

INTEGRAZIONE TRA MONITORAGGIO E MODELLAZIONE DELLE GRANDI FRANE IN ROCCIA NELL'OTTICA DELL'ALLERTAMENTO RAPIDO

Francesco Antolini, Marco Barla

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

Sommario

Nella presente nota si intendono illustrare gli sviluppi di un progetto di ricerca che prevede l'integrazione tra tecniche di monitoraggio e modelli numerici avanzati per lo studio delle grandi frane in roccia ai fini di un allertamento rapido delle popolazioni e delle infrastrutture esposte al rischio. In particolare tra le tecniche di monitoraggio si prenderanno in esame l'interferometria radar da terra (GBInSAR), mentre a livello di modellazione numerica l'attenzione verrà rivolta al metodo ibrido elementi finiti/elementi distinti (FDEM). Con riferimento ad alcuni casi reali, i modelli numerici, validati e calibrati sui dati di monitoraggio, verranno utilizzati per la produzione di scenari di evoluzione dei fenomeni franosi oggetto di studio. I risultati della modellazione consentiranno di definire particolari soglie (spostamenti, velocità, altezze piezometriche etc.), in base ai diversi scenari simulati, da cui si potrà ottenere una valutazione rapida del livello di criticità associata al fenomeno in esame.

Introduzione

La definizione e la valutazione completa degli scenari di rischio rappresenta un'operazione generalmente complessa, in quanto legata agli aspetti previsionali delle caratteristiche spazio-temporali dell'evento indagato. Le grandi frane in roccia possono essere caratterizzate da cinematismi rapidi, con associate elevate velocità e lunghe distanze di propagazione oppure, al contrario, si può assistere a grandi deformazioni gravitative profonde (DGPV) caratterizzate da velocità di deformazione assai più lente ma notevole volume (Mm^3) di materiale coinvolto (Crosta & Zanchi 2000, Barla & Chiappone 2006). Eventi con queste caratteristiche risultano, spesso, difficili da contenere con opere di contrasto. In contesti caratterizzati da elevata energia del rilievo - come gran parte del territorio italiano - non essendo spesso possibili interventi di delocalizzazione degli elementi a rischio a causa dell'esiguità e del valore ambientale del territorio disponibile, rivestono particolare importanza per la mitigazione del rischio, le procedure di allertamento rapido (*early warning*) con sistemi automatizzati o semi-automatizzati. La predisposizione di tali procedure è condizionata dalla capacità di individuare scenari realistici di evoluzione futura dei fenomeni franosi, i quali, a loro volta, dipendono pesantemente dalla qualità e completezza dei dati di monitoraggio e dall'efficacia dei metodi di simulazione adottati. Alla base di un simile approccio devono essere quindi presi in considerazione due aspetti fondamentali:

- la misura, il più possibile continua nel tempo ed estesa arealmente, dei parametri quantitativi (spostamenti in superficie ed in profondità, velocità di deformazione, livelli di falda etc.) ritenuti più opportuni alla caratterizzazione del singolo fenomeno tramite idonei sistemi di monitoraggio;
- la simulazione dei fenomeni osservati tramite modelli numerici volti alla produzione di scenari realistici con particolare riguardo non solo alle fasi di innesco ma anche

alla successive fasi di evoluzione.

Seguendo questo schema, i due aspetti precedentemente descritti non devono essere, come spesso accade, considerati separatamente ma al contrario devono essere integrati per mezzo di una metodologia che permetta di confrontare direttamente i risultati del modello numerico con i dati di monitoraggio. In sostanza quindi i dati di monitoraggio devono essere utilizzati per effettuare un confronto con i risultati delle simulazioni numeriche su punti significativi del versante e per tarare i modelli numerici stessi mediante analisi a ritroso. Dal confronto tra i risultati dei modelli così validati e i dati di monitoraggio, sarà quindi possibile estrarre specifici valori (ovvero soglie) dei parametri monitorati, ritenuti più significativi per l'indicazione della condizioni di stabilità del pendio studiato. Nell'ottica dell'allertamento rapido, al superamento delle differenti soglie, verranno attribuiti differenti e via via crescenti livelli di criticità a cui potranno far seguito opportune azioni di protezione civile in riferimento a quanto previsto dalla normativa nazionale di settore.

Quanto illustrato è l'oggetto di un progetto di ricerca PRIN 2009 in corso tra l'Università degli Studi di Firenze, l'Università degli Studi di Bologna ed il Politecnico di Torino.

Descrizione delle tecniche utilizzate e metodologia proposta

Interferometria radar da terra (GBInSAR)

L'interferometria radar è una tecnica nata nell'ambito della ricerca spaziale, che consente di determinare l'entità dello spostamento di un oggetto nel tempo confrontando le informazioni di fase delle onde elettromagnetiche inviate su uno o più oggetti (Curlander & McDonough 1991). Negli ultimi 10 anni l'implementazione di sensori radar ad apertura sintetica (SAR) basati a terra ha consentito di utilizzare tali sensori per il monitoraggio degli spostamenti superficiali di frane in terra ed in roccia (Tarchi et al., 2003, Antonello et al., 2004, Luzi et al., 2006).

Tra i maggiori vantaggi di questa tecnica deve essere sicuramente ricordata la possibilità di ottenere una ricostruzione degli spostamenti superficiali con precisione millimetrica ed estesa arealmente fino ad alcuni km², molto spesso senza soluzione di continuità. Questa caratteristica, 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 dell'allertamento rapido. Queste caratteristiche rivestono un'importanza ancor maggiore per il monitoraggio delle grandi frane in roccia, fenomeni molto spesso caratterizzati da *pattern* deformativi molto complessi.

In particolare in questo progetto di ricerca, uno specifico sensore interferometrico di tipo commerciale in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino è stato opportunamente attrezzato per essere installato in qualsiasi condizione di terreno in breve tempo, evitando la creazione di strutture di sostegno normalmente necessarie per questo tipo di monitoraggio. La possibilità di alimentazione della strumentazione radar tramite pannelli fotovoltaici consente inoltre di superare le problematiche legate alla fornitura elettrica da rete, tipicamente assente in sito nelle fasi di emergenza. Il sensore interferometrico inoltre sarà presto accoppiato con un antenna GPS geodetica per facilitare un riposizionamento veloce dello strumento in caso di campagne di acquisizione discontinue.

Modellazione numerica elementi finiti/elementi distinti (FDEM)

Nel campo della modellazione numerica volta alla definizione di scenari di evoluzione realistici per le frane in roccia, i metodi di riferimento nell'ingegneria geotecnica sono quelli

del continuo, quali gli elementi finiti (FEM) e le differenze finite (FDM), e i metodi del discontinuo, quali gli elementi distinti (DEM). Questi metodi sono adatti per lo studio dei materiali geotecnici ma non riescono a coglierne tutti i dettagli di comportamento. In particolare essi presentano dei limiti per lo studio delle grandi frane in roccia dove il comportamento reale del mezzo roccioso per piccole deformazioni può essere assimilato ad un mezzo continuo (o continuo equivalente), per poi divenire discontinuo attraverso fenomeni di rottura progressiva, fratturazione e frammentazione del mezzo, sia nella fase di innesco dell'instabilità che, ancor più, nelle fasi di evoluzione. Per superare questa limitazione è stato proposto l'approccio combinato elementi finiti-discreti (FDEM - Munjiza 2004). In particolare in questo progetto è stata utilizzata una versione del software chiamata Y-Geo (Mahabadi et al. 2012, Barla et al. 2011) adattata alla modellazione di problemi geomeccanici e basata sulla versione del codice open-source Y (Munjiza, 2004). Nel codice Y-Geo, ogni oggetto è rappresentato da un reticolo di elementi ibridi che utilizza il metodo continuo ad 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 tipicamente 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 sia in modo I (fratture generate per trazione) che in modo II (fratture generate per taglio). Le fratture si propagano sul bordo degli elementi del reticolo (e non attraverso), una volta che vengono raggiunte le condizioni di rottura. Gli ammassi rocciosi nel codice di calcolo vengono modellati a comportamento elastico-lineare fino al raggiungimento del limite di resistenza, espresso in questo caso dal criterio di Mohr-Coulomb con un tension cut-off.

Metodologia di integrazione

Con riferimento al diagramma di flusso riportato nella Figura 1 si descriveranno le fasi di integrazione tra le differenti tecniche descritte. Partendo da un potenziale generico fenomeno franoso o da una frana già avvenuta e di cui si vuole indagare il comportamento futuro, la metodologia prevede l'installazione di un primo sistema di monitoraggio costituito dal sensore radar interferometrico. Le caratteristiche della strumentazione consentiranno quindi di operare da subito ed in tempo reale, ottenendo entro poche ore dall'installazione le prime mappe di spostamento dello scenario monitorato. Dall'analisi delle mappe sarà possibile una prima selezione dei punti ritenuti in prima istanza rappresentativi del comportamento del fenomeno franoso e per mezzo di questi, sarà possibile una prima definizione di soglie di spostamento. Il monitoraggio interferometrico potrà essere integrato con altre tipologie di strumentazione *in situ* (inclinometri, estensimetri, tiltmetri, accelerometri, stazioni meteo, etc.) in grado di misurare grandezze di interesse non solo in superficie ma anche in profondità nel corpo di frana. In particolare nel progetto di ricerca si utilizzeranno sensori *wireless* integrati in una rete specifica attualmente in sviluppo nell'ambito del progetto da parte dell'Unità di Ricerca dell'Università degli Studi di Bologna. L'installazione della rete di sensori e la relativa analisi dei dati concorreranno in un tempo successivo (t_2) ad un progressivo affinamento nella selezione dei punti significativi e di conseguenza ad una definizione più precisa e più completa dei livelli di soglia da utilizzare nella verifica (ad es. spostamento in superficie + spostamento in profondità + livelli piezometrici). Parallelamente (t_2), nell'ottica di un progressivo approfondimento delle conoscenze sul fenomeno franoso, verranno eseguite indagini *in situ* ed in laboratorio ai fini della caratterizzazione geologica e geotecnica del sito. Anche in questo caso, come primo approccio si potranno svolgere indagini di tipo speditivo successivamente approfondite per definire in maniera accurata le caratteristiche geomeccaniche dei materiali. I modelli numerici, intesi nello schema della

Figura 1 sia come analisi a ritroso di fenomeni avvenuti o in fase di evoluzione e sia come modellazione degli scenari evolutivi, saranno tarati dappprincipio sui dati di spostamento provenienti dal monitoraggio interferometrico ed in seguito sui dati provenienti dalla rete di sensori installata sul corpo di frana via via che questi saranno resi disponibili. La modellazione sarà affinata progressivamente con i risultati delle indagini.

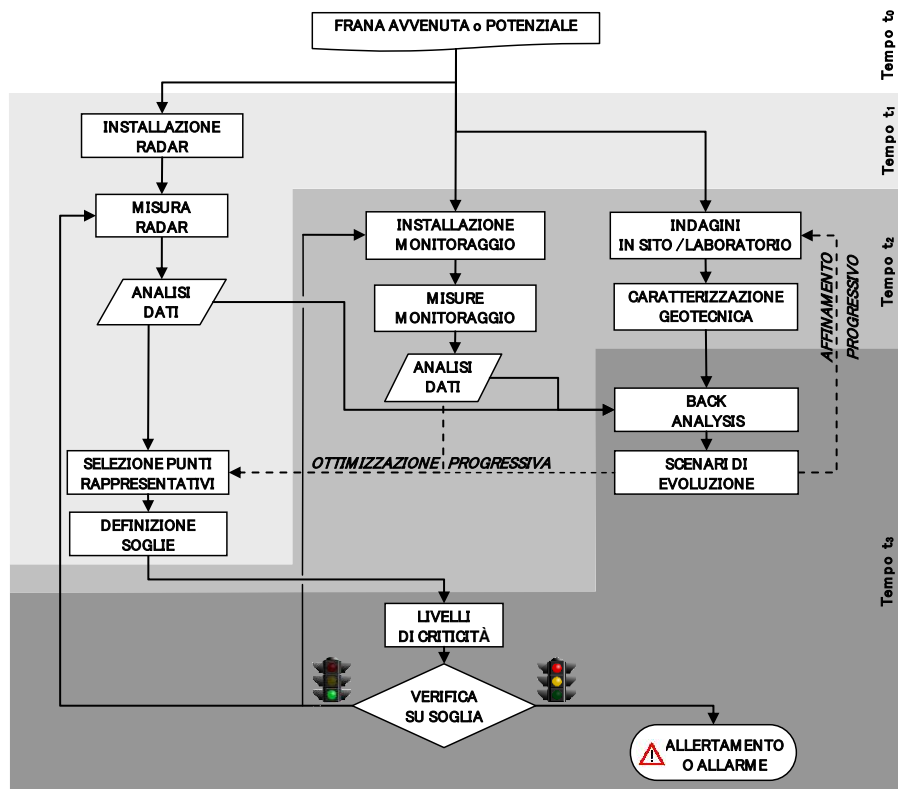


Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia di integrazione proposta.

Gli scenari di evoluzione realistici saranno quindi utilizzati per migliorare la selezione dei punti rappresentativi del fenomeno franoso in un'ottica di ottimizzazione progressiva e, di conseguenza, per la definizione finale delle soglie da impiegare per il monitoraggio a medio - lungo termine del fenomeno studiato. Alle differenti soglie saranno associati differenti livelli di criticità e tramite la verifica diretta di tali soglie sui punti rappresentativi scelti si potrà definire la prosecuzione normale del monitoraggio (nel caso di mancato superamento e livello di criticità ordinario) oppure al contrario si potranno attivare le procedure di allertamento o di allarme vero e proprio.

Applicazione ad un caso di studio

In questo paragrafo, per dimostrare le potenzialità della metodologia illustrata, si descriverà un'applicazione su un fronte roccioso instabile. Il caso di studio riguarda un esteso cuneo di roccia del volume stimato di circa 140'000 m³, situato nella porzione superiore di una cava di maiolica dismessa (Cava di Torgiovanetto), situata ad est della città di Assisi (Figura 2). Nell'ambito del progetto di ricerca, il fronte di cava di Torgiovanetto costituisce il sito pilota per l'applicazione della metodologia descritta. La frana minaccia in particolare due strade che corrono poco a valle del fronte instabile (Figura 2). L'ammasso roccioso e le condizioni geologiche e geotecniche del sito sono state estesamente approfondite negli ultimi anni in diversi studi (IRPI-CNR, 2006; Graziani et al., 2007). Sono state anche eseguite alcune campagne di misura mediante interferometria SAR da terra per il monitoraggio degli

spostamenti del cuneo (Canuti et al., 2006). Per lo studio del fenomeno di *runout* del massimo scenario credibile (collasso dell'intero cuneo di roccia) è stata eseguita una modellazione numerica FDEM. I risultati dell'analisi sono riportati nella Figura 3, insieme ai parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso adottati nel modello.

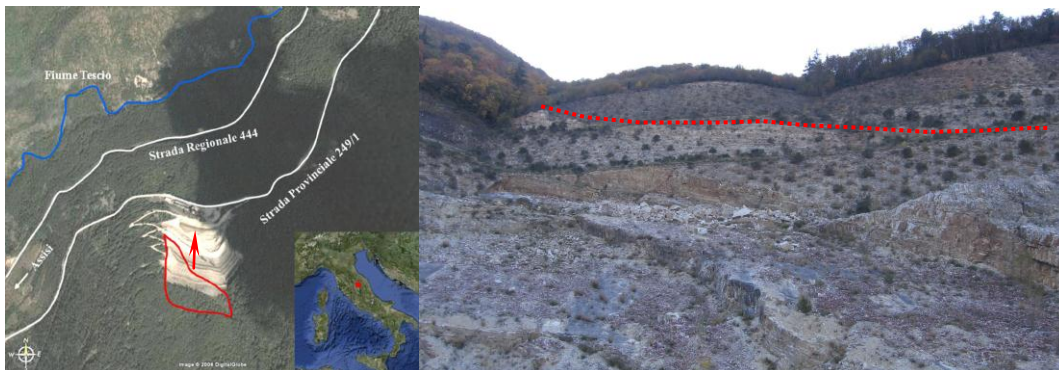


Figura 2. a) Localizzazione del fronte di cava di Torgiovannetto di Assisi. b) Panoramica del cuneo instabile con indicazione del piano basale di scivolamento.

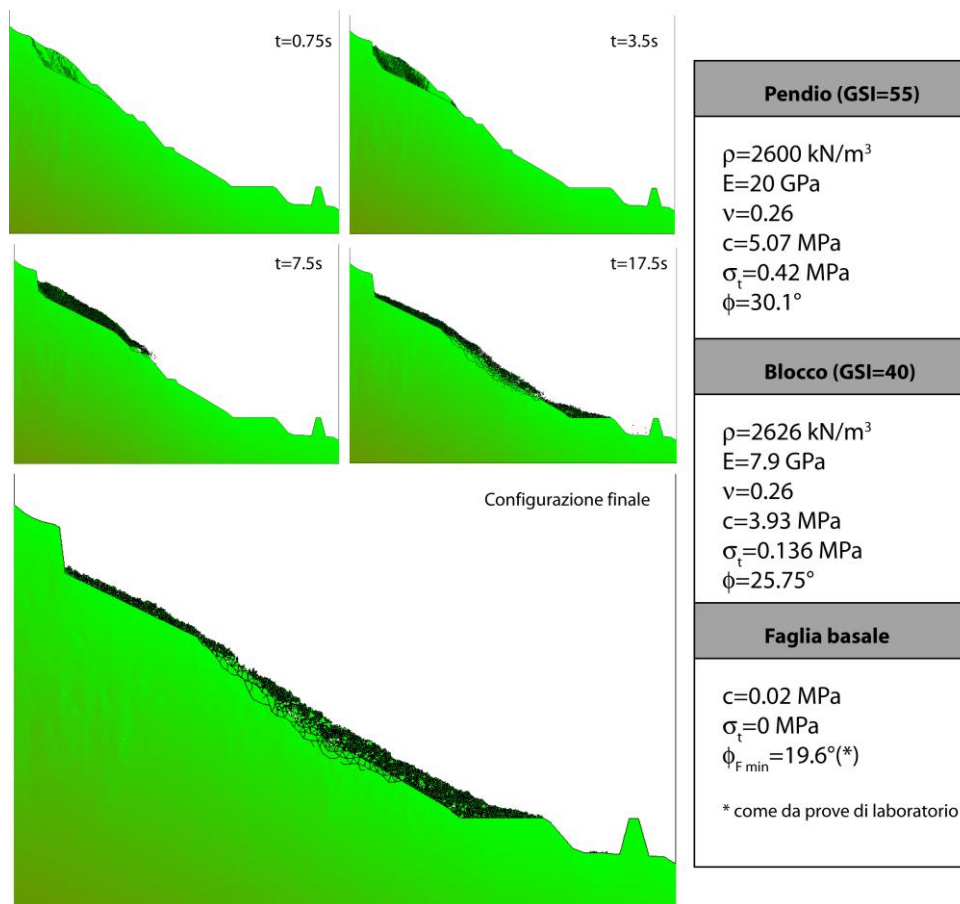


Figura 3. Risultati del modello FDEM. Sequenza di propagazione della valanga di roccia generata dalla completa mobilitazione dell'intero cuneo instabile e parametri geomeccanici utilizzati nel modello.

I parametri, noti da letteratura, sono stati validati mediante l'analisi a ritroso dello scivolamento di un cuneo di roccia con geometria simile al cuneo principale avvenuto nell'inverno del 2005.

Sviluppi futuri della ricerca

Nell'ambito del progetto di ricerca descritto, nel sito pilota di Torgiovanetto, sarà effettuata nei prossimi mesi una nuova campagna di misura degli spostamenti del cuneo instabile mediante interferometria radar. Oltre al radar verrà installata una rete di sensori wireless formata da estensimetri, igrometri, tiltmetri, geofoni e stazione meteo, i cui dati di monitoraggio saranno utilizzati anch'essi per la validazione del modello FDEM e per la costruzione degli scenari. Di conseguenza si procederà alla definizione delle soglie e dei livelli di criticità associati al fenomeno franoso.

Ringraziamenti

La ricerca descritta è co-finanziata nell'ambito del progetto PRIN 2009 'Integrazione di tecniche di monitoraggio e di modellazione numerica per l'allertamento rapido su grandi frane in roccia' (Coordinatore Nazionale Prof. Nicola Casagli – Università degli Studi di Firenze, Responsabile Unità di ricerca Università degli Studi di Bologna Ing. Andrea Giorgetti, Responsabile Unità di Ricerca Politecnico di Torino Ing. Marco Barla).

Bibliografia

- Antonello G., Casagli N., Farina P., Leva D., Nico G., Sieber A.J., Tarchi D., 2004. Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements. *Landslides* (2004), 1:21-28, doi:10.1007/s10346-003-0009-6.
- Barla, G., Chiappone A., 2006. Interazione tra deformazioni gravitative profonde di versante e impianti idroelettrici in ambiente alpino. Le dighe di Beauregard e Pian Palù. In: *Instabilità di versante - Interazione con le infrastrutture i centri abitati e l'ambiente*, MIR 2006, Torino 28-29 Novembre 2006, 225-250, Pàtron editore, Bologna.
- Barla M., Piovano G., Grasselli G., 2011. Rock slide simulation with the combined finite discrete element method. *International Journal of Geomechanics*. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000204.
- Crosta G., Zanchi A., 2000. Deep seated slope deformations. Huge, extraordinary, enigmatic phenomena. *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*, Cardiff.
- Curlander J., McDonough R.N., 1991. *Synthetic Aperture Radar. System and Signal Processing*. John Wiley & Sons, Chichester, .
- Graziani A., Rotonda T., Marsella M., Soccodato C., Tommasi P., 2007. Frane di scivolamento in formazioni rocciose calcaree con interstrati argillosi. *Atti della "Giornata in ricordo di Renato Ribacchi"*, Roma.
- IRPI-CNR, 2006. *Caratteristiche litologiche, strutturali e geomorfologiche del versante nel quale ricade l'area della ex-cava in prossimità di casa Tor Giovannetto, comune di Assisi*. Committente: Scuola di Alta Specializzazione e Centro Studi per la Manutenzione e Conservazione dei Centri Storici in Territori Instabili, 23 pp., Perugia.
- Luzi G., M. Pieraccini D., Mecatti L., Noferini G., Macaluso A., Galgaro C., Atzeni C., 2006. Advances in ground based microwave interferometry for landslide survey: a case study. *Int. J. of Remote Sens.*, Vol. 27, No. 12 (2006), 2331 – 2350.
- 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*, DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000216.
- Munjiza A., 2004. *The combined Finite-Discrete Element Method*. John Wiley & Sons, Chichester, 333 pp.
- Tarchi D., Casagli N., Fanti R., Leva D., Luzi G., Pasuto A., Pieraccini M., Silvano S., 2003. Landslide monitoring by using ground-based interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Eng. Geol.*, 68 (2003), 15-30.