

INTERFEROMETRIA RADAR E MODELLAZIONE FDEM PER LO STUDIO DI FRANE IN ROCCIA: UN  
ESEMPIO DI APPLICAZIONE

*Original*

INTERFEROMETRIA RADAR E MODELLAZIONE FDEM PER LO STUDIO DI FRANE IN ROCCIA: UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE / Antolini, Francesco; Barla, Marco. - ELETTRONICO. - (2013). (Intervento presentato al convegno IARG 2013 - Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica tenutosi a Perugia nel 16-18 settembre 2013).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2513709 since:

*Publisher:*

Università degli Studi di Perugia

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

## **INTERFEROMETRIA RADAR E MODELLAZIONE FDEM PER LO STUDIO DI FRANE IN ROCCIA: UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE**

Francesco Antolini

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e geotecnica, Politecnico di Torino*  
*francesco.antolini@polito.it*

Marco Barla

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e geotecnica, Politecnico di Torino*  
*marco.barla@polito.it*

### **Sommario**

Nella presente nota verrà illustrato un esempio di applicazione della tecnica interferometrica radar da terra (GBInSAR) e di modelli numerici avanzati di tipo combinato elementi finiti-elementi distinti (FDEM) per lo studio del cinematisimo e della propagazione di una frana in roccia nell'Appennino umbro (Torgiovanetto di Assisi –PG). Con riferimento al caso di studio saranno mostrati i risultati del monitoraggio radar che hanno consentito di delimitare l'area interessata dagli spostamenti e di individuare nel cuneo in frana spostamenti differenziali non noti precedentemente. Al contempo saranno mostrati i risultati dell'analisi di scenario effettuata tramite i modelli numerici FDEM che, opportunamente tarati, hanno consentito di ricostruire i meccanismi di innesco, la possibile evoluzione e la distanza di propagazione dei fenomeni oggetto di studio.

### **1. Introduzione**

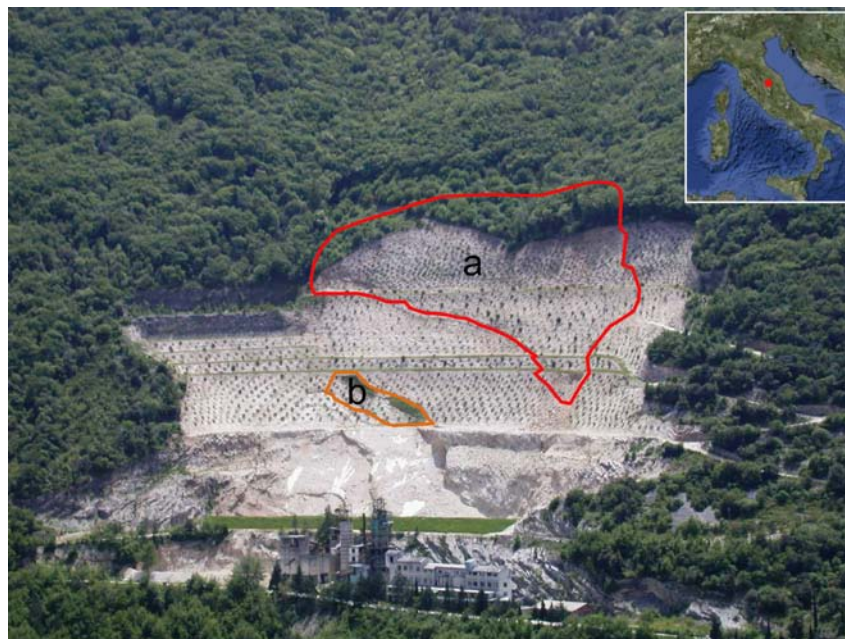
Il lavoro descritto in questa nota è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca PRIN 2009 tra l'Università degli Studi di Firenze (Coordinatore Nazionale Prof. Nicola Casagli), l'Università degli Studi di Bologna (Responsabile Unità di Ricerca Ing. Andrea Giorgetti) e il Politecnico di Torino (Responsabile Unità di Ricerca, Ing. Marco Barla) avente per oggetto l'integrazione di tecniche di monitoraggio e di modellazione numerica per l'allertamento rapido su grandi frane in roccia.

La tecnica di monitoraggio mediante interferometria radar da terra (GBInSAR), di recente introduzione in campo ingegneristico, consente di ottenere una ricostruzione spazialmente continua ed estesa arealmente fino ad alcuni km<sup>2</sup> del campo degli spostamenti superficiali dei versanti instabili con precisione millimetrica. Queste caratteristiche, unitamente al fatto che non è necessario un contatto diretto con lo scenario in esame ed una sostanziale indipendenza dalle condizioni meteorologiche e di illuminazione, rende la tecnica altamente appetibile ai fini del monitoraggio in tempo reale e come strumento di allertamento rapido in contesti caratterizzati da elevato rischio. Tra le numerose recenti applicazioni, la tecnica GBInSAR è stata utilizzata negli ultimi anni per ottenere una migliore comprensione delle cinematiche tridimensionali di fronti minerari (Severin *et al.* 2011, Farina *et al.* 2013), di frane (Schulz *et al.* 2012), per la previsione dell'istante di collasso di pendii e fronti di scavo instabili (Casagli *et al.*, 2010) e per validare o aggiornare modelli geotecnici di versante (Barla *et al.*, 2010, Barla & Antolini 2012). La possibilità quindi di utilizzare la tecnica GBInSAR come strumento di allertamento rapido per la mitigazione del rischio di frana necessita, nell'ambito di un processo di integrazione, della capacità di individuare scenari realistici di evoluzione futura dei fenomeni indagati mediante efficaci metodi di simulazione. Tra i differenti metodi numerici che possono essere adottati per la simulazione di tali fenomeni i metodi numerici combinati FDEM presentano il notevole

vantaggio di poter essere utilizzati sia per lo studio dell'innescò dei fenomeni franosi e sia per la modellazione della successiva propagazione (runout) poiché riescono a riprodurre i fenomeni di rottura progressiva, fratturazione e frammentazione del mezzo roccioso. È noto infatti che tali fenomeni rivestono particolare importanza nell'evoluzione delle condizioni di stabilità a breve e lungo termine dei pendii in roccia. In questo lavoro è stato utilizzato un codice FDEM chiamato "Y-Geo" (Mahabadi et al. 2012, Barla & Beer 2012, Barla et al. 2012) adattato alla modellazione di problemi geomeccanici e basato sulla versione originaria del codice open-source "Y2D" (Munjiza 2004). Nel codice Y-Geo, ogni oggetto è rappresentato da un reticolo di elementi combinati che utilizza il metodo degli elementi finiti per l'analisi degli sforzi e delle deformazioni interne agli elementi stessi, associato alla metodologia ad elementi distinti per l'analisi delle forze di interazione tra un elemento e l'altro. La transizione da continuo a discontinuo avviene attraverso processi di fratturazione e di frammentazione che portano alla generazione di solidi distinti interagenti tra loro. Nel codice Y-Geo la fratturazione può avvenire lungo il bordo dell'elemento finito, sia in modo I (fratture generate per trazione) che in modo II (fratture generate per taglio). Il comportamento meccanico di un ammasso roccioso è di tipo elastico-lineare fino al raggiungimento del limite di resistenza, espresso dal criterio di Mohr-Coulomb con un tension cut-off, per cui si innesca la fratturazione.

## **2. Descrizione del caso di studio**

Il caso di studio descritto in questo lavoro riguarda un fronte di cava abbandonato in località Torgiovanetto di Assisi (PG) che ha mostrato e continua a manifestare problemi di instabilità. A partire infatti dal 2003 è stato identificato su tale fronte un cuneo di roccia di volume stimato in circa 182,000 m<sup>3</sup> (Canuti et al 2006) soggetto a scivolamento progressivo verso valle (a in Figura 1). Successivamente a tale fenomeno si sono verificati ulteriori collassi di minore entità che hanno interessato il fronte di cava, il più importante dei quali è avvenuto nel Dicembre del 2005 (b in Figura 1). A valle del fronte di cava sono presenti una strada provinciale ed una strada statale che rappresentano i maggiori elementi esposti al rischio.



*Fig 1. Vista del fronte di cava di Torgiovanetto di Assisi (PG) con indicazione del cuneo instabile principale individuato nel 2003 (a) e dell'area interessata dal collasso del Dicembre 2005 (b).*

Il fronte di cava interessa per la sua totalità la formazione della Maiolica umbra che consiste in calcari micritici biancastri sottilmente stratificati (10 – 100 cm) con intercalazioni centimetriche di argilliti e marne grigiastre. Lo scivolamento del cuneo di roccia avviene lungo uno di questi piani che immerge verso N ( $350^{\circ}-5^{\circ}$ ) con inclinazione variabile tra  $24^{\circ}$  e  $28^{\circ}$ . A tergo il cuneo è delimitato da una frattura di trazione con direzione circa E-O, pressoché continua con apertura massima pari a 2 m. La porzione occidentale della frattura mostra una componente di spostamento in apertura prevalente mentre la porzione più orientale risulta meno aperta ed è caratterizzata da una componente verticale di spostamento prevalente. I limiti laterali del cuneo corrispondono verso E ad un'incisione morfologica impostata su una discontinuità principale mentre ad O, lungo il fronte di cava, sono presenti una serie di fratture sub-verticali appartenenti ad un sistema a direzione circa N-S. Lungo tutto il fronte di cava i fenomeni di instabilità più diffusi, compreso quindi l'oggetto del presente studio, riguardano scivolamenti lungo i giunti di strato con riempimento argilloso-marnoso causati sia dalla sfavorevole geometria di orientazione dei piani e del fronte di cava (entrambi inclinati verso N) e sia per le scadenti caratteristiche geomeccaniche dei materiali argilloso-marnosi di riempimento. Attualmente i movimenti del cuneo sono monitorati attraverso estensimetri a filo posti a cavallo della frattura di trazione principale e su altre fratture secondarie. Nell'ambito del progetto PRIN è stata installata una rete di sensori wireless (estensimetri a filo e a barra, clinometri, accelerometri, sensori di umidità del terreno e stazione meteo) che ha consentito di monitorare in continuo il comportamento in dettaglio della frana. La prima analisi dei dati mostra che la velocità di scivolamento del cuneo subisce variazioni stagionali notevoli e mostra accelerazioni in concomitanza di periodi piovosi intensi e/o prolungati. Durante la stagione secca (estate) invece il movimento della frana rallenta fino quasi a cessare.

### **3. Monitoraggio GBInSAR**

Al fine di comprendere più accuratamente il cinematiso in atto sul fronte di cava e ricostruire con continuità l'andamento degli spostamenti è stata eseguita una campagna di monitoraggio degli spostamenti superficiali mediante interferometria radar da terra (GBInSAR). Il sistema radar impiegato denominato IBIS-L, ampiamente descritto in letteratura (Barla *et al.*, 2010; Farina *et al.*, 2011), è stato installato sul piazzale di cava in posizione frontale rispetto allo scenario di interesse che risulta compreso tra 40 e 270 m di distanza dalla posizione di installazione (Figura 2). Lo strumento è stato installato mediante un nuovo sistema di installazione rapida rappresentato da blocchi portatili di calcestruzzo alleggerito già muniti di barre di ancoraggio. Questo sistema permette di installare la strumentazione in circa un'ora e di evitare la costruzione di un basamento in calcestruzzo, operazione che allunga e complica notevolmente l'installazione. Il sistema GBInSAR ha iniziato ad acquisire immagini del fronte di cava alle ore 13:30 del 31 gennaio 2013 ed ha funzionato in continuo fino alle ore 16:00 dell'11 Marzo 2013 quando è stato disinstallato dal sito. Per tutto il periodo di funzionamento il sistema è stato controllato in remoto. La frequenza di acquisizione delle immagini è stata impostata a 20', acquisendo così un totale di 1999 immagini SAR. I dati grezzi acquisiti sono stati successivamente elaborati tramite un software basato sulla tecnica dei *Permanent Scatterers* (Ferretti *et al.*, 2001) che ha consentito di stimare e rimuovere il contributo atmosferico dalle immagini e di risolvere l'ambiguità di fase per ottenere il corretto campo degli spostamenti. Per migliorare ulteriormente la stima e la rimozione della componente atmosferica un punto caratterizzato da elevata qualità interferometrica di fuori del cuneo è stato assunto come stabile (GCP - *Ground Control Point*). Di conseguenza le differenze di fase registrate nel tempo su tale punto possono essere interamente ascritte a contributi atmosferici e possono essere successivamente sottratte agli altri pixel dell'immagine, gli spostamenti dei quali risultano quindi riferiti al GCP. Inoltre al fine di ridurre ulteriormente il rumore dalle mappe di spostamento, l'analisi è stata effettuata utilizzando 430 immagini SAR, ovvero prendendo in considerazione soltanto le immagini acquisite ad intervalli di 2 ore. La mappa delle velocità medie riferite all'intero periodo di monitoraggio sovrapposte al DEM

(Digital Elevation Model) dell'area è riportata nella Figura 2. La risoluzione dei singoli punti nell'immagine è pari a 1x1 m.

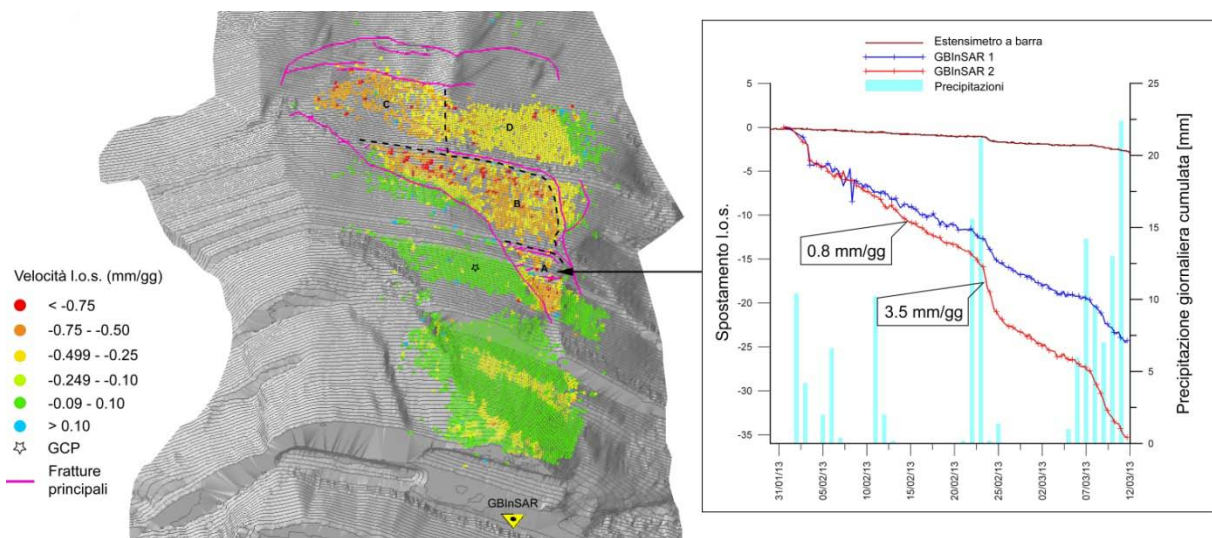


Fig 2. Mappa delle velocità di spostamento ottenuta con il GBInSAR nel periodo 31 Gennaio – 11 Marzo 2013 e serie temporali di spostamento di due punti dell'area A con indicazione delle precipitazioni giornaliere cumulate.

Grazie ad una copertura pressoché continua di PS lungo il fronte, è stato possibile identificare chiaramente l'area interessata dagli spostamenti e quindi l'estensione del cuneo in scivolamento. Gli spostamenti maggiori si concentrano nella parte inferiore del cuneo tra la seconda e la terza berma, nonché nel settore orientale del fronte dove in media risultano compresi tra 20 e 30 mm. Localmente nella parte centrale del cuneo e nella parte inferiore gli spostamenti superano 30 mm e possono essere ricondotti allo spostamento di blocchi particolarmente allentati in porzioni molto fratturate dell'ammasso roccioso. L'analisi delle velocità registrate permette inoltre di distinguere chiaramente almeno 4 settori del cuneo (A, B, C e D nella Figura 2) che si muovono con velocità medie differenti. Tali settori risultano limitati da fratture di trazione aperte sulle quali si verificano movimenti differenziali che vanno a sommarsi allo spostamento principale. L'analisi delle serie temporali dei punti ha permesso inoltre di evidenziare le fasi di accelerazione dello scivolamento, corrispondenti a periodi immediatamente successivi ad episodi piovosi (Figura 2). Tale risultato è in buon accordo con quanto registrato dalla rete di sensori WSN (estensimetri a filo e a barra).

#### 4. Modellazione numerica FDEM

Per lo studio del fenomeno di *runout* del massimo scenario credibile (collasso dell'intero cuneo di roccia) sono state eseguite una serie di modellazioni numeriche FDEM. Dapprincipio, al fine di calibrare il modello è stata eseguita un'analisi a ritroso dell'instabilità del dicembre 2005. I risultati dell'analisi sono mostrati nella Figura 3 insieme ai parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso adottati nel modello. Le caratteristiche di deformabilità e resistenza della roccia intatta e del materiale argilloso-marnoso di riempimento delle discontinuità sono stati determinati mediante sperimentazione di laboratorio in parte eseguita nell'ambito del progetto (prove di trazione indiretta, prove di resistenza a compressione monoassiale e triassiale e prove per la misura dell'energia di fratturazione) e in parte eseguita precedentemente (Graziani *et al.* 2009). Particolare attenzione è stata posta nella determinazione dell'energia di fratturazione del calcare intatto mediante specifiche prove di flessione a tre punti su barre con intaglio centrale (Malvar & Warren, 1988), parametro indispensabile nel codice Y-Geo. L'analisi mostra che con i parametri adottati, il modello è stato in grado di riprodurre l'evoluzione dell'instabilità e la reale distanza di propagazione del fenomeno, pari a 10 m dalla base

della prima berma sul piazzale di cava (Figura 3). L'innesco del fenomeno è stato ottenuto considerando una spinta idraulica a tergo del cuneo corrispondente alla completa saturazione dello stesso, condizione ritenuta realistica al momento del verificarsi del collasso.

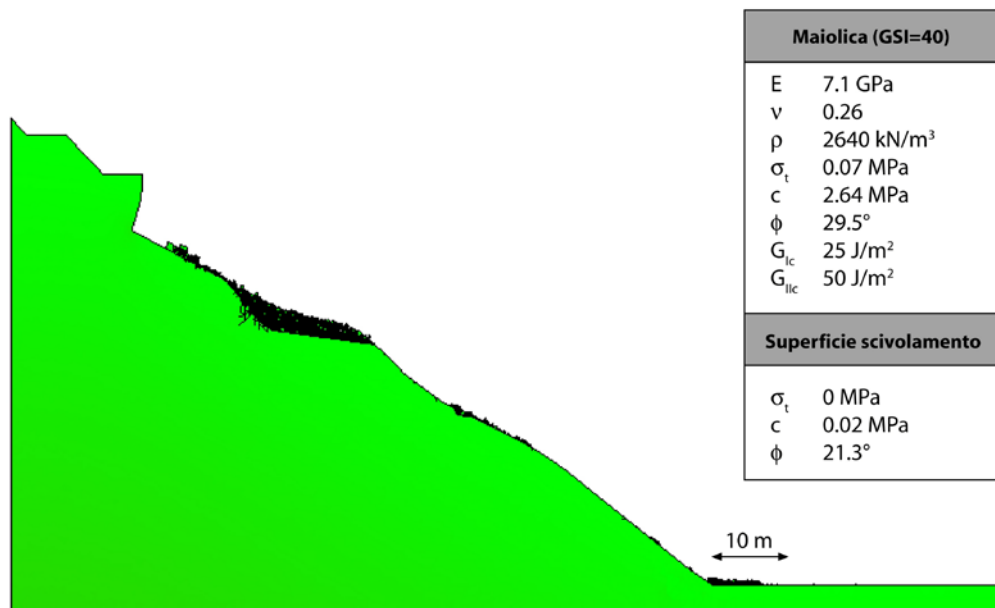


Fig 3. Risultati del modello FDEM relativo all'analisi a ritroso del collasso del Dicembre 2005 e relativi parametri geomeccanici adottati.

Per l'analisi del massimo scenario credibile (collasso dell'intero volume instabile pari a 182,000 m<sup>3</sup>) sono stati quindi utilizzati i parametri geomeccanici validati per mezzo dell'analisi a ritroso. L'innesco del fenomeno anche in questo caso è stato ottenuto tramite la saturazione completa del giunto di trazione a tergo del cuneo. In questo caso la superficie di scivolamento del cuneo è stata modellata introducendo anche la rugosità a grande scala di tale superficie, caratterizzata da una ondulosità su scala plurimetrica. I risultati del modello sono mostrati in Figura 4 dove è possibile apprezzare come il terrapieno costruito a protezione della strada provinciale riesca a contenere interamente la valanga di roccia.

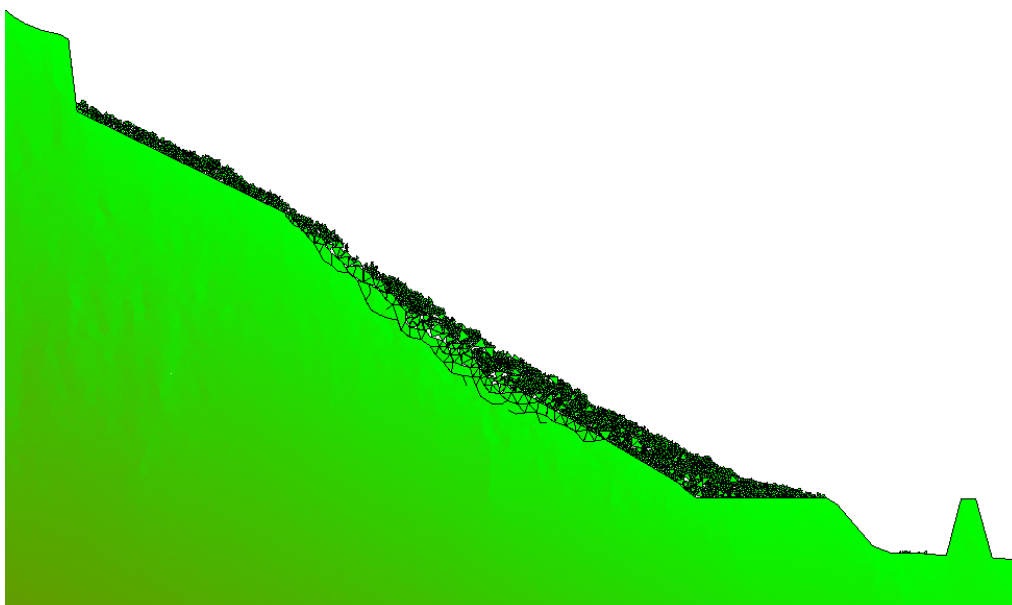


Fig 4. Risultati del modello FDEM relativo all'analisi del massimo scenario credibile.

## **5. Conclusioni**

In questo lavoro è stata dimostrata l'utilità di due nuovi strumenti di monitoraggio e modellazione, rispettivamente l'interferometria radar da terra ed i modelli numerici combinati FDEM, nell'ambito dello studio dei pendii in roccia instabili. In particolare, sul caso di studio mostrato, l'utilizzo dell'interferometria radar da terra ha permesso di ricostruire con precisione l'area interessata dagli spostamenti, di individuare nel cuneo in frana spostamenti differenziali non noti precedentemente, di monitorare le fasi di accelerazione del fenomeno e le relative cause. L'analisi del massimo scenario credibile (collasso dell'intero cuneo instabile) ha invece permesso di ricostruire la massima distanza di propagazione della valanga in roccia generata e di valutare l'efficacia delle opere di mitigazione poste in opera. Questo aspetto dimostra come la modellazione ibrida FDEM tramite il codice Y-Geo possa essere utilizzata come valido strumento per la previsione della distanza di propagazione associata alle valanghe in roccia.

## **Bibliografia**

- Barla M. & Antolini F. (2012). "Integrazione tra monitoraggio e modellazione delle grandi frane in roccia nell'ottica dell'allertamento rapido". In: G. Barla, M. Barla, A. Ferrero, T. Rotonda (eds) Nuovi metodi di indagine e modellazione degli ammassi rocciosi, CELID, Torino, ISBN 9788876619854, Chapter 11, 211-229.
- Barla G., Antolini F., Barla M., Mensi E., Piovano G. (2010). "Monitoring of the Beaugard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques". Eng. Geol., 116, 218-235.
- Barla M., Beer G. (2012). Editorial: Special Issue on Advances in Modeling Rock Engineering Problems. International Journal of Geomechanics, vol. 12 n. 6.
- Barla M., Piovano G., Grasselli G., 2012. "Rock slide simulation with the combined finite discrete element method". International Journal of Geomechanics. vol. 12, n. 6.
- Canuti, P., Casagli, N., Gigli, G. (2006). "Il modello geologico nelle interazioni fra movimenti di massa, infrastrutture e centri abitati". In: Barla, G., Barla, M. (Eds.), Instabilità di versante, interazioni con le infrastrutture i centri abitati e l'ambiente, MIR 2006 - XI ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, 28th-29th November 2006, 41-61.
- Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi, G. (2010). "Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry". Landslides, 7(3), 291-301, doi:10.1007/s10346-010-0215-y.
- Farina P., Coli N., Yön R., Eken G., Ketizmen H. (2013). "Efficient Real Time Stability Monitoring of Mine Walls: The Çöllolar Mine Case Study". Proceedings of International Mining Congress and Exhibition of Turkey, April 16-19, 2013, Antalya, Turkey, 11-117.
- Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Ricci P. (2011). "IBIS-M, an Innovative Radar for Monitoring Slopes in Open-Pit Mines". Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, September 18-21, 2011 Vancouver, Canada.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). "Permanent Scatterers in SAR interferometry". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8-20.
- Graziani A., Marsella M., Rotonda T., Tommasi P., Soccodato C. (2009). "Study of a rock slide in a limestone formation with clay interbeds". Proc. of International Conference on Rock Joints and Jointed Rock masses, Tucson, Arizona, USA, January 7-8, 2009., 8 pp.
- Mahabadi O. K., Lisjak A., Munjiza A., Grasselli G. (2012). "Y-Geo: a new combined finite-discrete element numerical code for geomechanical applications". International Journal of Geomechanics, vol. 12, n. 6.
- Malvar J., Warren G., 1988. "Fracture energy for three-point bend tests on single-edge notched beams", Technical report of NCEL, 37 pp.
- Munjiza A. (2004). "The combined Finite-Discrete Element Method". John Wiley & Sons, Chichester, 333 pp.
- Schulz W.H., Coe J.A., Shurtleff B.L., Panosky J., Farina P., Ricci P.P., Barsacchi G. (2012). "Kinematics of the Slumgullion landslide revealed by ground-based InSAR surveys". In: Eberhardt et al. (eds), Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding – Proc. of the 11<sup>th</sup> International and 2<sup>nd</sup> North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, June 3-8, 2012, Banff, Canada, ISBN 978-0-415-62123-6, 1273-1279.
- Severin J., Eberhardt E., Leoni L., Fortin S. (2011). "Use of Ground-Based Synthetic Aperture Radar to Investigate Complex 3-D Pit Slope Kinematics". Proc. of Slope Stability 2011 - International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, September 18-21, 2011, Vancouver, Canada.