

## **GEOMETRIA E CINEMATICA DI UNA FRANA LENTA IN ARGILLE CONSISTENTI**

Roberto Vassallo, Margherita Vallario, Caterina Di Maio

*Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata, Università della Basilicata*  
[roberto.vassallo@unibas.it](mailto:roberto.vassallo@unibas.it), [margherita.vallario@unibas.it](mailto:margherita.vallario@unibas.it), [caterina.dimaio@unibas.it](mailto:caterina.dimaio@unibas.it)

### **Sommario**

Questa nota descrive la geometria e le principali caratteristiche cinematiche di una frana lenta che si sviluppa in formazioni strutturalmente complesse dell'Appennino meridionale. La geometria tridimensionale è stata ricostruita sulla base di dati topografici e misure inclinometriche. Le caratteristiche cinematiche, ed in particolare la distribuzione di spostamenti superficiali e profondi, sono state valutate con misure inclinometriche e GPS ed elaborazioni teoriche. I risultati indicano che nelle sezioni trasversali del canale di frana gli spostamenti possono essere considerati uniformi, la riduzione della velocità di spostamento da monte verso valle dipende dall'aumento dell'area di tali sezioni, la portata di terreno può essere considerata sostanzialmente costante e gli spostamenti profondi hanno una velocità praticamente costante.

### **Introduzione**

La frana in esame interessa il versante in sinistra idrografica del fiume Basento in una località chiamata Costa della Gaveta, ad est della città di Potenza (Fig. 1a). Si tratta di un'antica frana che, nelle parti media e bassa del versante, si sviluppa nella formazione strutturalmente complessa delle Argille Varicolori. Nel passato, la frana ha interessato nella parte più alta una formazione rocciosa di marne-calcarei stratificati (Corleto Perticara).

Gli scorrimenti della frana, seppur lenti, causano notevoli danni a edifici ed infrastrutture. Per questa ragione, nel 2004, la Regione Basilicata ha finanziato uno studio geotecnico che ha previsto la realizzazione di cinque coppie di fori di sondaggio (Fig. 1a), strumentati con piezometri e tubi inclinometrici. Nel 2006, in uno dei tubi inclinometrici (I9) sono state installate sonde fisse, con acquisizione in continuo, in corrispondenza della superficie di scorrimento precedentemente individuata tramite misure tradizionali (con sonda mobile). Inoltre, nello stesso periodo, il Servizio Geologico Italiano ha installato una rete di stazioni GPS permanenti e non permanenti (Calcaterra et al., 2010).

I dati topografici, i segni geomorfologici, le misure inclinometriche e GPS hanno permesso di caratterizzare la frana dal punto di vista geometrico e cinematico. La valutazione delle caratteristiche meccaniche e della distribuzione di stati tensionali ha consentito di giustificare l'osservata uniformità degli spostamenti lungo quasi tutta la verticale inclinometrica. Dai risultati così ottenuti è scaturita un'ipotesi che giustifica le variazioni di velocità di spostamento lungo l'asse della frana.

### **Geometria della frana**

La frana in esame presenta un'ampia zona di alimentazione molto concava ed interessata nella parte più alta da una colata detritica, un canale e una zona di accumulo con tipica forma a ventaglio, in parte soggetta, nel passato, a intensa erosione da parte del fiume Basento (Di Maio et al., 2010).

La ricostruzione geometrica tridimensionale riguarda l'intero corpo di frana, dal piano

campagna alla superficie di scorrimento.

Una rappresentazione che permette di visualizzare molto chiaramente la parte del corpo di frana che emerge rispetto al terreno circostante è riportata in Fig. 1. Dopo aver definito i contorni dell'area depressa e del corpo di frana (Fig. 1a), sono state tracciate varie sezioni trasversali, che congiungono punti del contorno caratterizzati da quota comune (Di Maio et al., 2010). Come mostra la Fig. 1b, le sezioni da a-a' a c-c' sono quasi completamente costituite da materiale di accumulo; le sezioni da d-d' a f-f' sono in gran parte svuotate, con il materiale in frana che ne occupa una ridotta porzione centrale; le sezioni da g-g' a i-i', infine, sono molto concave ma con una quantità di materiale apparentemente in frana che aumenta verso monte. Si può pertanto ipotizzare l'esistenza di due corpi di frana, di cui quello nella parte medio bassa del versante, oggetto del presente lavoro, ha subito scorrimenti maggiori, tanto da determinarne il distacco da quello superiore.

Nell'ipotesi di erosione trascurabile, è stato possibile ricostruire il probabile antico profilo longitudinale lungo la sezione AA' (con la procedura proposta da Rapisarda, 2007). Tramite il confronto tra l'attuale profilo longitudinale e quello ricostruito e l'analisi delle sezioni trasversali si è stimato il volume compreso tra l'attuale piano campagna nella zona depressa e l'antico piano campagna. Tale volume, pari a circa 6 milioni m<sup>3</sup>, è ben più grande del volume dell'attuale corpo di frana (pari a 2,5-3 milioni di m<sup>3</sup>, come si dirà di seguito). Quindi si può ipotizzare che il volume di terreno coinvolto inizialmente dal movimento franoso fosse molto più grande di quello attuale.

I fianchi del canale di frana, nella parte che emerge, sembrano essere ben interpolati da due famiglie di piani. Elaborando i dati di superficie e le misure inclinometriche, Di Maio et al. (2010) hanno individuato l'intersezione di questi piani con piani di sezione trasversali, perpendicolari all'asse longitudinale della frana e passanti per i fori inclinometrici. La Fig. 1c mostra che tali intersezioni passano per i punti di rottura individuati dagli inclinometri. Gli stessi dati hanno permesso di tracciare la superficie di scorrimento nella sezione longitudinale AA' (Fig. 2).

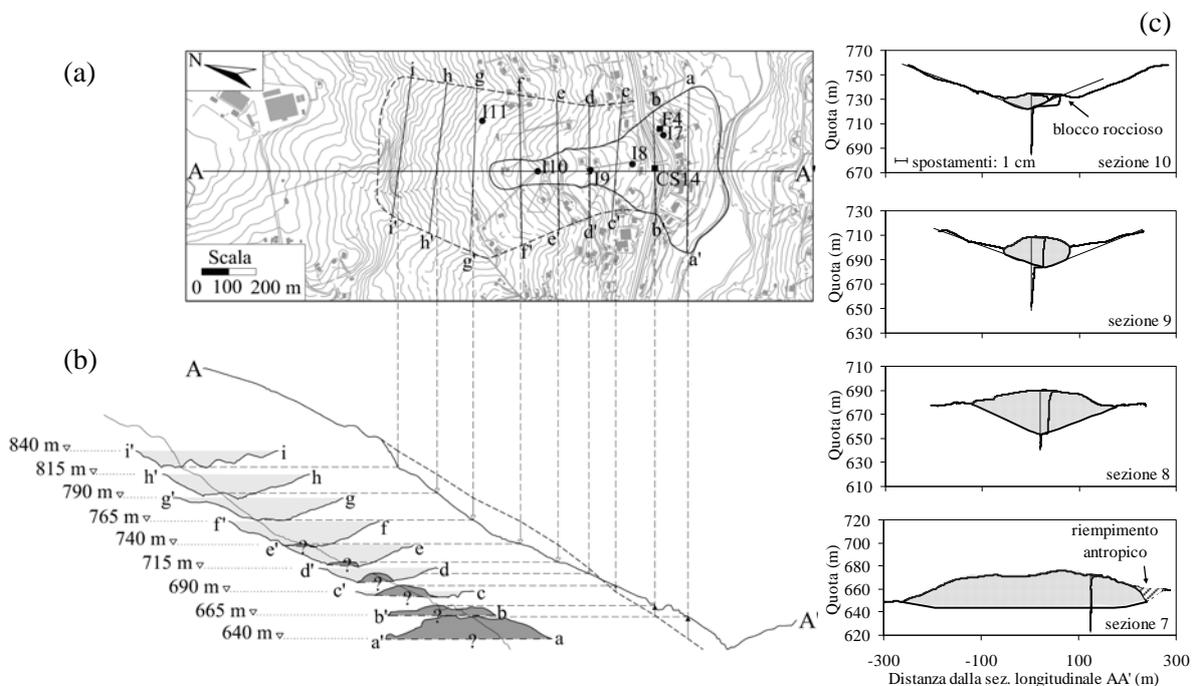


Figura 1. Pianta con delimitazione dell'area depressa e del corpo di frana (a); profilo longitudinale attuale (-) e ricostruito (- -) e sezioni trasversali (b); sezioni trasversali passanti per gli inclinometri con profili inclinometrici e ricostruzione della superficie di scorrimento (c) (Di Maio et al., 2010).

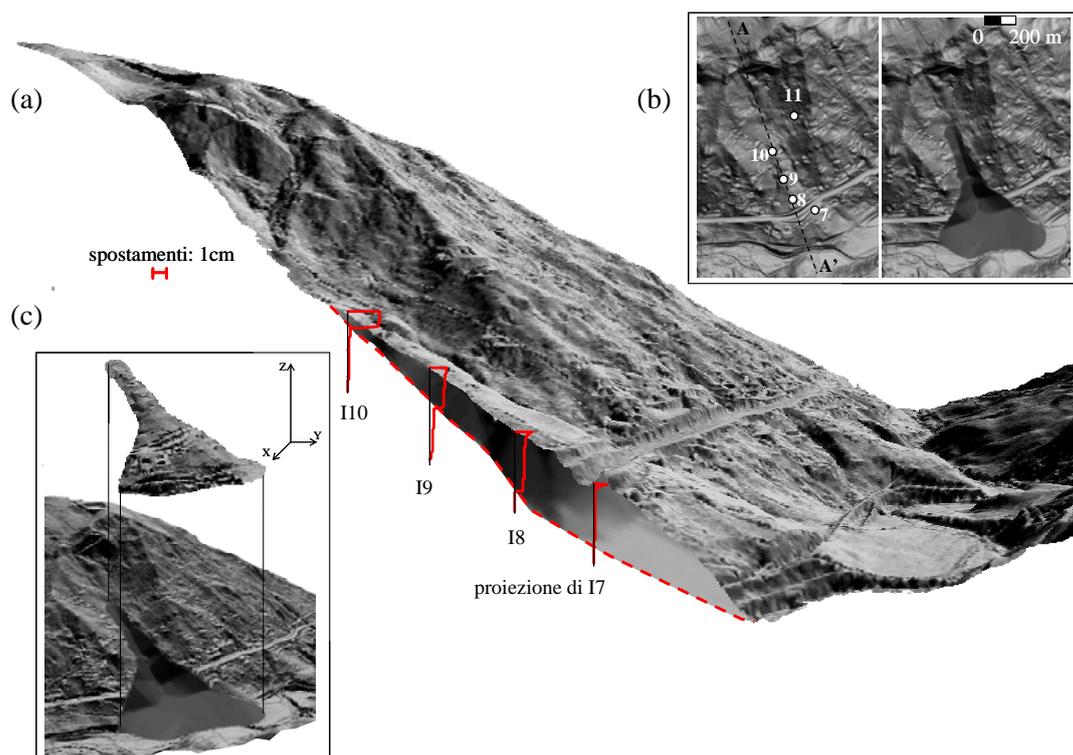


Figura 2. Ricostruzione 3D della superficie di scorrimento. Vista prospettica del versante e della sezione longitudinale AA', con la superficie di scorrimento ed i profili inclinometrici (a). Vista piana con e senza superficie di scorrimento (b). Vista tridimensionale (c). Il DTM è stato gentilmente fornito da GEOCART.

L'elaborazione successiva è consistita nella ricostruzione tridimensionale della superficie di scorrimento (Fig. 2), utilizzando un programma di interpolazione dei dati spaziali. Come dati di partenza sono stati utilizzati i contorni in pianta del corpo di frana e la posizione della superficie di scorrimento nella sezione longitudinale e in alcune significative sezioni trasversali. Nella sezione longitudinale AA', la superficie di scorrimento è caratterizzata da tre diverse inclinazioni medie: circa  $10^\circ$  nel canale di frana, circa  $12^\circ$  nella zona di passaggio tra il canale e l'accumulo, circa  $4^\circ$  nella zona d'accumulo.

L'attuale volume del corpo di frana, individuato tra la superficie di scorrimento così ricostruita e il piano campagna, può essere stimato pari a 2,5-3 milioni di  $m^3$ .

### Caratteristiche cinematiche

Come già accennato, cinque dei fori di sondaggio, di profondità di oltre 50 m, sono stati strumentati nel 2004 con tubi inclinometrici (Fig. 1). Nel 2006, nel foro I9, sono state installate sonde fisse con un sistema di acquisizione continua. Risale allo stesso periodo l'installazione di una rete di stazioni GPS permanenti e non permanenti per la misura degli spostamenti superficiali (Calcaterra et al., 2010; Di Maio et al., 2010).

In Fig. 3 si riportano alcuni profili inclinometrici. Gli spostamenti sono stati ottenuti ipotizzando fisso il piede del tubo inclinometrico; tale ipotesi è stata verificata anche con il confronto tra gli spostamenti superficiali ottenuti dagli inclinometri e le misure GPS (Calcaterra et al., 2010). Come si può notare, i profili inclinometrici di I10, I9 e I8 (che si trovano nel canale di frana) e di I7 (nella zona d'accumulo), ad eccezione di pochi metri di terreno superficiale, sono sostanzialmente caratterizzati da uno spostamento uniforme al di sopra della superficie di scorrimento. I11, che si trova nella zona svuotata al di fuori del corpo di frana, presenta solamente deformazioni ridotte ed irregolari nel tempo di uno strato superficiale di terreno dello spessore di 2 m.

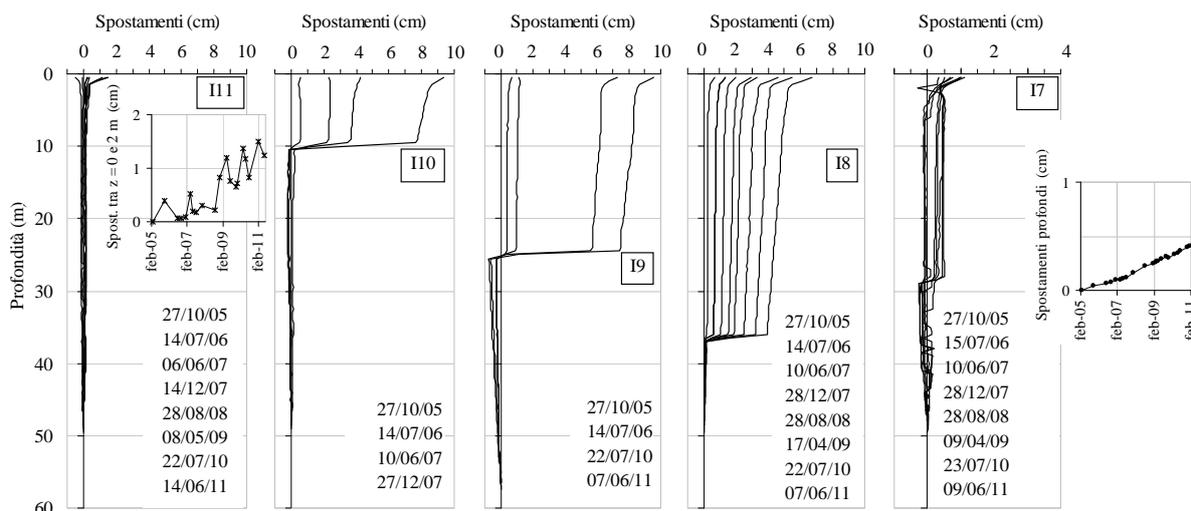


Figura 3. Profili inclinometrici (lettura di zero: Marzo 2005).

Di Maio et al. (2010) e Vassallo et al. (2011) hanno giustificato l'uniformità di spostamento lungo I10, I9 e I8 paragonando gli stati tensionali agenti con la resistenza disponibile nel corpo di frana. Le tensioni tangenziali attualmente mobilitate lungo la superficie di scorrimento risultano prossime alla resistenza residua stimata in laboratorio. Al di sopra della superficie di scorrimento, nel corpo di frana, le tensioni tangenziali risultano ancora prossime alla resistenza residua e molto minori della resistenza di picco stimata in laboratorio. Ciò porta a escludere un ruolo di rilievo delle deformazioni da creep, sia sulla base di trattazioni teoriche e dati sperimentali di letteratura (e.g., Suklje 1969), sia sulla base dei nostri risultati di prove di taglio diretto a carico orizzontale controllato e di lunga durata sul materiale di frana. Per gli stessi motivi, gli spostamenti possono essere ragionevolmente assunti uniformi in ciascuna sezione trasversale.

La Fig. 4a riporta l'andamento nel tempo degli spostamenti relativi sulla superficie di scorrimento in I7, I8, I9 e I10. Ad Agosto 2008, il tubo inclinometrico I10 non era più ispezionabile. Di fatto era stata già evidenziata un'accelerazione degli spostamenti dalle precedenti misure inclinometriche (Calcaterra et al., 2010; Di Maio et al., 2010).

A Luglio 2006, per monitorare in continuo gli spostamenti di I9 sono state installate tre sonde fisse: una in corrispondenza della superficie di scorrimento precedentemente individuata dalle misure inclinometriche con sonda mobile (a circa 25 m di profondità dal p.c.), una a 20 m di profondità all'interno del corpo di frana e l'altra a 30 m nel terreno stabile. Per coerenza tra i risultati ottenuti con sonda mobile e sonde fisse, gli spostamenti sulla superficie di scorrimento sono stati ottenuti attribuendo le inclinazioni misurate dalla sonda fissa centrale ad uno strato di terreno dello spessore di 1 m (Di Maio et al., 2011). A Gennaio 2009, le sonde fisse sono andate fuori uso a causa di problemi elettrici. Poiché fino ad allora il rapporto tra gli spostamenti sulla superficie di scorrimento in I9 (come già detto, a circa 25 m di profondità) e in I8 (a 37 m) era costante nel tempo e pari a 2 (Fig. 4b), dopo Gennaio 2009, in assenza di altri dati, si sono ricavati gli spostamenti in I9 da quelli misurati in I8 (Di Maio et al., 2010). A Luglio 2010, le sonde fisse sono state rimosse e sono ripartite le misure inclinometriche con sonda mobile. I nuovi risultati confermano il precedente andamento degli spostamenti, come mostra la Fig. 4a, in cui per I9 sono riportate, in ordine cronologico: le misure ottenute con sonda mobile, quelle con sonda fissa, infine, nuovamente, le misure ricavate con sonda mobile. Sullo stesso grafico sono riportati gli spostamenti di I8 moltiplicati per 2, che risultano in chiaro accordo con l'andamento dei dati di I9.

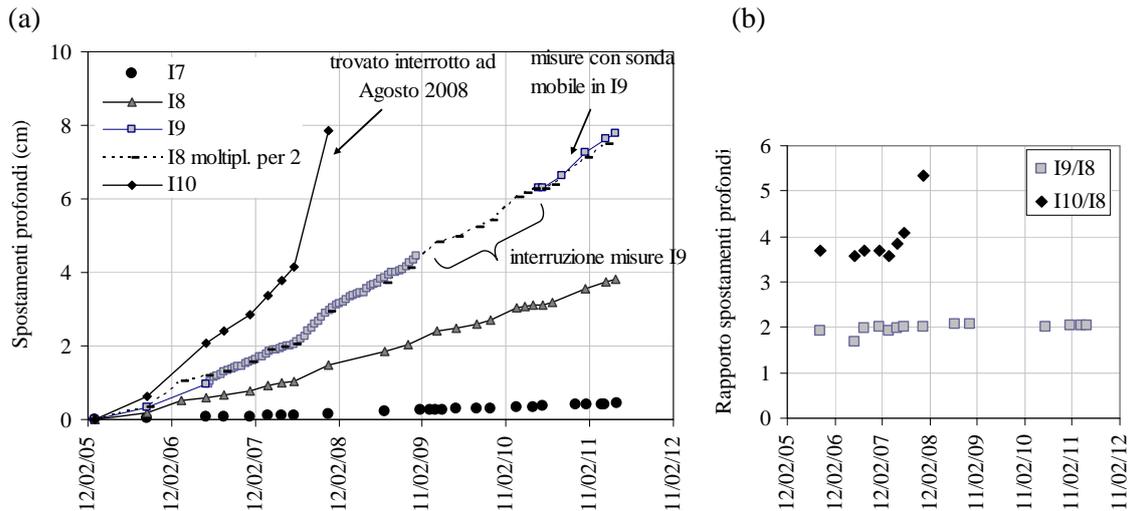


Figura 4. Andamento nel tempo degli spostamenti relativi sulla superficie di scorrimento, modificato da Di Maio et al. (2011) (a); spostamenti profondi di I9 e di I10 in funzione degli spostamenti in I8 (b).

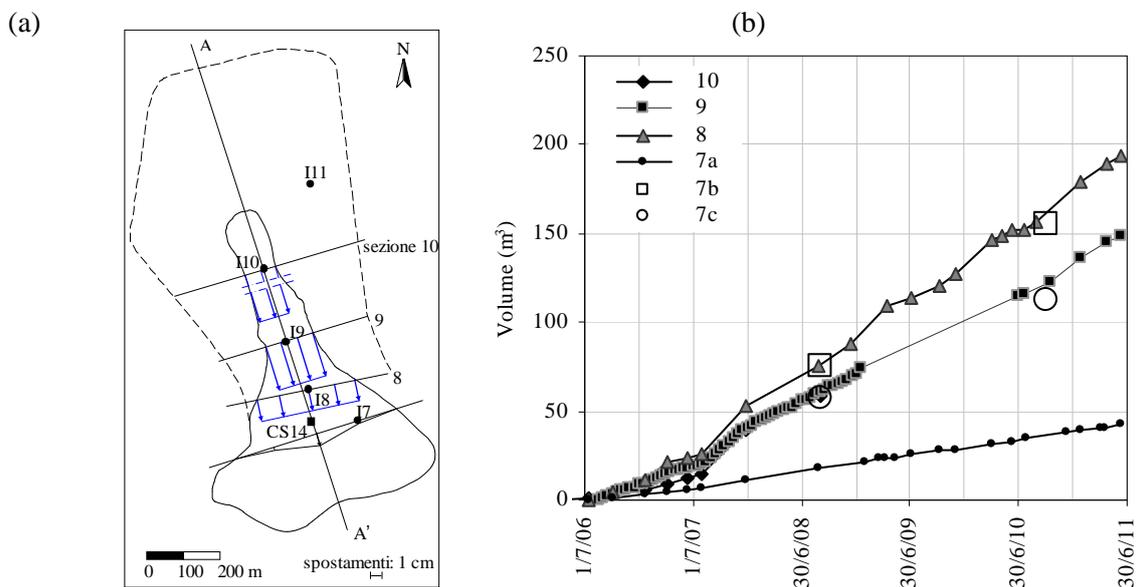


Figura 5. Rappresentazione schematica del corpo di frana con indicazione della distribuzione di spostamenti considerata (a); andamento nel tempo dei volumi di terreno che attraversano le sezioni trasversali (b). Modificati da Di Maio et al. (2010).

La Fig. 4b, che mostra il rapporto tra gli spostamenti profondi di I9 e di I10 e quelli di I8, evidenzia ulteriormente la stretta correlazione tra gli spostamenti nel canale di frana, fatta eccezione per la fase finale di accelerazione di I10.

Come si può notare dalla Fig. 4a, spostandosi da monte verso valle si osservano velocità di spostamento decrescenti. Ciò risulta valido nell'intero periodo di monitoraggio. Gli spostamenti in I7, il cui ordine di grandezza sarebbe ancora oggi paragonabile a quello dell'errore di misura, vengono ritenuti attendibili per il loro andamento così regolare nel tempo (Calcaterra et al., 2010). Invece la stazione GPS periodica CS14, ubicata sull'asse della frana, sempre nella zona di accumulo, ha registrato spostamenti superficiali più grandi. Queste misure, pur essendo relative alla superficie, sono coerenti con i segni geomorfologici, che indicano sia che la parte centrale si muove con maggiore velocità, sia che si sono

verificati fenomeni locali di instabilità al piede per effetto dell'erosione fluviale. Se come detto in precedenza si ipotizza una distribuzione uniforme degli spostamenti in ciascuna sezione del canale, il volume di terreno che attraversa le sezioni nel periodo di osservazione può essere ottenuto moltiplicando l'area delle sezioni riportate in Fig. 1c per gli spostamenti di Fig. 4a (Di Maio et al., 2010). Da tale calcolo risulta che in tutto il periodo di osservazione le sezioni per I8, I9 e I10 sono state attraversate da volumi di terreno molto prossimi fra loro (Fig. 5b). I volumi passanti per la sezione per I7, che si trova nella zona d'accumulo, dove gli spostamenti non sembrano uniformi, sono stati calcolati in tre modi diversi. La curva 7a è stata ottenuta, come per gli altri casi, dal prodotto dell'area della sezione trasversale per gli spostamenti profondi valutati in I7; il punto 7b fa invece riferimento ad una distribuzione triangolare con spostamenti massimi in corrispondenza del caposaldo GPS CS14 e nulli in corrispondenza dei contorni di frana; infine il punto 7c è ricavato considerando una distribuzione simmetrica degli spostamenti, riportata in Fig. 5a, che tiene conto sia dei valori misurati in CS14 che di quelli misurati in I7 e assume spostamenti nulli sui contorni di frana. La Fig. 5b mostra che i volumi della curva 7a sono molto più piccoli di quelli relativi alle altre sezioni, mentre i volumi 7b e 7c, non molto diversi tra loro, sono coerenti con i volumi calcolati nelle altre sezioni. La costanza della portata di terreno giustifica l'assenza di variazioni di velocità locali, come si evince dalla Fig. 4a.

### **Conclusioni**

La caratterizzazione geometrica e cinematica della frana in esame ha consentito di assumere uniformi gli spostamenti in ognuna delle sezioni del canale. Grazie a questa uniformità, anche le stazioni GPS possono fornire indicazioni sugli spostamenti profondi in caso di sospensione momentanea delle misure inclinometriche (Di Maio et al., 2011). Inoltre lo studio condotto ha indicato che la riduzione della velocità di spostamento da monte verso valle dipende sostanzialmente dall'aumento dell'area delle sezioni, essendo pressoché costante la "portata di terreno". Per effetto della costanza della portata, lo spostamento di una sezione può essere ricavato da quello di un'altra sezione, con evidenti vantaggi in termini di quantità di informazioni ricavabili da ognuna delle misure effettuate e conseguentemente in termini di controllo del movimento franoso.

### **Bibliografia**

- Calcaterra, S., Cesi, C., Di Maio, C., Gambino, P., Merli, K., Vallario, M. e Vassallo, R. (2010). Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: a case study in Southern Apennines, Italy. *Natural Hazards*. DOI: 10.1007/s11069-010-9633-3.
- Di Maio, C., Vassallo, R., Vallario, M., Pascale, S. e Sdao, F. (2010). Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian Southern Apennines. *Engineering Geology*, 116: 311 – 322. DOI:10.1016/j.enggeo.2010.09.012.
- Di Maio, C., Vassallo, R., Vallario, M., Calcaterra, S. e Gambino, P. (2011). Surface and deep displacements evaluated by GPS and inclinometers in a clayey slope. Sottoposto per la pubblicazione sugli Atti del Secondo Forum Mondiale sulle Frane – 3-7 Ottobre 2011, Roma.
- Douglass, J., Dorn, R.I. and Gootee, B. (2005). A large landslide on the urban fringe of metropolitan Phoenix, Arizona. *Geomorphology*, 65: 321 – 336.
- Rapisarda, F. (2007). Landslide analysis in Apennine chain areas. *Landslides*, 4: 75 – 83.
- Suklje L. (1969). Rheological aspects of soil mechanics. Ed. Wiley-Interscience, London.
- Vassallo, R., Di Maio C., Vallario M. (2011). A possible mechanism of movement of an ancient clayey landslide. Sottoposto per la pubblicazione sugli Atti del Secondo Forum Mondiale sulle Frane – 3-7 Ottobre 2011, Roma.