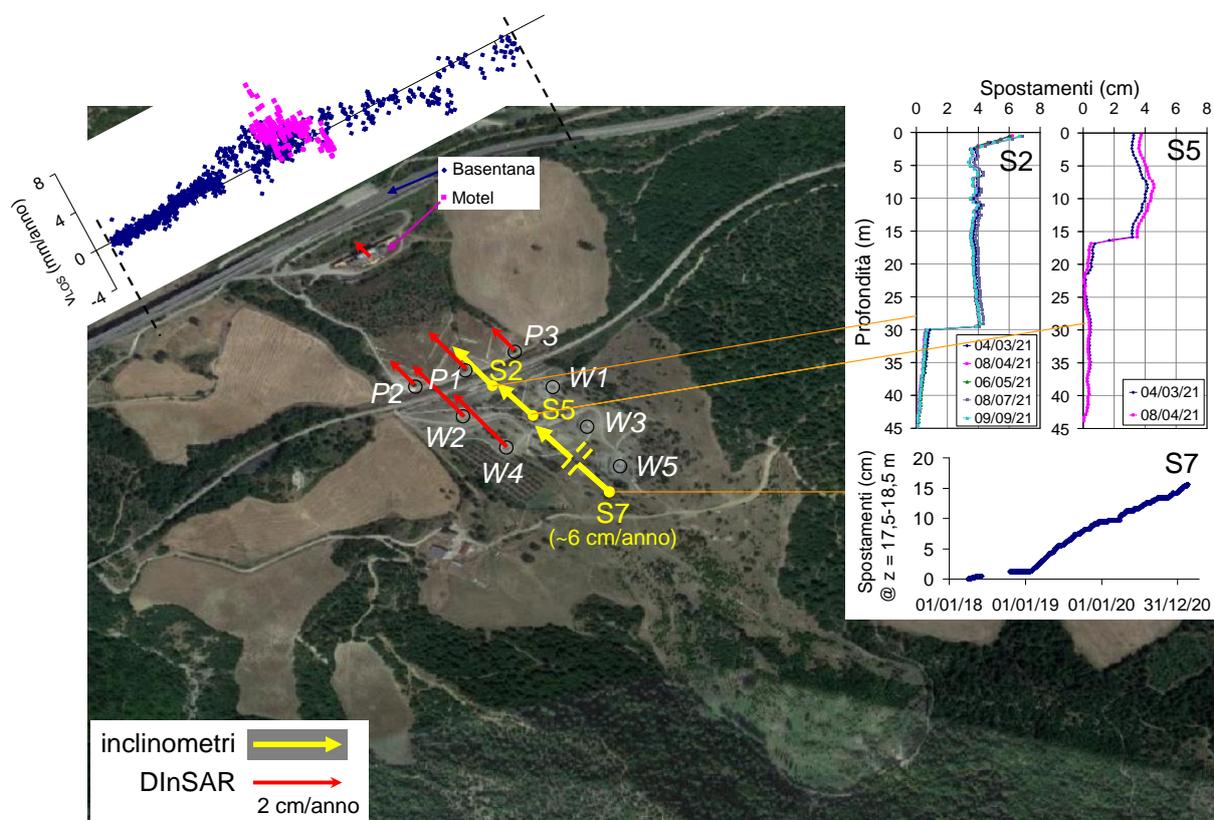


Fig. 2. Mappa delle velocità medie annue nel periodo 2018-2021 ricavate da misure inclinometriche e satellitari; profili inclinometrici in S3 e S5; evoluzione temporale degli spostamenti della sonda inclinometrica fissa posizionata in S7 in corrispondenza di una zona di deformazione concentrata.

corso studi mirati a valutare la possibile influenza su tale andamento degli apporti meteorici e dei cambiamenti climatici. Nella parte di monte non ci sono *scatterer* antecedenti il periodo di realizzazione dei nuovi pozzi, pertanto non è possibile fare analoghe considerazioni sulle variazioni di velocità in quella zona con dati DInSAR. Purtroppo, considerando le velocità basali inclinometriche degli anni '90 (cfr. § 1), si può ipotizzare una riduzione di velocità attribuibile al sistema drenante anche in questa zona della frana.

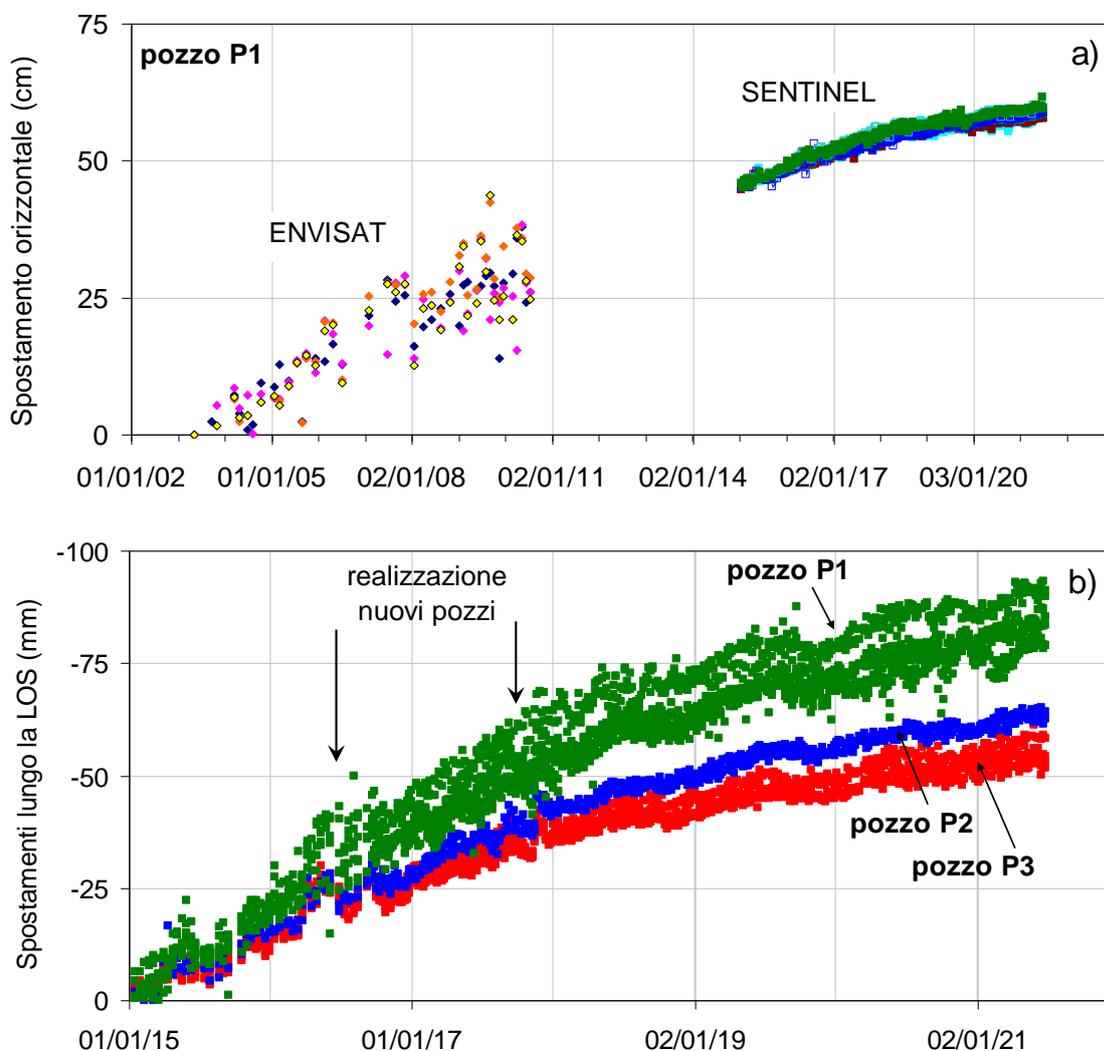


Fig. 3. Evoluzione temporale degli spostamenti in corrispondenza dei pozzi realizzati nel 1994 ricavata da dati DInSAR Envisat e Sentinel-1: periodo 2003-2021 (a); periodo 2015-2021 (b).

3. Andamento delle pressioni interstiziali in prossimità dei pozzi drenanti

Come detto, i sistemi di pozzi drenanti realizzati nel 1994 e nel 2017 sono costituiti rispettivamente da tre e cinque pozzi, di diametro 7,5 m e profondità 15 m, che non hanno funzione strutturale. Tre livelli di ventagli di dreni sub-orizzontali si estendono per circa 30 m a partire dai pozzi. Nelle posizioni indicate in Figura 1, nel 2018 sono stati installati tre sistemi di piezometri Casagrande (P2-P5-P7). In ogni sistema sono stati installati tre piezometri a 10 m, 20 m e 30 m di profondità dal piano campagna. Il livello dell'acqua nei piezometri è stato monitorato in continuo e da remoto per circa 3 anni. Come mostra la Figura 4, l'acquisizione automatica si è interrotta circa un anno fa; le ultime misure sono state effettuate manualmente. I risultati sperimentali mostrano una lenta ma evidente diminuzione della pressione dell'acqua interstiziale in tutti i piezometri. Per valutare gli effetti del drenaggio sulle

pressioni interstiziali, è stata eseguita la determinazione della conducibilità idraulica in vari punti del sottosuolo ed è stato costruito un modello di filtrazione 3D della frana con il programma MODFLOW. In particolare, sono state eseguite prove di permeabilità a carico variabile in tutti i piezometri disponibili, innalzando il pelo libero dell'acqua fino a piano campagna e monitorando i successivi transitori di equalizzazione. L'interpretazione basata sul modello semplificato di Hvorslev (1951) ha fornito valori di conducibilità idraulica dell'ordine di $10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s nella componente sabbiosa, prevalente nel corpo di frana, e $10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s nella componente argillosa, prevalente al di sotto della superficie di scorrimento.

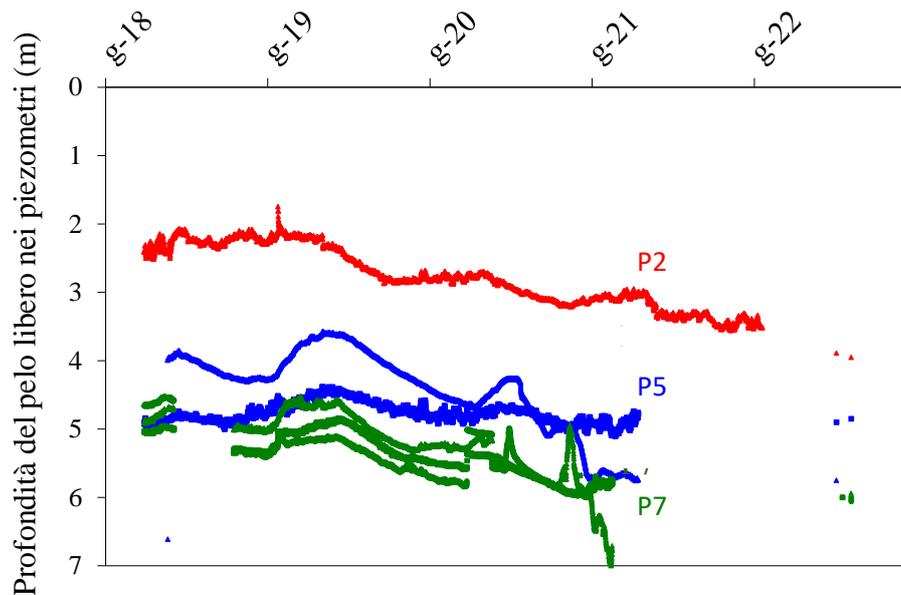


Fig. 4. Profondità del pelo libero nei piezometri Casagrande

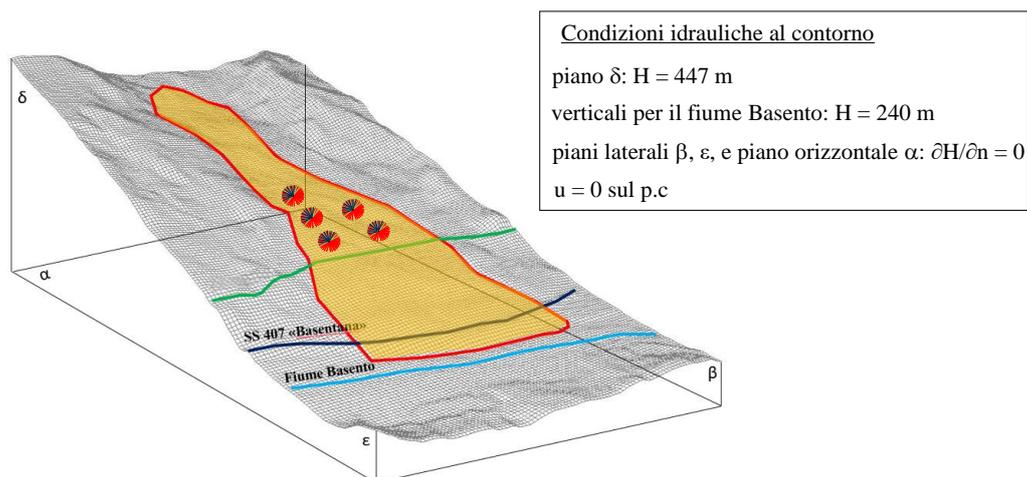


Fig. 5. Dominio di calcolo e condizioni al contorno idrauliche.

La distribuzione delle pressioni interstiziali nel sottosuolo è stata valutata per due casi limite corrispondenti a sottosuolo omogeneo con conducibilità idraulica $k = 10^{-9}$ m/s e sottosuolo disomogeneo con terreni in frana molto più permeabili della formazione di base e permeabilità rispettivamente pari a $k_{frana} = 5 \times 10^{-6}$ m/s, $k_{formazione} = 10^{-9}$ m/s. È stata considerata la condizione stazionaria con $u = 0$ sul piano campagna, sia in presenza che in assenza dei pozzi drenanti. La Figura 5 riporta il dominio di calcolo, in cui la geometria della frana risulta molto semplificata, e le condizioni al contorno idrauliche. I risultati mostrano che il drenaggio fa diminuire le altezze di pressione interstiziale in corrispondenza dei piezometri *P2-P5-P7* di valori prossimi a quelli determinati sperimentalmente. Nel prosieguo dello studio, all'aumentare del livello di conoscenza delle caratteristiche fisiche e delle proprietà idrauliche dei terreni in frana, saranno eseguite nuove analisi per la simulazione delle condizioni transitorie corrispondenti alle serie storiche di pioggia.

Conclusioni

In questo articolo sono stati mostrati i primi risultati dello studio di un grande sistema franoso in formazioni strutturalmente complesse della catena appenninica in Basilicata in cui sono stati realizzati importanti sistemi di pozzi drenanti nel 1994 e nel 2017. L'analisi degli spostamenti del corpo di frana e delle strutture in essa realizzate è stata eseguita grazie a misure inclinometriche ed elaborazione di dati DInSAR. I risultati suggeriscono che i sistemi drenanti hanno contribuito a ridurre le velocità del sistema franoso nella zona intorno alla linea ferroviaria. In particolare, nel periodo antecedente al 2017, a valle della linea ferroviaria le velocità medie annue massime stimate erano di circa 1 cm/anno, successivamente si sono ridotte di circa la metà. A monte della linea ferroviaria, dove le relazioni tecniche disponibili evocano velocità di spostamento molto elevate negli anni '90, i nuovi pozzi realizzati nel corpo principale di frana si muovono verso valle con velocità medie di circa 1÷2 cm/anno, che corrispondono alle velocità basali determinate con misure inclinometriche nelle loro vicinanze. Altri pozzi, sempre a monte della linea ferroviaria, risultano attualmente fermi. Allo scopo di individuare misure di ulteriore riduzione della velocità del sistema franoso, considerata l'elevata eterogeneità dei terreni e delle loro proprietà idrauliche, è stata valutata l'influenza della distribuzione di permeabilità sull'efficienza di un sistema di pozzi drenanti. I risultati preliminari del calcolo mostrano l'efficacia del drenaggio, con riduzioni di pressioni interstiziali prossime a quelle registrate sperimentalmente. Nel prosieguo dello studio, si intende approfondire ulteriormente questo aspetto.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata dal PON Programma R&I 2014-2020 (MITIGO, ARS01_00964). Alcuni dati sono stati ottenuti all'interno di una convenzione tra la Scuola d'Ingegneria dell'Università della Basilicata e Rete Ferroviaria Italiana.

Bibliografia

- Di Maio C., Fornaro G., Gioia D., Reale D., Schiattarella M., Vassallo R. (2018). In situ and satellite long-term monitoring of the Latronico landslide, Italy: displacement evolution, damage to buildings, and effectiveness of remedial works. *Engineering Geology* 245, 218-235.
- Hvorslev M.J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. *Waterways experimental station. Corps of Engineers, US Army. Vicksburg, Mississippi. Bulletin, 36, 50, 1-50.*
- IGEM (2000). Relazione tecnica. Lavori di sondaggi sulle linee Foggia-Potenza e Potenza-Metaponto. Committente: Ferrovie dello Stato S.p.A.