

INTEGRAZIONE DI LASER SCANNER E METODI GEOFISICI NELLO STUDIO DELLA FRANA DI PERAROLO DI CADORE

Cristina Squarzoni^(*), Antonio Galgaro^(*), Giordano Teza^(*), Rinaldo Genevois^(*), Michele Rocca^(*),
Alberto Baglioni^(**)

(*) Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Università di Padova, Via Giotto, 1- 35137 Padova
E-mail {cristina.squarzoni, antonio.galgaro, giordano.teza, rinaldo.genevois, michele.rocca}@unipd.it

(**) Servizio Difesa del Suolo, Regione Veneto, E-mail alberto.baglioni@regione.veneto.it

Riassunto

Il laser scanner terrestre (TLS) coniuga all'acquisizione remota di punti ad altissima densità riguardo ad una superficie una precisione comparabile con quella di metodi tradizionali quali GPS e stazione totale; inoltre, da scansioni multitemporali con TLS è possibile risalire al campo degli spostamenti superficiali di un versante instabile. Le indagini geofisiche di superficie e in foro consentono invece di ottenere informazioni sui parametri geofisici e geotecnici relativi alla massa in movimento e sulla posizione della superficie di scivolamento, vale a dire una più completa caratterizzazione tridimensionale della frana. L'integrazione dei due metodi consente una migliore definizione della dinamica dei fenomeni franosi e, di conseguenza, una più accurata ed affidabile progettazione degli interventi di sistemazione del versante. Questo nuovo approccio è stato sperimentato nell'analisi della frana di S. Andrea a Perarolo di Cadore (Alpi Orientali, Italia), fenomeno particolarmente attivo e ad alto rischio perché un eventuale collasso potrebbe sbarrare il corso del Torrente Boite immediatamente a monte dell'abitato. E' stato ottenuto un modello geologico-tecnico completo la cui evoluzione è stata studiata mediante metodi numerici alle differenze finite 2D e 3D. Tale processo interdisciplinare permette la pianificazione degli interventi più efficaci al fine di mitigare il rischio idrogeologico.

Abstract

The terrestrial laser scanner (TLS) can entirely remotely acquire high density points on a surface with an accuracy comparable to this of conventional topographical techniques as GPS or total station. By multitemporal scans, the displacements field of a unstable slope can be reconstructed. The surface and down-hole seismic surveys produce fundamental information about geological and geotechnical parameters of the landslide volumes involved, as well as on the sliding surface and subsurface structure; in this way, a more complete 3D characterization of the landslide can be performed. So, the integration of this two techniques allows to obtain a better definition of the landslide dynamics and, as consequence, a more careful design of countermeasures. This new technical approach has been successfully applied to the particularly active and high risk phenomenon of the S. Andrea landslide at Perarolo di Cadore (Eastern Alps, Italy), in which the flow of the Boite torrent can be dam if a slope failure occurs. A complete geological and geotechnical model has been obtained and its evolution has been studied using 2D and 3D finite difference methods. Finally, this interdisciplinary process allows the planning of most effective works devoted to the mitigation of hydrogeological risk.

Introduzione

Il laser scanner terrestre (TLS), pur tecnica di relativamente recente introduzione nella pratica del telerilevamento di versanti instabili, ha un uso sempre più ampio, come testimoniano molti lavori

pubblicati negli ultimi anni. Una serie di scansioni multitemporali con TLS consente la generazione di modelli digitali del terreno (DTM) con risoluzione di alcuni centimetri, uno per ciascuna di tali scansioni. Se le modificazioni morfologiche che la frana subisce sono limitate, il confronto tra tali DTM può consentire il calcolo del campo degli spostamenti associati al fenomeno franoso. In tal modo, la geometria e la cinematica della superficie della frana possono essere identificate con precisione centimetrica. D'altra parte, la tomografia sismica a rifrazione consente l'acquisizione di dati sui parametri geologici e geotecnici che caratterizzano l'intero volume interessato dal dissesto. In particolare, è possibile individuare la geometria della superficie di scivolamento, come pure le caratteristiche fisiche dei materiali. Ovviamente, il modello della superficie di scivolamento ha risoluzione e precisione non paragonabili a quelle del DTM generato dai dati TLS, ma è comunque adeguato per l'analisi del comportamento della frana. L'integrazione dei dati ottenuti mediante TLS con quelli forniti dalle indagini geofisiche fornisce dunque un modello geologico completo del fenomeno esaminato; a partire da esso, è possibile realizzare un modello numerico del fenomeno, in grado di dare indicazioni sulla stabilità della massa in movimento, di prevedere la progressiva espansione delle zone in condizioni di rottura e di progettare correttamente gli interventi di sistemazione.

Il laser scanner ed il calcolo degli spostamenti superficiali

Un laser scanner terrestre (TLS) associa alle proprietà di un fascio laser (coerenza spaziale e temporale, possibilità di generare impulsi dell'ordine del ns) la possibilità di eseguire la scansione di un'intera superficie utilizzando un passo tale da rendere il dato spazialmente continuo. In un TLS a tempo di volo (*time-of-flight* TLS) le coordinate (x, y, z) del punto che ha dato luogo alla riflessione sono stabilite in funzione della distanza, calcolata a partire dal tempo di volo, e delle coordinate angolari del fascio laser. Il risultato di una scansione è la *nuvola di punti* $(x, y, z, R(x, y, z))$, in cui $R(x, y, z)$ è la riflettanza del punto (x, y, z) ; nel caso di una frana, i punti acquisiti sono tipicamente alcuni milioni, con risoluzione nella misura della distanza pari a 3-4 mm, mentre nella direzione ad essa ortogonale è di qualche cm a 100 m. La precisione di un laser scanner è funzione della riflettanza; in linea di massima, la precisione dei migliori strumenti a lunga portata è quantificabile in 7-8 mm a 100 m (1σ).

L'elaborazione dei dati acquisiti richiede grandi risorse di calcolo e specifico software professionale, ad esempio Polyworks (InnovMetric, 2005), Cyclone (Leica 2005) o I-SiTE Studio (I-SiTE, 2005). A partire dalla nuvola di punti grezza, e mediante tassellatura con triangoli, si ottiene un modello digitale di superficie (DSM); in questa fase si ottimizzano le risorse di memoria necessarie, si esegue una "pulizia" dei dati per ridurre il rumore, si registrano eventuali scansioni parziali eseguite da differenti punti di vista, si introduce (se necessaria) la georeferenziazione e possono anche modellarsi piccole aree non acquisite dal TLS (Axelsson, 1999).

La valutazione delle deformazioni di un versante instabile richiede la generazione di un modello digitale di terreno (DTM), cioè un modello 2.5D del tipo $z = z(x, y)$ in cui l'elevazione z viene riferita ad una griglia regolare e planare xy . Il DTM, che rappresenta la superficie in frana, è generato utilizzando il DSM e un'adeguata tecnica di interpolazione (Capra et al., 1999), implementata in software specifico, ad esempio Golden Software Surfer (Golden Software, 2005).

Il campo degli spostamenti è stato ottenuto, nel caso in esame, mediante confronto dei DTM ottenuti a partire da scansioni multitemporali, utilizzando una procedura, da noi sviluppata, basata su tecniche mutuata dalla *face recognition*. Considerati dunque due o più DTM relativi ad altrettante scansioni multitemporali e riferiti ad uno stesso piano xy , viene eseguita un'analisi automatizzata della morfologia locale per individuare i punti omologhi. In particolare, assegnato un punto P sul primo DTM, il suo omologo su un altro DTM (ossia lo stesso P spostato) sarà quel punto il cui intorno è il più simile a quello di P . La procedura di analisi e confronto è implementata usando la decomposizione wavelet packet ed è descritta in Teza et al., 2004; i calcoli sono eseguiti in ambiente Matlab (Mathworks, 2005). Essa è proficuamente utilizzabile per la misura del campo

degli spostamenti solo laddove la morfologia locale della frana è poco perturbata nel periodo intercorrente tra due scansioni multitemporali.

La frana di S. Andrea a Perarolo di Cadore

La frana di S. Andrea si trova poco a monte dell'abitato di Perarolo di Cadore, nelle Alpi Nord-Orientali (Fig. 1). Essa coinvolge la porzione inferiore del versante meridionale del Monte Zuco e rappresenta un caso di fenomeno secondario relativamente recente, inserito in uno scenario di instabilità generalizzata di epoca preistorica (Squarzoni, 2003). La porzione di versante coinvolta attualmente è costituita da depositi detritici per uno spessore di circa 30 m, poggianti su un substrato anidritico-gessoso e calcareo, che nella sua porzione superiore si presenta particolarmente fratturato ed alterato. La frana si estende da 530 a 630 m s.l.m., con una larghezza di circa 150 m ed una profondità massima della superficie di scivolamento di circa 30 m, corrispondenti ad un volume stimato pari a $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$. Nonostante le dimensioni relativamente modeste, il rischio ad essa associato è elevato, a causa dello sbarramento che si potrebbe produrre nell'alveo del torrente Boite, posto immediatamente a valle del pendio, in conseguenza del contemporaneo scivolamento dell'intera massa. Lo spostamento annuo, misurato sia in superficie, mediante misure topografiche e GPS, che in profondità, mediante inclinometri, è di circa 20-25 cm. Recentemente solo una piccola parte (circa 3.000 m^3) è stata mobilizzata, in corrispondenza di un periodo caratterizzato da piogge particolarmente intense.



Figura 1 – Localizzazione della frana di Perarolo di Cadore

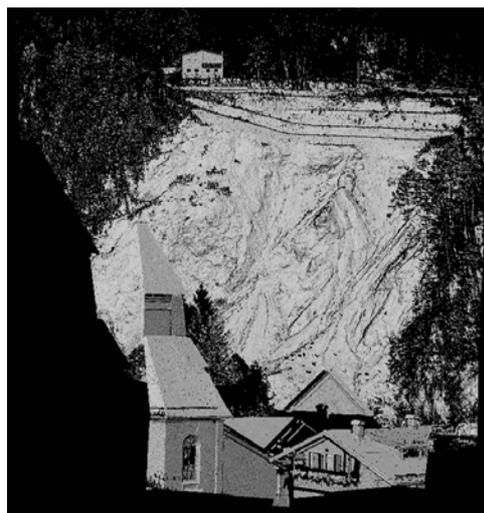


Figura 2 – Nuvola di punti acquisita con il laser scanner (in primo piano, gli edifici usati per fissare il riferimento comune)

Le indagini geofisiche

La modellazione tridimensionale del fenomeno richiede la conoscenza delle caratteristiche geometriche e meccaniche della massa instabile, con particolare riferimento alla forma e alla posizione della superficie di scivolamento, alla variabilità spaziale ed alla caratterizzazione dei materiali coinvolti. Tali informazioni sono state ricavate anche mediante indagini sismiche effettuate in superficie (tomografia) e in foro di sondaggio (*down-hole*). Le indagini sismiche consentono, infatti, la caratterizzazione geofisica del materiale, dalla quale si possono ricavare, oltre ad indicazioni sulla litologia dei terreni, i valori di parametri utili alla modellazione fisica e meccanica dei terreni coinvolti nel fenomeno franoso (Tab. 1).

In Figura 3 sono riportate mostra due delle sezioni tomografiche elaborate, una trasversale ed una longitudinale al pendio. L'analisi delle sezioni effettuate ha consentito l'individuazione di tre strati con diverse caratteristiche: un primo strato, con velocità inferiori a 1.5 km/s, corrispondente ai depositi detritici; un livello intermedio, con velocità comprese tra 2 e 3 km/s, corrispondente alla

porzione superiore del substrato anidritico alterato e fratturato; un livello profondo, con velocità superiori ai 3 km/s, corrispondente al substrato roccioso intatto.

I risultati delle indagini *down-hole* mostrano come la copertura detritica presenti una notevole disomogeneità, a fronte di un substrato roccioso relativamente omogeneo.

Parametri	Vp [km/s]	Vs [km/s]	ν	γ [kg/m ³]	E _{din} [GPa]	G _{din} [GPa]	K _{din} [GPa]
Detriti	1.35	0.45	0.43	1980	1.4	0.5	3.8
st.dev.	0.56	0.20	0.04	180	-	-	-
Rocce	2.83	0.94	0.44	2310	6.2	2.1	16.5
st.dev.	0.43	0.17	0.01	70	-	-	-

Parametri: (Vp) velocità delle onde di compressione; (Vs) velocità delle onde di taglio; (ν) coefficiente di Poisson; (γ) peso di volume; (E_{din}) modulo di Young dinamico; (G_{din}) modulo di taglio dinamico; (K_{din}) *bulk modulus* dinamico.

Tabella 1 - Risultati delle indagini sismiche

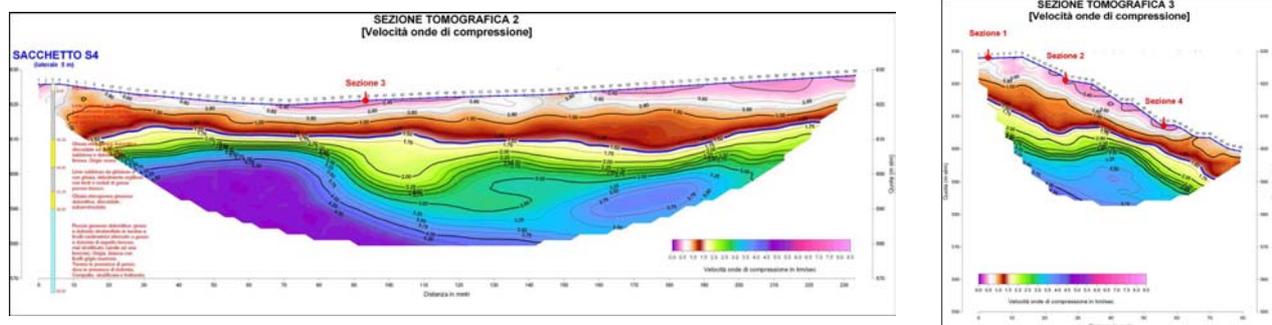


Figura 3 – Sezioni tomografiche: a sinistra, sezione in direzione est-ovest (normale alla direzione di scivolamento). A destra, sezione in direzione nord-sud

La cinematica superficiale

Sul sito in esame sono state eseguite fino ad ora 4 scansioni (dicembre 2002, aprile 2004, settembre 2004 e luglio 2005) mediante TLS a lunga portata, utilizzando lo strumento Optech ILRIS 3-D (Optech, 2005). La nuvola di punti acquisita nel dicembre 2002 è riportata, come esempio, in figura 2. Con una distanza media di osservazione intorno ai 220 m ed un passo di scansione medio sulla superficie di circa 3.3 cm, l'area è stata acquisita in una quarantina di minuti, fornendo una nuvola costituita da circa 6 milioni di punti. Le scansioni multitemporali sono state inserite in un sistema di riferimento comune mediante l'individuazione di punti omologhi nell'area non in movimento, ricorrendo a specifici algoritmi di adattamento geometrico come ICP (*Iterative Closet Point*, (Besl e McKay, 1992), implementati nel software usato (Polyworks). L'incertezza introdotta da questa procedura risulta trascurabile rispetto all'ordine di grandezza degli spostamenti attesi; ciò ha consentito di evitare il posizionamento diretto sul versante, talora non facilmente accessibile, di bersagli artificiali ad alta riflettività.

La superficie investigata è costituita da una porzione superiore, caratterizzata da un pendio moderato, parzialmente vegetato e sagomato a gradoni nell'ambito di un recente intervento di parziale sistemazione, e da una scarpata piuttosto ripida quasi completamente priva di vegetazione.

La figura 4 presenta una mappa degli spostamenti relativi al periodo dicembre 2002-aprile 2004, validati mediante osservazioni con GPS. L'analisi dei campi di spostamento ottenuti ha evidenziato una cinematica di tipo sostanzialmente rotazionale, complicata dalla presenza di fenomeni di erosione superficiale soprattutto nella parte inferiore del corpo di frana; questi risultano in spostamenti apparenti, come mostrato dalla distribuzione delle componenti verticali dello spostamento.

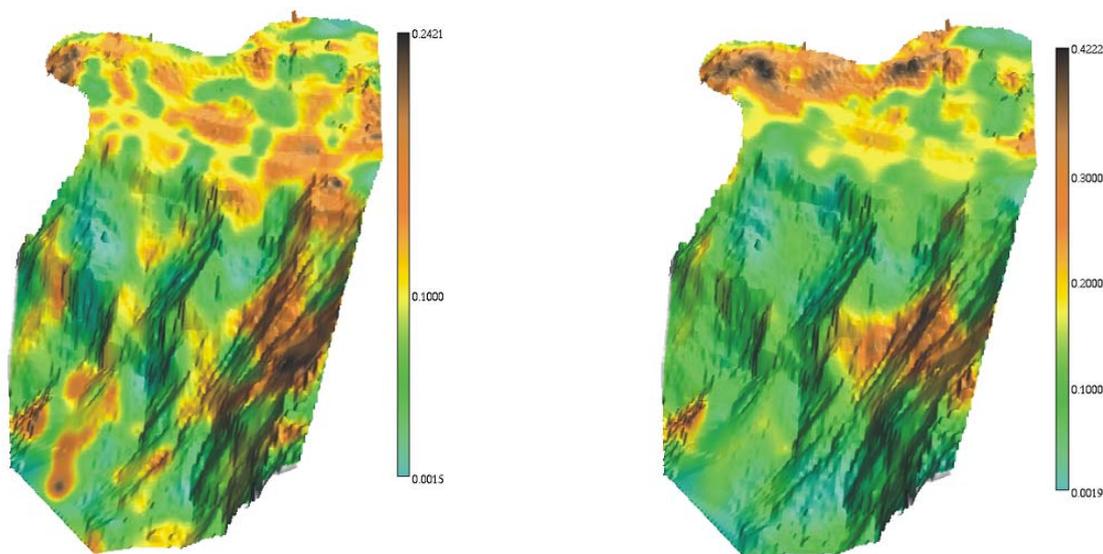


Figura 4a – Componenti orizzontali degli spostamenti (in m), proiettate su un DTM della frana
 Figura 4b – Componenti verticali degli spostamenti (in m), del pari proiettate sul DTM

Integrazione delle due metodologie: modellazione numerica.

L'integrazione dei dati da TLS e dalle indagini sismiche è stato possibile ottenere una caratterizzazione 3D della massa in movimento, non solo limitata alla geometria del versante ed alla cinematica del fenomeno, ma estesa alle caratteristiche proprie del corpo di frana. Tali dati sono stati utilizzati per generare un modello numerico del fenomeno, in grado di dare indicazioni sulla stabilità della massa in movimento, di prevedere la progressiva espansione delle zone in condizioni di rottura e di progettare correttamente gli interventi di sistemazione. A tale scopo, sono stati utilizzati codici alle differenze finite bidimensionale e tridimensionale (FLAC e FLAC 3D, Itasca, 2005) (fig. 5), attribuendo alla massa instabile un comportamento di tipo Mohr-Coulomb.

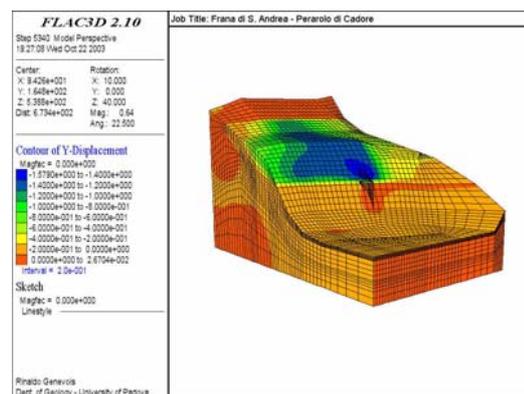
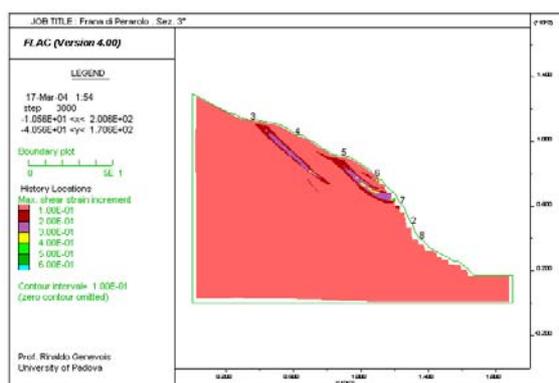


Figura 5a – Modello bidimensionale del versante
 Figura 5b – Modello tridimensionale del versante

I risultati delle analisi condotte mostrano una situazione di instabilità generalizzata, che potrebbe degenerare in una parziale o anche totale mobilitazione della frana, possibilmente in condizioni di elevati livelli della falda freatica. I campi di spostamento ottenuti con l'analisi numerica, sia bi- che tridimensionale, sono compatibili con quanto misurato in campagna mediante TLS. Il completamento dell'integrazione delle due metodologie ha previsto la realizzazione di analisi numeriche, tuttora in corso, nelle quali i campi di spostamento misurati sono stati imposti nel modello numerico con il fine di valutare le resistenze effettivamente mobilitate dalla massa

instabile. In tal modo, si tiene maggiormente conto della variabilità dei parametri fisici e meccanici dei materiali e delle condizioni al contorno, con particolare riferimento all'entità ed alla distribuzione dei valori delle pressioni interstiziali.

Conclusioni

L'integrazione delle due metodologie utilizzate (TLS ed indagini geofisiche) consente di ottenere una migliore definizione della dinamica dei fenomeni franosi e, di conseguenza, una più accurata ed affidabile progettazione degli interventi di sistemazione. Infatti, mediante la metodologia TLS è possibile definire accuratamente la geometria del versante ed i campi di spostamento correlati al fenomeno franoso; le indagini geofisiche permettono, invece, una migliore caratterizzazione della distribuzione spaziale dei materiali e delle loro caratteristiche elastiche. L'integrazione delle due tecniche permette così di effettuare un'analisi numerica del versante instabile, dalla quale è possibile ottenere da un lato la conferma della validità del modello geologico-tecnico ricostruito (confronto tra i campi di spostamento misurati e calcolati), dall'altro la convalida dei valori dei parametri fisico-meccanici utilizzati e delle condizioni al contorno imposte (introduzione nel modello numerico dei valori di spostamento misurati).

L'integrazione delle due tecniche permette, quindi, una migliore definizione della pericolosità dei fenomeni di instabilità, soprattutto quando le condizioni litologiche e geotecniche siano particolarmente complesse, e, di conseguenza, una più corretta individuazione delle misure di mitigazione del rischio connesso. Tale procedura è stata applicata alla progettazione delle opere di sistemazione del pendio di S. Andrea, che prevede il consolidamento del versante mediante jet-grouting. L'efficacia e le problematiche connesse all'esecuzione dei pali jet sono state valutate mediante la realizzazione di uno stralcio del progetto generale, accompagnato da un monitoraggio continuo del tratto di versante interessato mediante misure GPS, inclinometriche, topografiche, piezometriche e TLS.

Ringraziamenti

La ricerca è stata parzialmente finanziata dalla Regione Veneto (Ufficio Difesa del Suolo e Protezione Civile), che si ringrazia per la disponibilità.

Bibliografia

- Axelsson, P. (1999), "Processing of laser scanner data. Algorithms and applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, pp. 138-147
- Besl, P.J., McKay, N.D. (1992), "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14 (2), pp. 239-256
- Capra, A., Cefalo, R., Gandolfi, S., Manzoni, G., Tabacco, I.E., Vittuari, L. (1999), "Dome C (Antarctica) topography by Kinematic Interferential GPS and correlation with deep bedrock altimetry", *Annals of Glaciology* 30, pp. 42-46.
- Golden Software (2005). Sito web <http://www.goldensoftware.com/> (ultimo accesso: 19.05.2005)
- Innovmetric (2005). Sito web <http://www.innovmetric.com/> (u.a.: 19.05.2005)
- Itasca (2005). Sito web <http://www.itascacg.com/> (u.a.: 19.05.2005)
- Leica (2005a). Sito web <http://www.leica.loyola.com/products/hds/cyclone.html> (u.a.: 22.08.05)
- Mathworks (2005). Web site <http://www.mathworks.com/> (last access: 20.05.2005)
- Optech (2005). Sito web <http://www.optech.on.ca/> (u.a.: 18.08.2005)
- Squarzoni, C. (2003), *Mesure des champs de déplacement de surface et modélisation numérique des glissements des terrains*, Tesi di Dottorato discussa all'Université Claude Bernard – Lyon 1 e all'Università degli Studi di Padova. In Francese.
- Teza, G., Galgaro, A., Genevois, R., Rocca, M., Squarzoni, C. (2004), "Integrazione di dati da laser scanner e metodi tradizionali per la misura delle deformazioni della frana di Perarolo di Cadore (Bl)". In *Atti dell'8ª Conferenza Nazionale Asita*, pp. 1881-1886.