

**Riconoscimenti** Il prototipo di resistivimetro è stato realizzato in collaborazione con LSI-Lastem. La ricerca è stata parzialmente finanziata da Fondazione Cariplo, grant n° 2016-0785.

### Bibliografia

- Cardarelli E., Cercato M., De Donno G.; 2014: *Characterization of an earth-filled dam through the combined use of electrical resistivity tomography, P-and SH-wave seismic tomography and surface wave data*. J. of Appl. Geophys., **106**, 87-95.
- Hilbich C, Fuss C., Hauck C.; 2011: *Automated time-lapse ERT for improved process analysis and monitoring of frozen ground*. Permafrost. Periglacial Processes., **22**, 306-319.
- Kim J.-H., Yi M.-J., Song Y., Seol S.J., Kim K.-S.; 2007: *Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam*. J. of Environ. and Eng. Geophys., **12**(2), 221-235.
- Loperte A., Soldovieri F., Palombo A., Santini F. and Lapenna V.; 2016: *An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill dam (southern Italy)*. Eng. Geol., **211**, 162– 170.
- Perri M. T., Boaga J., Bersan S., Cassiani G., Cola S., Deiana R.; 2014: *River embankment characterization: The joint use of geophysical and geotechnical techniques*. J. of Appl. Geophys. **110**, 5-22.
- Supper R., Römer A., Kreuzer G., Jochum B., Ottowitz D., Ita A., Kauer S.; 2011: *The GEOMON 4D electrical monitoring system: current state and future developments. Instrumentation and data acquisition technology*. In: Proc. GELMON 2011, Wien, Austria, 23-26, ISSN 1017 – 8880.
- Takakura S., Yoshioka M., Ishizawa M., and Sakai N.; 2013: *Measurement of soil temperature in the slope of an embankment by using a large-scale rainfall simulator*. In Proc. 11th SEGJ International Symposium, Yokohama, Japan, pp. 248-251.

## SPERIMENTAZIONE ALLA SCALA DI LABORATORIO PER IL MONITORAGGIO DI FRANE INDOTTE DA PRECIPITAZIONI CON MISURE GEOELETTICHE *TIME-LAPSE*

G. Tresoldi<sup>1</sup>, D. Arosio<sup>2</sup>, D. Brambilla<sup>1</sup>, A. Hojat<sup>3,1</sup>, V.I. Ivanov<sup>1</sup>, L. Longoni<sup>1</sup>, M. Papini<sup>1</sup>, M. Scaioni<sup>1</sup>, L. Zanzi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Italy

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italy

<sup>3</sup> Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

**Introduzione.** Secondo l'Inventario dei Fenomeni Franosi d'Italia (IFFI), al 2016 le frane censite in Italia sono 614.799, interessano un'area pari al 7.5% del territorio nazionale e il 70.5% dei Comuni italiani. Le frane indotte da precipitazioni, inoltre, per la loro evoluzione veloce, sono una grave minaccia per l'incolumità della popolazione, dei beni e delle infrastrutture del territorio che, in assenza di un sistema di allerta adeguato non possono essere salvaguardati. Lo studio e il monitoraggio di fenomeni franosi può essere realizzato a diverse scale e con diverse tecnologie, ma negli ultimi decenni le metodologie geofisiche sono state largamente utilizzate per questo scopo, grazie alla peculiarità di essere non invasive e di poter rilevare la variazione di parametri fisici in un volume di terreno. Per quanto riguarda le frane superficiali, analizzate in questo studio, uno dei fattori predisponenti per l'attivazione è l'apporto precipitativo, che va a determinare variazioni nel contenuto d'acqua del suolo e nella pressione interstiziale. Diversi ricercatori hanno constatato l'utilità di misure geoelettriche per la valutazione del contenuto idrico nel corpo di frane superficiali (Perrone *et al.*, 2008; De Bari *et al.*, 2011; Ravindran e Prabhu, 2012) e in alcuni casi è stato predisposto un sistema di monitoraggio in continuo (Supper *et al.*, 2008; Kuras *et al.*, 2009; Hilbich *et al.*, 2011).

L'obiettivo di questo studio è quello di valutare, partendo dalla sperimentazione di laboratorio, l'applicabilità di un monitoraggio geoelettrico nel riconoscimento di un livello soglia di contenuto d'acqua per l'instaurarsi dell'instabilità di una frana superficiale.

**Materiali e metodi.** Nel laboratorio di Geologia e Geofisica Applicata del Politecnico di Milano, campus di Lecco, nell'ambito di un progetto interdisciplinare, grazie all'utilizzo di un simulatore di frana appositamente progettato, è stato realizzato un versante delle dimensioni di 2 m di lunghezza, 0,80 m di larghezza e 0,15 m di spessore (Fig. 1). Sul corpo di frana, realizzato interamente in sabbia, sono state testate varie metodologie di monitoraggio (fotogrammetrico, topografico, geofisico). Per quanto riguarda il presente studio è stata posta l'attenzione sulla possibilità di utilizzare misure geoelettriche *time lapse* per identificare zone caratterizzate da un contenuto d'acqua limite per la stabilità. Sono stati progettati, per l'utilizzo in laboratorio, due cavi a 24 canali con elettrodi in miniatura, compatibili con il resistivimetro commerciale IRIS Syscal Pro (Fig. 2). Sono stati eseguiti quattro esperimenti nei mesi di maggio e giugno 2017, facendo variare i parametri geometrici del versante, modificando l'intensità delle precipitazioni simulate tramite ugelli e adattando i parametri di misura, come ad esempio la riduzione del tempo di misura e la modifica dell'azimut del profilo. Le misure geoelettriche sono state eseguite implementando uno schema Wenner e, per poter analizzare con adeguata risoluzione l'intero spessore è stata scelta una distanza interelettrodica di 3 cm, che garantisce una risoluzione orizzontale di 3 cm e verticale di 1.5 cm. Per evitare l'interazione tra i cavi e le precipitazioni simulate, gli elettrodi e i cavi sono stati sepolti a una profondità di 1cm in direzione longitudinale rispetto al versante. Grazie ai dati di una sonda Time Domain Reflectometry (TDR) inserita nel modello, è stato possibile calibrare la relazione di Archie (Archie, 1942) per ottenere mappe di contenuto d'acqua da mappe di resistività a seguito di inversione.

**Risultati e discussione.** Osservando le mappe di resistività a seguito di inversione ottenute dall'indagine *time lapse* è possibile, andando ad analizzare i cambiamenti di resistività nel tempo, valutare come l'acqua vada a distribuirsi all'interno del pendio. Per avere una misura quantitativa della variazione di saturazione del terreno sono stati analizzati i dati di una sonda TDR, inserita all'interno del modello di versante, unitamente con le misure geoelettriche, in modo da poter trasformare le mappe di resistività in mappe di saturazione. E' stata quindi calibrata la relazione di Archie, stimando, per il terreno utilizzato, i parametri della formula empirica (Fig. 3). Potendo disporre di ulteriori strumenti nel corso delle prove (telecamere, fibra ottica), è stato possibile analizzare gli eventi franosi e correlarli con le variazioni di resistività e quindi di contenuto d'acqua. Un esperimento di questo genere, pone le basi per ulteriori studi



Fig. 1 - Simulatore di frana e modello in scala.

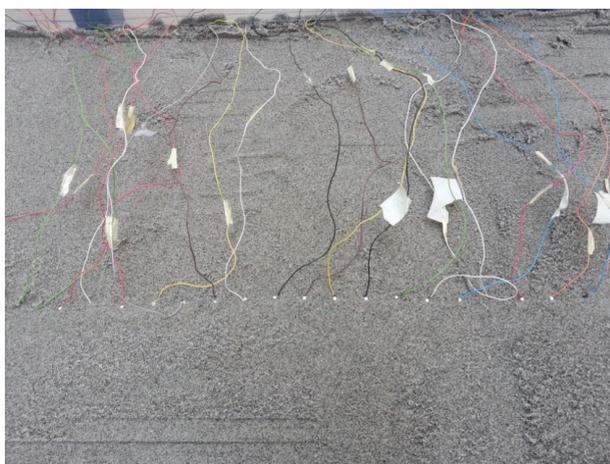


Fig. 2 - Elettrodi dimensionati per le misure di resistività sul modello.

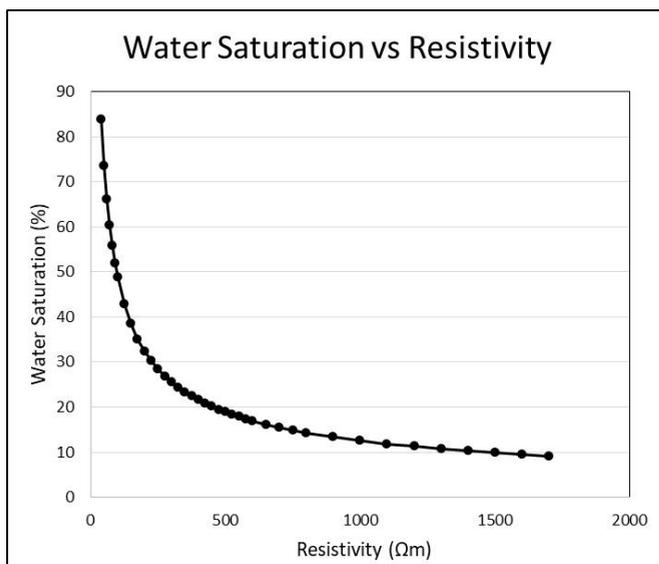


Fig. 3 - Relazione tra saturazione e resistività.

delle misure di resistività all'inizio di un evento di frana, riuscendo a relazionare valori di resistività con valori di saturazione del suolo. L'identificazione del principio di rottura è risultato coerente con gli altri metodi d'indagine utilizzati nelle prove.

**Riconoscimenti** La ricerca è stata parzialmente finanziata da Fondazione Cariplo, grant n° 2016-0785.

#### Bibliografia

- Archie G. E.; 1942: *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., **146**, 54–62.
- De Bari C., Lapenna V., Perrone A., Puglisi C., Sdao F.; 2011: *Digital photogrammetric analysis and electrical resistivity tomography for investigating the Picerno landslide (Basilicata region, southern Italy)*. Geomorphology, **133**, 34–46.
- Hilbich C, Fuss C., Hauck C.; 2011: *Automated time-lapse ERT for improved process analysis and monitoring of frozen ground*. Permafrost and Glacial Processes, **22**, 306–319.
- Kuras O., Pritchard J. D., Meldrum P. I., Chambers J. E., Wilkinson P. B., Ogilvy R. D., Wealthall G. P.; 2009: *Monitoring hydraulic processes with automated time-lapse electrical resistivity tomography (ALERT)*. C. R. Geosci., **341**(10), 868–885.
- Perrone A., Vassallo R., Lapenna V., Di Maio C.; 2008: *Pore water pressures and slope stability: a joint geophysical and geotechnical analysis*. J. Geophys. Eng., **5**, 323–337.
- Ravindran A., Prabhu H. M. A. K.; 2012: *Prediction and control of landslide using W-4 system – 2D electrical resistivity imaging technique in Padukadu, Ooty, Nilgiri District, Tamilnadu, India*. ARPN J. Earth Sci., **1**(2), 42–47.
- Supper R., Römer A., Jochum B., Bieber G., Jaritz W.; 2008: *A complex geo-scientific strategy for landslide hazard mitigation – from airborne mapping to ground monitoring*. Adv. Geosci., **14**, 195–200.

legati alla definizione di soglie di stabilità e alla predisposizione di una procedura di allerta, applicabili nel caso delle frane superficiali così come in quello dell'instabilità di rilevati in terra.

**Conclusioni.** Le misure geoelettriche *time lapse* realizzate durante prove di laboratorio su una frana superficiale simulata hanno permesso di analizzare la variazione della saturazione del suolo in funzione dell'apporto precipitativo, e di identificare zone con contenuto d'acqua disomogeneo. Grazie alla calibrazione dei dati di resistività mediante una sonda TDR è stato possibile studiare la risposta