

TENSIO-INCLINOMETRO: UNO STRUMENTO WIRELESS A SOSTEGNO DEI SISTEMI DI EARLY WARNING PER FRANE METEO-INDOTTE

Lucia Coppola

Università degli studi di Napoli "Federico II"

lucia.coppola@unina.it

Alfredo Reder

Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

alfredo.reder@cmcc.it

Luca Pagano

Università degli studi di Napoli "Federico II"

lupagano@unina.it

Sommario

I sistemi di early warning per frane meteo indotte attualmente implementati sono essenzialmente basati sul monitoraggio e l'interpretazione delle precipitazioni. L'accuratezza di tali sistemi, indispensabile per minimizzare mancati e falsi allarmi, può essere migliorata puntando anche al monitoraggio delle variabili effetto delle precipitazioni stesse, ovvero quelle variabili precorritrici del fenomeno di instabilità. Si tratta, in particolare, delle variabili idrologiche (suzione e contenuto d'acqua) che descrivono lo stato dell'imbibizione della coltre e delle variabili cinematiche, che caratterizzano il comportamento deformativo che precede la rottura. A tale scopo è stato migliorato ed ingegnerizzato uno strumento realizzato in precedenza, il tensio-inclinometro, e sono state realizzate alcune prove di validazione dello strumento su modello fisico.

1. Introduzione

In pendii costituiti da coltri di terreni a granulometria grossolana o intermedia, le precipitazioni durante la stagione umida riducono i livelli di suzione e della resistenza ad essi associata. È possibile in questo modo che, per effetto di fenomeni significativi incardinati in periodi estremamente umidi, si possano generare fenomeni di frana. Questi fenomeni si presentano tipicamente a cinematica rapida e sono per questo associati a danni e vittime (Haque et al., 2016). Solo in Italia, un considerevole numero di eventi catastrofici ha colpito differenti regioni, come la Campania (Cascini and Ferlisi, 2003, Pagano et al., 2010), il Piemonte (Villar Pellice in 2008, Arattano et al. 2010), la Liguria (Cinque Terre in 2011, Agnoletti et al. 2019) e la Sicilia (Messina in 2009, Maugeri et al., 2011). La mitigazione del rischio viene talvolta affrontata seguendo approcci non strutturali che consistono nello sviluppo di sistemi di preannuncio del fenomeno (landslide early warning system, LEWS) (Alfieri et al., 2012; Greco & Pagano, 2017). Un sistema LEWS è efficace se la sua operatività non comporta da un lato mancati allarmi e, dall'altro, un numero significativo di falsi allarmi (Greco & Pagano, 2017; Reder & Rianna, 2021).

La maggior parte dei LEWSs si basa sul monitoraggio delle precipitazioni (Keefer et al., 1987; Pagano et al., 2010), ovvero della causa principale del fenomeno. Le precipitazioni costituiscono tuttavia solo il primo anello di una catena di eventi interni alla coltre che possono concludersi con il fenomeno di instabilità: incremento di contenuto d'acqua, riduzione di suzione, cinematica pre-rottura, cinematica di rottura. È allora ragionevole supporre che accompagnare l'interpretazione delle precipitazioni a quella di alcune variabili proxy degli eventi della catena descritta possa consentire di migliorare l'accuratezza previsionale di un LEWS, soprattutto per ciò che concerne la minimizzazione dei falsi allarmi. Ad eccezione della cinematica associata al fenomeno di instabilità, che, in presenza di una cinematica rapida, non può ovviamente essere preso in considerazione, il presente studio indaga se e in che misura il contestuale monitoraggio di livelli di suzione e cinematica pre-rottura della coltre contribuisca a migliorare le prestazioni predittive di un LEWS.

In letteratura sono documentati diversi LEWS nei quali le misure di precipitazione sono integrate con misure di altre variabili. Puntano sulla cinematica della coltre gli approcci suggeriti da Dixon et al., (2012), basati sulle misure di spostamenti interni alla coltre monitorati attraverso emissioni acustiche, e da Barla & Antolini, (2016), basati sugli spostamenti superficiali monitorati attraverso stazione totale, GPS e tecniche fotogrammetriche. Tuttavia non è chiaro se la cinematica considerata sia quella pre-

rottura o quella associata al meccanismo di instabilità. Peraltro le tecniche di monitoraggio seguite sono affette da numerose limitazioni, riguardanti per lo più l'interpretazione delle emissioni acustiche e la debolezza del segnale GPS durante gli eventi piovosi. Anche le misure di contenuto volumetrico d'acqua sono state utilizzate come variabili precorritrici aggiuntive (Uchimura et al., 2015; Segoni et al., 2018). Tuttavia, il contenuto volumetrico non rappresenta una variabile propriamente adatta a caratterizzare le condizioni che precedono l'instabilità. I pendii oggetto di attenzione generalmente sono costituiti da materiale granulare privo di coesione e caratterizzati da un'inclinazione prossima al valore dell'angolo di attrito; di conseguenza i valori di pressione interstiziale raggiunti prima dell'instabilità non superano alcune unità di kPa (sia nel range positivo che negativo) (Balzano et al. 2019b). In questo intervallo, il contenuto volumetrico è caratterizzato da una bassa sensibilità nel range negativo e da una sensibilità nulla nel range positivo. Di contro, l'utilizzo di tensiometri commerciali consente di considerare la pressione interstiziale come variabile precorritrice il fenomeno di instabilità (l'accuratezza di questi strumenti è tipicamente inferiore ad 1 kPa, sia nel range positivo che in quello negativo).

La nota presenta un "Tensio-inclinometro" di seconda generazione, progettato per monitorare contestualmente i) la pressione interstiziale utilizzando un tensiometro commerciale; ii) i cinematismi che anticipano la rottura tramite l'inclinazione dell'asta tensiometrica. Si ipotizza che la variazione dell'inclinazione dell'asta tensiometrica installata nella coltre costituisca una variabile appropriata a descrivere le deformazioni pre-rottura della coltre.

2. Il tensio-inclinometro

2.1 Descrizione generale

Il tensio-inclinometro consiste di un tensiometro commerciale corredato di un accelerometro all'estremità. Il tensiometro consente di monitorare la pressione interstiziale nel range compreso tra -85 kPa e +100 kPa. All'estremità inferiore si trova una pietra porosa (caratterizzata da un alto valore di ingresso d'aria) che funge da collegamento tra il fluido interstiziale e la camera di misura. Al di sopra di essa si trova un sensore di pressione piezo-elettrico. Una membrana costantemente esposta all'atmosfera consente di monitorare la pressione dell'aria, l'output dello strumento è costituito dalla differenza $u_a - u_w$ (con u_a pressione dell'aria e u_w pressione della fase liquida).

I sensori ed i dispositivi elettronici sono installati su un chip semiconduttore, contenuto in una scatola metallica fissata meccanicamente all'asta tensiometrica, adattabile anche ad altre tipologie di tensiometri (fig. 1).

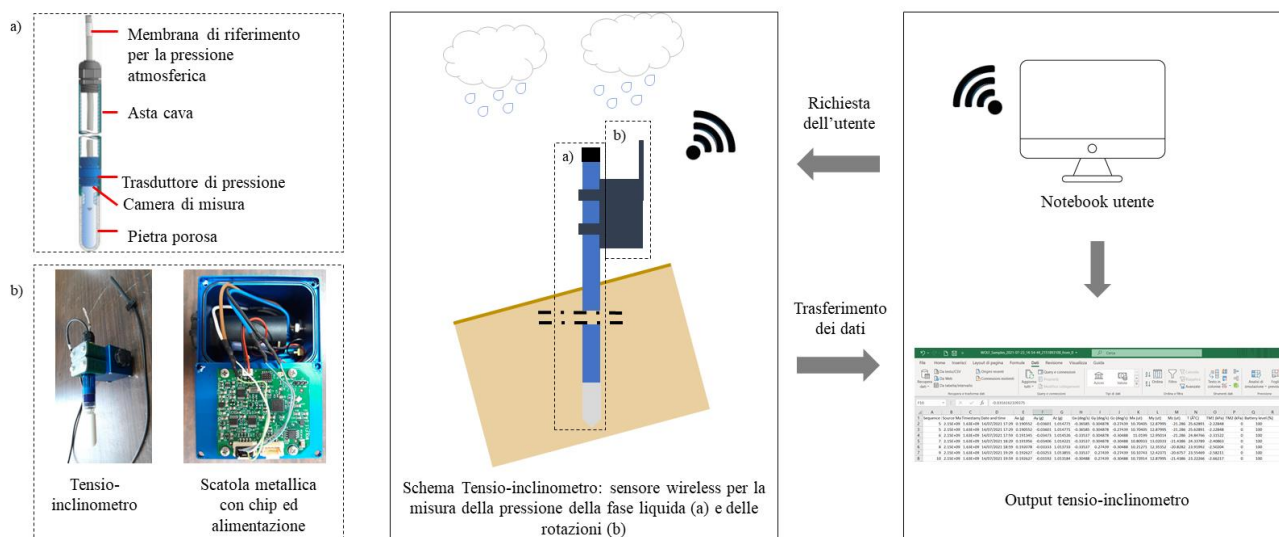


Fig. 1. Schematizzazione dell'assemblaggio, dell'installazione e della gestione del tensio-inclinometro.

L'accelerazione statica viene acquisita da un accelerometro capacitivo (facente parte di una piattaforma

inerziale e basato su tecnologia MEMS). Esso misura le componenti dell'accelerazione gravitazionale attivate durante la rotazione. Il sistema di alimentazione dell'intero strumento è costituito da una batteria al litio ad alta densità di carica volumetrica. Esso garantisce una lunga durata di funzionamento e consente di minimizzare le dimensioni della scatola metallica. Il vano porta-batteria agevola la sostituzione della batteria perché l'operazione può essere condotta senza che si apra la scatola metallica. Nel chip sono integrati una memoria non volatile per l'archiviazione dei dati acquisiti ed uno specifico dispositivo di conversione dell'output del tensiometro da analogico a digitale. Sia il sistema di alimentazione che quello di archiviazione garantiscono un anno di continuo e corretto funzionamento dello strumento.

2.2 Modalità di funzionamento

Il tensio-inclinometro misura, digitalizza e archivia la suzione e l'inclinazione dell'asta inclinometrica seguendo lo schema ciclico qui di seguito descritto.

Ad intervalli regolari, definiti dall'utente, si attivano sia la piattaforma sia il convertitore analogico-digitale; segue un breve intervallo di auto-calibrazione, concluso il quale il sistema acquisisce sia il dato tensiometrico sia il dato inclinometrico e li archivia entrambi. Il sistema si pone quindi in configurazione di stand-by fino alla successiva acquisizione, in modo da minimizzare il consumo energetico (fig. 2).

Ciascun tensio-inclinometro è completamente privo di cavi e su richiesta trasmette wireless i dati ad un nodo collettore remoto connesso ad un notebook mediante USB (si veda fig.1).



Fig 2. Schema di funzionamento ciclico del tensio-inclinometro.

3. Sperimentazione su modello fisico

I prototipi di tensio-inclinometro sviluppati sono stati testati in due modelli fisici di pendio, di dimensioni differenti, realizzati per simulare frane meteo-indotte in coltri costituite da materiale piroclastico. Il materiale utilizzato è stato posto in opera mediante deposizione aerea e successivamente vegetato con graminacee. Le prove sono state eseguite applicando sulla superficie della coltre una significativa intensità di pioggia artificiale attraverso due ugelli opportunamente posizionati.

Il modello fisico di dimensioni più piccole (fig. 3a) alloggia uno strato di spessore massimo pari a 18 cm. Nella prova eseguita il monitoraggio è stato realizzato installando due tensio-inclinometri, approfonditi di 10 cm e 18 cm (fino alla base). La figura 3b mostra come inizialmente lo strato si trovi in una condizione di imbibizione spinta, prossima alla completa saturazione, caratterizzata da valori di pressione interstiziale solo leggermente negativi. Nel corso della prova ad entrambe le profondità si sono registrati progressivi incrementi di pressione interstiziale. Il tensio-inclinometro posto alla base dello strato (18 cm) rileva valori positivi di pressione interstiziale, mentre quello più superficiale registra sempre valori negativi (fig. 3b). Entrambi gli strumenti ruotano progressivamente secondo il verso di spostamenti verso valle crescenti con la quota. Segnalano un repentino incremento di rotazione circa dieci minuti prima che si manifesti il fenomeno di instabilità (fig. 3c e fig. 3d). Il cinematismo è associato presumibilmente a deformazioni distorsionali pre-rottura, che si sviluppano a seguito della riduzione di confinamento esercitata dalla suzione sullo scheletro solido in presenza dello stato tensionale deviatorico generato dall'inclinazione dello strato.

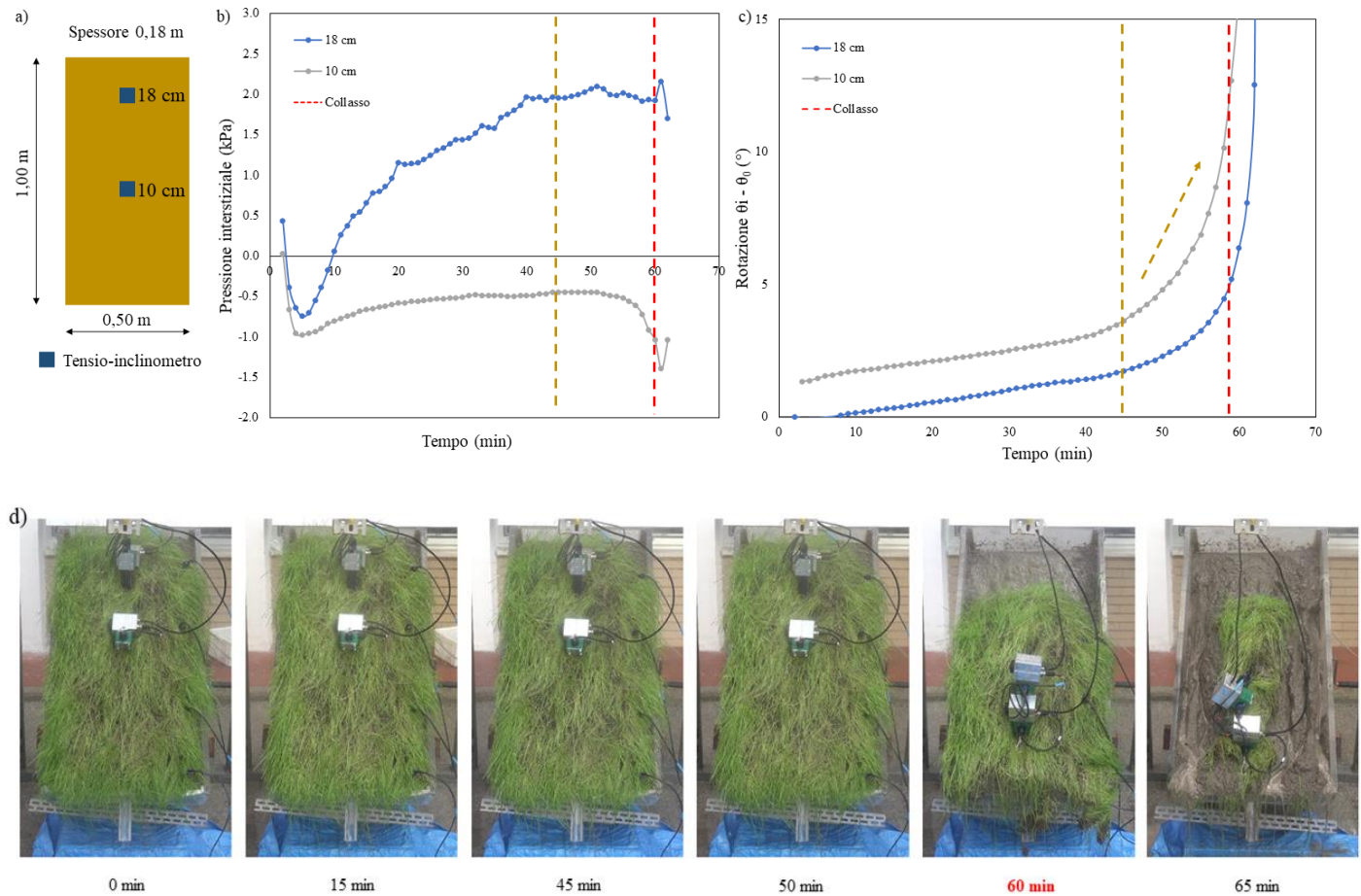
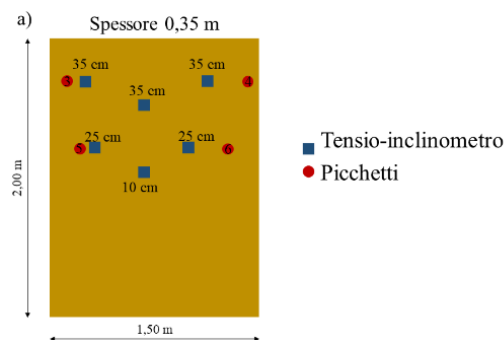


Fig 3. a) Schema modello fisico strumentato; b) andamento delle pressioni interstiziali durante la prova; c) andamento delle rotazioni registrate; d) fotogrammi successivi della prova

Il modello fisico di dimensioni maggiori (fig.4a) consente di ricostituire una coltre di spessore maggiore (fino a 50 cm). Durante la prova eseguita lo spessore posto in opera è stato di 35 cm, ovvero quasi doppio rispetto a quello del test precedente. Sono stati installati sei tensio-inclinometri. Essi sono stati ubicati tutti nella parte sommitale del modello ed approfonditi di 35, 25 o 10 cm. Anche in questo caso lo strato è stato portato inizialmente in uno stato di imbibizione molto spinto di alcuni kPa di suzione (fig.4b e fig.4d). La simulazione dell'evento di precipitazione ha generato anche in questo caso il progressivo approfondimento del fronte umido. I tensiometri hanno segnalato, prima che si sviluppasse il fenomeno di instabilità, valori positivi di pressione interstiziale, maggiori nei punti posti più in profondità (fig.4d). Oltre alle misure di inclinazione sono state realizzate nel corso della prova misure topografiche di superficie a mezzo di stazione totale motorizzata (linea grigia, fig.4c e fig.4e). Esse mostrano come gli spostamenti assoluti di superficie seguano un andamento perfettamente coerente con quello delineato dalle rotazioni registrate con i tensio-inclinometri, e come sia possibile quindi caratterizzare la cinematica acquisendo le sole rotazioni.



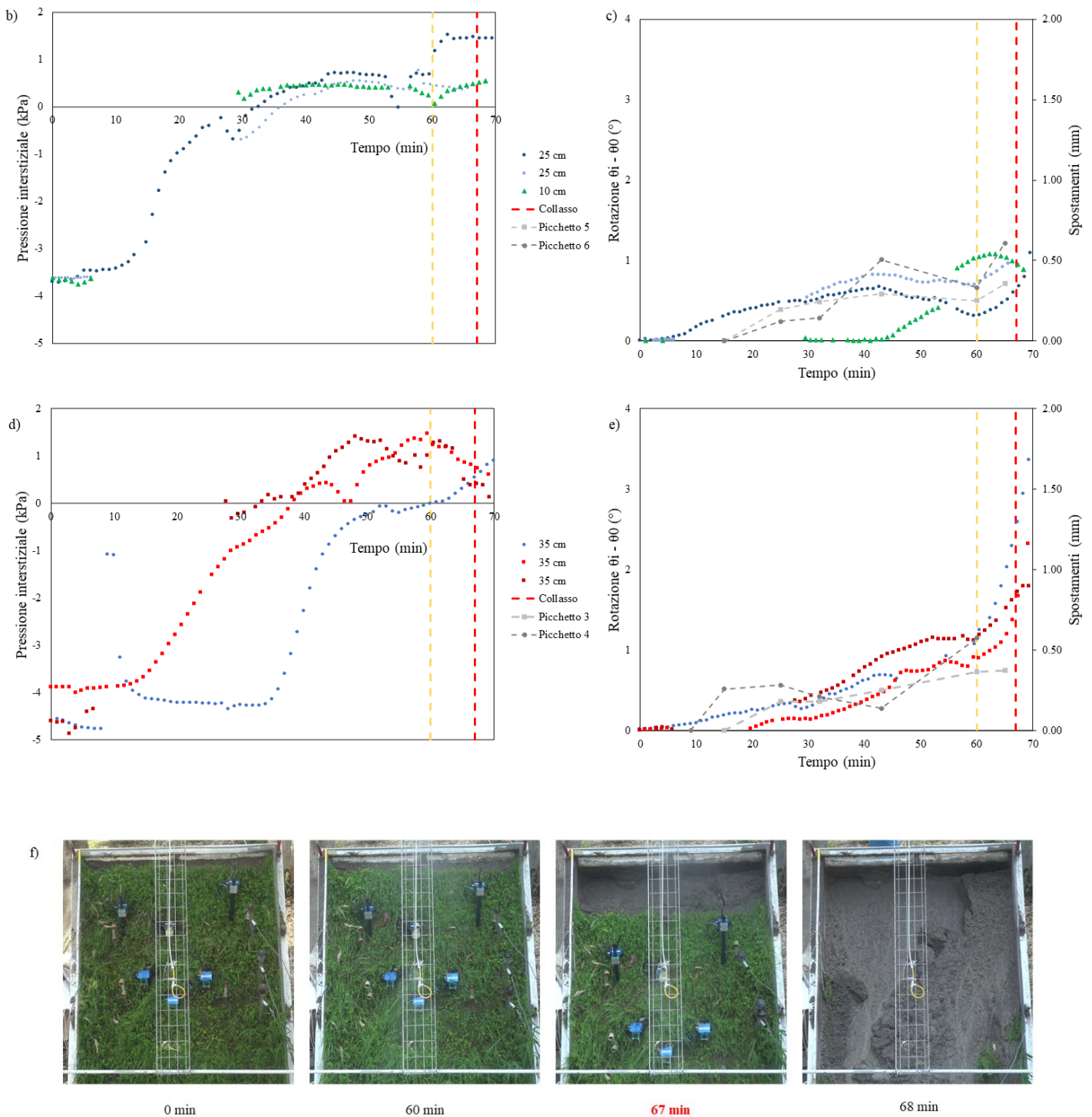


Fig 4. a) Schema modello fisico strumentato; b) andamento delle pressioni interstiziali dei tensiometri superficiali; c) andamento delle rotazioni dei tensiometri superficiali; d) andamento delle pressioni interstiziali dei tensiometri profondi; e) andamento delle rotazioni dei tensiometri profondi; f) fotogrammi successivi della prova

4. Discussioni e conclusioni

I risultati dei test condotti su modello fisico mostrano che, per effetto delle precipitazioni simulate, la coltre ricostituita manifesta una cinematica pre-rottura da riduzioni di suzione con un anticipo di alcune decine di minuti rispetto al fenomeno di instabilità. Per gli spessori tipicamente coinvolti in tali fenomeni, che risultano in genere ben superiori rispetto a quello indagato e decisamente superiori al metro, l'anticipo dovrebbe risultare superiore all'ora. L'intervallo temporale disponibile per l'eliminazione dell'esposizione di persone dovrebbe dunque essere sufficiente.

Il lavoro ha altresì mostrato come la cinematica pre-rottura possa essere convenientemente misurata misurando l'inclinazione di verticali nel corso del processo di imbibizione, in luogo di misure di spostamento superficiale, di solito più onerose e di difficile applicazione nel corso di un evento meteorico.

L'utilizzo del tensio-inclinometro presenta ulteriori vantaggi derivanti:

- dalla semplicità di installazione e gestione;
- dalla totale mancanza di cavi elettrici, che collocati in ambienti tipicamente ostili e alle intemperie sono molto vulnerabili al danneggiamento;
- dall'autonomia del sistema sia in termini di alimentazione che di archiviazione del dato.

Bibliografia

- Agnoletti M, Errico A, Santoro A, Dani A & Preti F. (2019). Terraced Landscapes and Hydrogeological Risk. Effects of Land Abandonment in Cinque Terre (Italy) during Severe Rainfall Events. *Sustainability*. 11. 235. 10.3390/su11010235.
- Alfieri L., Salamon P., Pappenberger F., Wetterhall F., Thielen J (2012).: Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, 35–49, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2012.01.008>,
- Arattano M, Conte RC, Franzi L, Giordan D, Lazzari A, Luino Fabio (2010). Risk management on an alluvial fan: A case study of the 2008 debris-flow event at Villar Pellice (Piedmont, N-W Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences - NAT HAZARDS EARTH SYST SCI*. 10. 999-1008. 10.5194/nhess-10-999-2010.
- Balzano, B., Tarantino A., Nicotera M. V., Forte G., de Falco M., Santo A. (2019b).: Building physically based models for assessing rainfall-induced shallow landslide hazard at catchment scale: case study of the Sorrento Peninsula (Italy). *Can. Geotech. J.* 56: 1291–1303 (2019) dx.doi.org/10.1139/cgj-2017-0611
- Barla, M.; Antolini, F. (2016): An integrated methodology for landslides' early warning systems. *Landslides*, 13, 215–228. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0563-8>
- Cascini L., Ferlisi S.: Occurrence and consequences of flowslides: a case study, *Proceedings of an International Conference on Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation* held in Napoli, 11-13 May 2003, 1, 85-92, 2003
- Dixon N., Spriggs M.P., (2012) Landslide hazard evaluation by means of several monitoring techniques, including an acoustic emission sensor. Available online: <https://repository.lboro.ac.uk/>
- Greco R., Pagano L. (2017).: Basic features of the predictive tools of early warning systems for water-related natural hazards: examples for shallow landslides. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 17, 2213-2227, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2213-2017>, 2017
- Haque U, Blum P, da Silva PF, Andersen P, Pilz J, Chalov SR, Malet JP, Auflič MJ, Andres N, Poyiadji E, Lamas PC, Zhang W, Peshevski I, Pétursson HG, Kurt T, Dobrev N, García-Davalillo JC, Halkia M, Ferri S, Gaprindashvili G, Engström J, Keellings D (2016) Fatal landslides in Europe. *Landslides* 13(6):1545–1554. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0689-3>
- Keefer D.K., Wilson R.C., Mark R.K., Brabb E.E., Brown W.M., Ellen S.D., Harp E.L., Wieczorek G.F., Alger C.S., Zarkin R.S.: Real-time landslide warning during heavy rainfall, *Science*, 238, 921–925, <http://dx.doi.org/10.1126/science.238.4829.921>, 1987.
- Maugeri M., Motta E.: Slope failure. Effects of heavy rainfall on slope behaviour: The October 1, 2009 disaster of Messina (Italy), in lai S. (Ed), *Geotechnics and Earthquake Geotechnics Towards Global Sustainability, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, Springer, Dordrecht, 15, 2011
- Pagano, L, Picarelli, L., Rianna, G., and Urciuoli, G.: A simple numerical procedure for timely prediction of precipitation-induced landslides in unsaturated pyroclastic soils, *Landslides*, 7, 273–289, 2010.
- Reder A., Rianna G., (2021): Exploring ERA5 reanalysis potentialities for supporting landslide investigations: a test case from Campania Region (Southern Italy). *Landslides* 2021. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01610-4>
- Segoni S., Rosi A., Lagomarsino D., Fanti R., Casagli N., (2018): Brief communication: Using averaged soil moisture estimates to improve the performances of a regional-scale landslide early warning system. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 807–812. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-807-2018>
- Uchimura T., Towhata I., Wang L., Nishie S., Yamaguchi H., Seko I., Qiao J., (2015): Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors. *Soils and Foundations* 2015;55(5):1086–1099 <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.010>