

## **Integrazione di tecniche LiDAR e FEM per lo studio e l'analisi della stabilità dei pendii in frana**

Andrea Manconi (\*), Daniele Giordan (\*), Paolo Allasia (\*), Marco Baldo (\*),  
Giorgio Lollino (\*), Simone Ceresini (\*\*), Armando Cavazzini (\*\*)

(\*) CNR-IRPI, Gruppo di Geo-Monitoraggio, Torino, Italia, Tel. +39011/3977829, Fax:+39011/3977820  
Email: andrea.manconi@irpi.cnr.it, web: www.irpi.to.cnr.it  
(\*\*) BLOM CGR, Parma, Italia, www.blomas.com

### **Riassunto**

L'obiettivo principale di questo lavoro è quello di definire delle procedure semi-automatiche che, a partire da un modello digitale del terreno (DTM) realizzato da un rilievo LiDAR aereo, portino alla costruzione di un modello tridimensionale di un pendio soggetto ad instabilità. Usando successivamente il metodo di calcolo numerico agli elementi finiti, il modello può fornire parametri utili sia per l'analisi di stabilità del pendio in frana che per la valutazione di opere di stabilizzazione da effettuare o eventualmente già in atto. Le procedure sviluppate sono state applicate in via sperimentale per lo studio del movimento franoso di Grange Orgiera, un fenomeno che interessa il territorio del comune di Sampeyre (CN).

### **Abstract**

In this work we define a set of procedures that, starting from a digital terrain model (DTM) produced from an aerial LiDAR survey, help to build-up a 3D mechanical model of a region prone to landslide hazard. The model is then used to perform a slope stability analysis based on the finite element method numerical technique. The procedure has been tested on the landslide movement known as Grange Orgiera, Sampeyre, located in the Cuneo province, northern Italy. In future, similar analyses will be performed also in other areas to better understand the evolution of similar landslide phenomena.

### **Introduzione**

In Italia il rischio idrogeologico è diffuso in modo capillare, e si presenta in modo differente a seconda delle peculiarità geomorfologiche del territorio. Le forme di dissesto sono un problema di notevole rilevanza, che continua a provocare danni ingenti ai beni e la perdita di molte vite umane. In particolare, i movimenti franosi rappresentano una percentuale considerevole dei fenomeni di dissesto idrogeologico che colpiscono il territorio italiano. Nell'ambito del monitoraggio e analisi dei movimenti franosi, l'utilizzo di tecniche innovative di rilevamento fornisce un apporto fondamentale per la comprensione delle cause di dissesto e può essere decisivo per la mitigazione di un eventuale rischio ad esso associato. Ad esempio, le tecniche di telerilevamento hanno rivoluzionato la possibilità di osservare i fenomeni franosi ad una scala e con una risoluzione impensabile fino a pochi anni fa. I modelli digitali del terreno (DTM) sono diventati in molti casi una indispensabile base di partenza e uno strumento fondamentale per l'analisi e lo studio dei fenomeni di dissesto. I DTM costruiti a partire dai rilievi effettuati con tecniche di laser scanning (LiDAR) da aereo possono coprire aree di decine di chilometri quadrati, e raggiungere in alcune condizioni un'accuratezza dell'ordine del centimetro. Attraverso analisi multitemporali, ovvero un confronto di DTM acquisiti in momenti diversi, è possibile inoltre eseguire un monitoraggio dell'evoluzione del fenomeno nel tempo. Negli ultimi 25 anni c'è stata una netta evoluzione degli strumenti a disposizione per quanto riguarda le analisi di stabilità dei versanti. Si è passati infatti

dalle analisi bi-dimensionali di tipo grafico realizzate manualmente alla possibilità di effettuare analisi numeriche tridimensionali complesse anche su un personal computer per mezzo software che sono oramai accessibili in larga scala. In questo contesto, l'obiettivo principale di questo lavoro è quello di definire delle procedure che, a partire da un modello digitale del terreno (DTM), realizzato attraverso un rilievo LiDAR da aereo, portino alla costruzione di un modello meccanico tridimensionale. Quest'ultimo, usando il metodo di calcolo numerico agli elementi finiti (FEM), potrà fornire in maniera semi-automatica dei parametri utili sia per l'analisi di stabilità del pendio in frana (Fattore di Sicurezza) che per la valutazione di opere di stabilizzazione da effettuare o eventualmente già in atto.

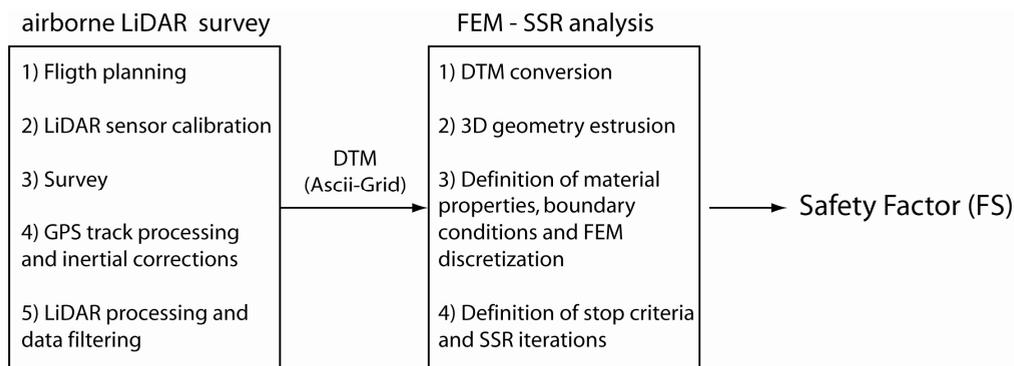


Figura 1 – Flow chart dell' algoritmo considerato per il calcolo del Fattore di Sicurezza (FS) a partire da un rilievo LiDAR aereo.

## Metodi

In figura 1 viene mostrato il diagramma di flusso relativo all'algoritmo considerato in questo studio per ottenere un valore del Fattore di Sicurezza (FS) di un pendio a partire da un rilievo LiDAR aereo. Le prime fasi dell' algoritmo riguardano l'acquisizione, l'elaborazione e la classificazione di un dato LiDAR aereo. Poiché la descrizione dettagliata di questi procedimenti non è l' argomento centrale di questo lavoro si rimanda il lettore a pubblicazioni di riferimento specifiche (e.g., Shultz et al., 2004). Il prodotto finale considerato a valle dell'elaborazione del dato LiDAR è un DTM a maglia regolare, il quale viene esportato in un file di testo di interscambio (formato ASCII-GRID). Per poter generare e analizzare un modello meccanico a partire dal DTM, quest' ultimo deve essere convertito in un formato leggibile dal software di analisi ad elementi finiti (FEM). Per quanto riguarda l'analisi FEM, in questo lavoro è stata utilizzata suite software Comsol Multiphysics®, release 4.1, la quale fornisce diversi moduli di processamento sia per l'analisi di modelli meccanici complessi (Structural Mechanics® module) che per la realizzazione di procedure iterative attraverso l'integrazione di subroutines scritte in linguaggio Matlab® (Matlab Live Link® module). E' stata sviluppata una prima subroutine di trasformazione del file ASCII-GRID in un altro file di testo che possa essere importato dal software FEM (vedi specifiche manuale Comsol Multiphysics®). Queste informazioni verranno utilizzate nello step successivo da una seconda subroutine, la quale attraverso l'integrazione di comandi Matlab® e facilities Comsol Multiphysics® costruisce inizialmente un parallelepipedo, di dimensioni pari all' estensione dell' area in esame e di altezza unitaria, e per "estrusione", guidata da una funzione tridimensionale discreta (ovvero il DTM stesso), genera un modello meccanico 3D che riproduce i dettagli topografici di superficie dell'area in esame. La risoluzione del dettaglio topografico è pari a quella considerata a valle dell'elaborazione del dato LiDAR aereo. Successivamente, al modello 3D vengono assegnate le proprietà dei materiali presenti nell' area in esame, le eventuali condizioni al contorno e viene discretizzato per il calcolo successivo calcolo FEM. In questo lavoro abbiamo preso in

considerazione il comportamento di materiali elastici-perfettamente plastici, in quanto essi rappresentano una alta percentuale della casistica riscontrabile nell'analisi della stabilità pendii in frana. Esistono diverse procedure per il calcolo del FS per mezzo di software FEM. In questo lavoro è stata utilizzata la procedura denominata *Shear Strength Reduction* (SSR), la quale ha dimostrato di restituire risultati compatibili con i metodi analitici standard (Stead et al., 2001; Hammah et al., 2006). Per un materiale elastico-perfettamente plastico che segue il modello di Mohr-Coulomb, si considera:

$$\tau = c + \tan(\phi) \sigma \quad [1]$$

dove  $\tau$  è la resistenza al taglio (*shear strength*),  $c$  la coesione e  $\phi$  l'angolo di attrito interno del materiale. La SSR consiste nel variare in maniera iterativa (per  $i = 1 \rightarrow N$ ), riducendola progressivamente di un fattore  $K$ , la resistenza al taglio del materiale, quindi:

$$\frac{\tau}{K} = c' + \tan(\phi') \sigma' \quad [2]$$

dove:

$$c' = \frac{c}{K}; \quad \phi' = \tan^{-1} \left[ \tan \left( \frac{\phi}{K} \right) \right] \quad [3]$$

Quando il calcolo numerico FEM non riesce trova una soluzione dopo un numero massimo di iterazioni predefinito (convergenza), il valore  $K$  relativo all'iterazione  $i$  corrente corrisponde al fattore di sicurezza FS. Questo può essere considerato, in termini pratici, il fattore di cui deve essere ridotta la resistenza dei materiali affinché il pendio collassi. Pertanto, per  $FS \geq 1$  si avrà la condizione di equilibrio, mentre  $FS < 1$  denota una condizione di instabilità.

### **Esempio: la frana di Grange Orgiera, Sampeyre (CN)**

La frana di Grange Orgiera (vedi figura 2) è situata a monte del centro abitato di Villar, sul versante sottostante la dorsale di spartiacque tra la valle Po e la valle Varaita (report ARPA Regione Piemonte, 2009). Il pendio, nel tratto compreso tra il fondovalle Varaita e la cresta soprastante il Pian delle Serre, è caratterizzato da pendenze comprese tra i 18 e i 25 gradi. L'area, già nota per eventi franosi avvenuti in passato e ancora ben riconoscibili sul terreno, è interessata da un fenomeno di deformazione gravitativa profonda, la quale coinvolge circa 20 km<sup>2</sup> di territorio. In questo contesto si inserisce la frana di Grange Orgiera, un fenomeno complesso inquadrabile come scivolamento rotazionale con evoluzione in colamento, che coinvolge materiale detritico di varia pezzatura in abbondante matrice argillosa. Complessivamente il dissesto copre una superficie di circa 0,5 km<sup>2</sup> e presenta uno sviluppo di circa 850 m. La zona di distacco è situata ad una quota di circa 2140, mentre il fronte dell'accumulo è posizionato alla quota di 1720 m, in corrispondenza delle Grange Orgiera. Segni di attività della frana sono stati osservati a partire dalla fine del mese di giugno del 2009, ma i primi dati certi di movimenti risalgono al 7 luglio 2009. In 20 giorni, a partire da tale data, si è registrato uno spostamento del fronte tra i 60 e gli 80 metri, di cui la maggior parte tra il 15 e il 25 di luglio 2009.

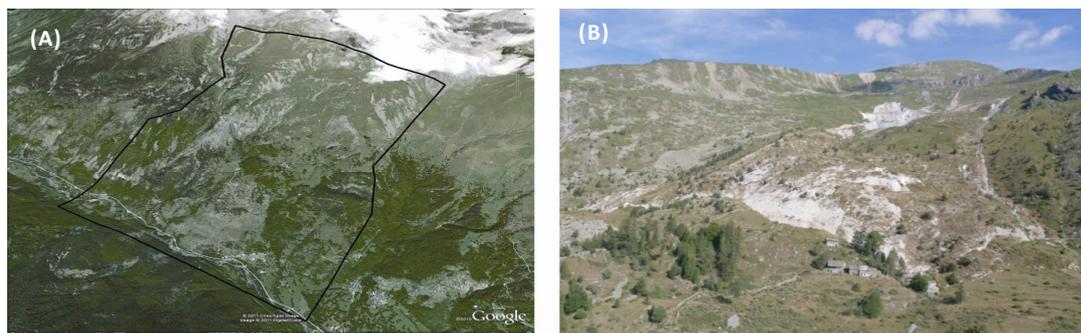
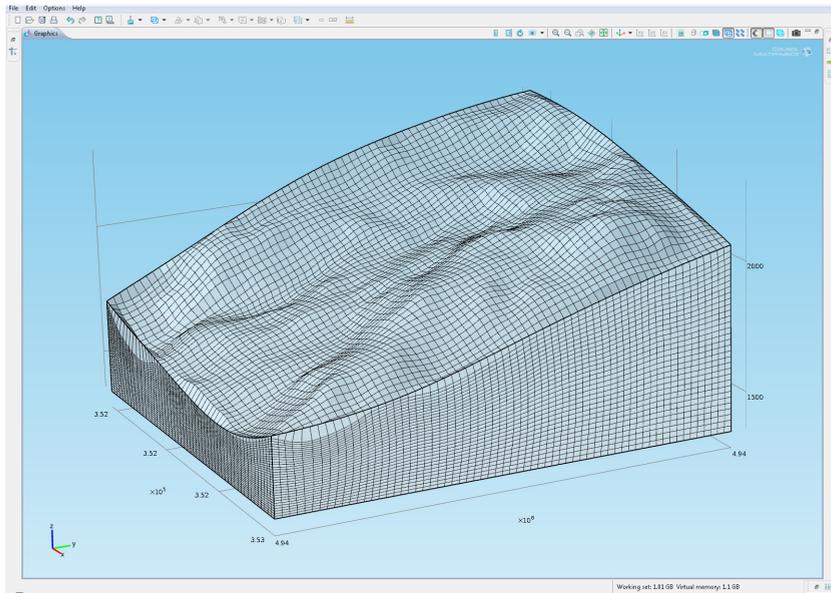


Figura 2 – (A) Vista Google Earth™ dell' area rilevata (poligono nero) e (B) dettaglio del dissesto riattivatosi nel 2009, noto come frana di Grange Orgiera, Sampeyre (CN).

Il rilievo LiDAR aereo sull'area in dissesto è stato effettuato dalla BLOM CGR in data 16 Maggio 2011. Il sensore Optech Pegasus HD 400 Laser Altimeter, montato sul velivolo Partenavia P68B, ha acquisito sull'area con una risoluzione media pari a circa  $6 \text{ pt/m}^2$ . L'acquisizione del dato LiDAR è stata effettuata eseguendo dieci linee di volo in direzione Est-Ovest e una cross-line in direzione Sud-Nord. I parametri per la calibrazione del sensore sono stati determinati precedentemente su un poligono ben identificato nelle vicinanze dell'Aeroporto di Parma e un ulteriore affinamento degli stessi è stato eseguito verificando la congruenza altimetrica nelle aree in comune con la cross-line e sfruttando delle misure a terra eseguite su aree di test, zone estese e piane (campi da calcio, parcheggi, ecc.) dove le variazioni altimetriche non sono significative. Durante l'acquisizione del dato laser altimetrico, un ricevitore GPS e un sistema inerziale solidale al sensore LiDAR registrano con altissima frequenza la posizione dello stesso. Questo dato è fondamentale per l'individuazione della posizione e dell'assetto angolare dell'aeromobile al momento della misura della distanza dei punti a terra. Il software usato per il calcolo della traiettoria GPS è POSGPS, contenuto nella suite Applanix™ POSpac, mentre la classificazione dei punti e la realizzazione dei modelli digitali del terreno è la suite di Terrascan™ della società Terrasolid. La classificazione dei punti viene eseguita con delle procedure semi-automatiche di filtraggio che vengono comunque ulteriormente verificate da operatori specializzati. Il DTM finale (grigliato regolare  $1 \times 1$  metri), generato a partire dalla nuvola di punti classificata come “ground” o “bare earth”, è stato esportato in formato testo ASCII-GRID.



*Figura 3 – Rappresentazione del modello 3D costruito a partire dal DTM della frana di Grange Orgiera. Il modello realizzato sarà utilizzato per il successivo calcolo FEM-SSR.*

A questo punto il dato DTM è stato elaborato seguendo le procedure descritte precedentemente (Figura 3). In Figura 4A viene riportato il grafico risultante per il FS relativo al pendio esaminato. Per poter rendere semi-automatica la procedura e non incorrere quindi in un messaggio di errore che pregiudichi l'esportazione di un grafico riassuntivo finale deve essere scelto un criterio di arresto del calcolo su base empirica. Nel nostro caso è stato considerato il rapporto tra spostamenti massimi orizzontali e verticali misurati ad ogni iterazione sulla superficie del pendio in esame ( $H/V$ ). Essendo il motore dominante del dissesto la forza di gravità, ed agendo la stessa principalmente sulla direzione verticale, un valore di  $H/V > 1$  può essere considerato un indicatore di una situazione anomala che può portare al collasso. Essendo il criterio di stop fondamentale nella determinazione del valore di FS, questa parte della procedura è ancora in fase di test e in futuro verranno confrontati valori di FS calcolati considerando criteri di stop differenti.

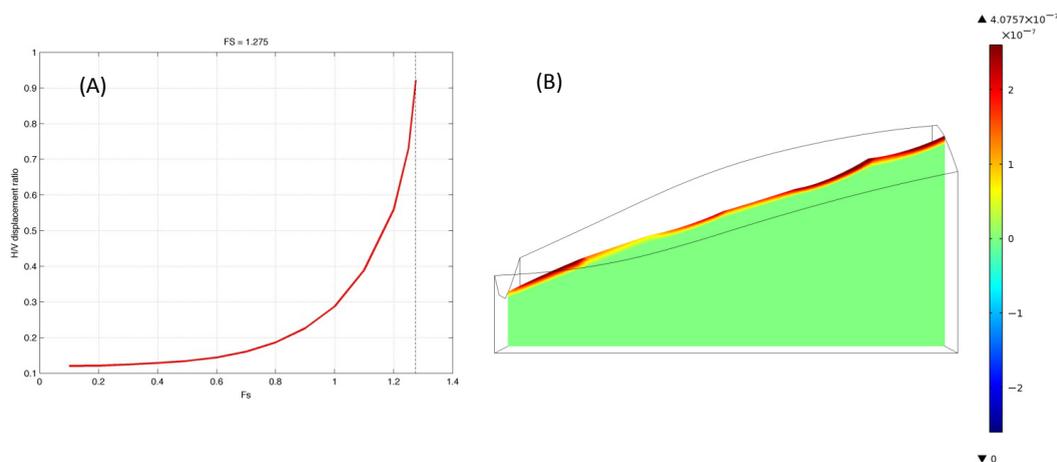


Figura 4 – (A) Risultati delle iterazioni relative al metodo SSR per il calcolo del FS  
(B) Dettaglio della deformazione plastica (unità di misura strain) calcolata in una sezione caratteristica di riferimento del pendio preso in esame.

## Conclusioni

In questo lavoro sono state presentate delle procedure che permettono l'implementazione in maniera semi-automatica di generare un modello meccanico tridimensionale per l'analisi della stabilità di un pendio in ambiente FEM, partendo da un DTM proveniente da una campagna LiDAR aerea. Le procedure sono state sperimentate con successo su un'area soggetta a dissesto, la frana di Grange Orgiera, Sampeyre (CN). Le procedure sviluppate nell'ambito di questo lavoro potranno essere utilizzate in futuro per lo studio, l'analisi e la comprensione dei fenomeni di dissesto in altre aree.

## Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito del Premio ASITA "Licinio Ferretti" 2010. AM ringrazia tutto lo staff BLOM CGR di Parma per la disponibilità durante il periodo di stage, in particolare M. Andreozzi, A. Bertolotti. Il dato LiDAR della frana Grange Orgiera è stato elaborato presso BLOM CGR. Si ringrazia IREA-CNR per la licenza della suite Comsol Multiphysics® release 4.1.

## Riferimenti bibliografici

ARPA Regione Piemonte (2009), "La frana di Grange Orgiera nel comune di Sampeyre(CN)", *open report*.

Hammah, R.E. et al. (2006), "Investigating the performance of the shear strength reduction (SSR) method on the analysis of reinforced slopes", *Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical and 7th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences Sea to Sky Geotechnique, Vancouver, Canada*.

Stead, D. et al. (2001), "Advanced numerical techniques in rock slope stability- Applications and limitations", *UEF*, 615-624.

Schultz, W. et al. (2004), "Landslides mapped using LiDAR imagery, Siattle, Washington", *USGS open file report*.