

- deGroot-Hedlin C., and Constable S.; 1990: *Occams' inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data*; Geophysics, vol. 55, No. 12 (Dec 1990); P. 1613-1624
- Griffiths D.H., and Barker R.D.; 1993: *Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modeling in Areas of Complex Geology*. Journal of Applied Geophysics, v.29, pp.21-26. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J)
- Loke M.H., and Lane J.W.; 2004: *Inversion of data from electrical imaging surveys in water-covered areas*; ASEG Extended Abstracts 2004, 17th Geophysical Conference, pp. 1-4.
- Loke M.H. and Barker R.D.; 1996: *Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections Using a Quasi-Newton Method*; Geophysical Prospecting, v. 44(1), pp. 131 – 152.

## SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO GEOELETRICO PERMANENTE PER LA VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ ARGINALE

G. Tresoldi<sup>1</sup>, D. Arosio<sup>2</sup>, A. Hojat<sup>3,1</sup>, L. Longoni<sup>1</sup>, M. Papini<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.** Gli argini sono l'ultima difesa per salvaguardare le vite umane e i beni materiali dalla potenza distruttrice delle inondazioni. Sfortunatamente ad oggi in Italia non è prevista per legge una procedura sistematica e oggettiva di valutazione della stabilità degli argini. I consorzi di Bonifica, enti preposti alla manutenzione dei rilevati arginali, eseguono infatti ispezioni visuali delle strutture, operazioni soggettive che dipendono fortemente dall'operatore che realizza il sopralluogo. Negli ultimi decenni le metodologie geofisiche sono state utilizzate di frequente per valutare lo stato di salute dei rilevati in terra (Kim *et al.*, 2007; Cardarelli *et al.*, 2014) e in particolar modo la geoelettrica è stata utilizzata per il riconoscimento di zone di filtrazione preferenziale e per valutare la saturazione differenziale all'interno delle strutture (Takakura *et al.*, 2013; Perri *et al.*, 2014; Loperte *et al.*, 2016). Solo in pochi casi, però, sono stati implementati sistemi di monitoraggio permanenti (Hilbich *et al.*, 2011; Supper *et al.*, 2011). L'obiettivo di questo lavoro è la valutazione della stabilità dei rilevati arginali in terra in tempo reale, in una maniera indiretta, economica e efficace, grazie all'implementazione di un monitoraggio geoelettrico per il riconoscimento di vie preferenziali di filtrazione e zone a contenuto d'acqua non omogeneo.

**Materiali e metodi.** Un prototipo di resistivimetro è stato progettato e installato sull'argine in terra di un canale irriguo nei pressi di Mantova con il fine di controllare in tempo reale la saturazione del terreno e la filtrazione all'interno del rilevato. Lo strumento è stato progettato in modo da essere installato permanentemente: è alimentato da pannello solare, invia i dati a frequenza prefissata tramite connessione internet ed è interamente programmabile da remoto. È stata inoltre posta particolare attenzione nella progettazione delle parti sepolte: i due cavi da 23m, allocati in una trincea profonda mezzo metro (Fig. 1), sono stati ricoperti da una guaina anti roditori e per garantire un buon accoppiamento con il suolo sono stati equipaggiati con 48 elettrodi a piastra di acciaio inossidabile. Il resistivimetro esegue misure con schema Wenner con una distanza minima tra gli elettrodi di 1m, garantendo una risoluzione orizzontale di 1m e verticale di 0.5m. Nello stesso sito è stata installata una centralina meteorologica per correlare le variabili esterne, come il livello dell'acqua del canale, le precipitazioni e la temperatura dell'aria, con i dati misurati. Sono stati analizzati, ad oggi, dati di un periodo di tempo di due anni e sono state studiate le variazioni stagionali della resistività all'interno dell'argine associate alla variazione dell'acqua nel canale col trascorrere delle stagioni irrigue. Anche le precipitazioni e la temperatura influiscono sulle mappe tomografiche di resistività e il *dataset* dei dati meteorologici è stato utilizzato per considerare questi effetti. Durante il periodo di

monitoraggio sono stati effettuati vari test per confrontare le misure del prototipo con quelle di uno strumento commerciale (IRIS Syscal Pro) al fine di valutarne l'affidabilità. I risultati ottenuti hanno confermato che il prototipo fornisce dati affidabili e accurati.

**Risultati e discussione.** Il livello dell'acqua nel canale e le precipitazioni sono risultate essere le variabili che più influiscono sulle misure di resistività, e quindi sul contenuto d'acqua del suolo, mentre la temperatura ha un effetto considerabile di second'ordine nell'ambito di questo studio. Grazie all'analisi dei dati è stato possibile comprendere e monitorare la variazione del contenuto d'acqua all'interno del corpo arginale in maniera qualitativa. Al fine di effettuare un monitoraggio quantitativo, è stata ricavata una relazione empirica, sito specifica, che lega la resistività a seguito d'inversione con il contenuto d'acqua del suolo. Grazie a un carotaggio effettuato sul sito d'indagine è stata ottenuta una relazione a potenza (Fig. 2) utile per poter trasformare le mappe di resistività in mappe di contenuto d'acqua che possono essere utilizzate come input per implementare simulazioni di filtrazione e di stabilità

**Conclusioni.** Il monitoraggio geoelettrico

fornisce validi risultati per la valutazione della distribuzione dell'acqua all'interno del rilevato, sia da un punto di vista qualitativo, sia da un punto di vista quantitativo. Grazie alla trasformazione delle mappe di resistività in mappe di contenuto d'acqua è possibile valutare le zone con un



Fig. 1 - Cavi, ricoperti da una guaina anti roditore ed equipaggiati con elettrodi a piastra, allocati in trincea

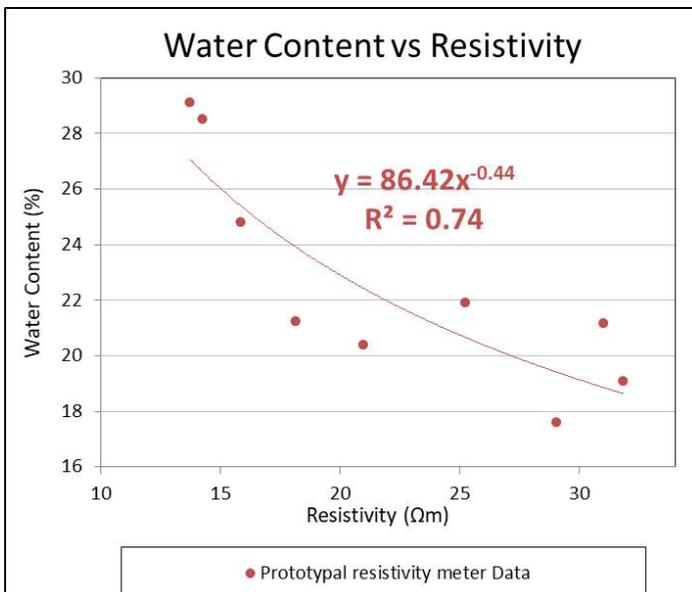


Fig. 2 - Relazione tra contenuto d'acqua e resistività.

comportamento di filtrazione disomogeneo in tempo reale e agire di conseguenza. La distribuzione spaziale del contenuto d'acqua nel suolo può essere utilizzata da strumenti software per valutare il grado di stabilità del rilevato e definire delle soglie di allerta. Uno strumento di questo genere va a riempire un gap tecnologico importante poiché fornisce un mezzo per indagare in continuo la situazione interna al corpo arginale, ad ora sconosciuta, garantendo la possibilità di operare per mitigare il rischio di rottura del rilevato.

**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., Bersani 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 GEOELETTRICHE *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.