

Tecnologie geomatiche per l'analisi di stabilità dei fronti rocciosi tramite modellazione numerica ad elementi distinti

Francioni Mirko (*), Salvini Riccardo (*), Riccucci Silvia (*), Machetti Emilio (**)

(*) Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze della Terra e Centro di Geotecnologie
Via Vetri Vecchi 34, 52027 San Giovanni Valdarno, Arezzo. Tel 055 9119431, Fax 055 9119439, francioni4@unisi.it
(**) Copernico SRL, Via Spagni 37, 53024 Montalcino, Siena
Tel 0577 848284, Fax 0577 847918, machemil@libero.it

Riassunto

Con la progressiva sensibilizzazione verso le problematiche del rischio geologico, lo studio della stabilità dei versanti ha assunto un ruolo centrale nelle Scienze della Terra, specialmente nelle aree ad alta vulnerabilità per presenza di infrastrutture e attività antropiche. Queste problematiche impongono lo studio dei processi geologici basato sull'uso in dipendente o integrato di varie tecniche di misura; la Fotogrammetria Digitale Terrestre (FDT) ed il Laser Scanning (LS) sono oggi tra gli strumenti più diffusi per l'analisi di stabilità.

Per lo studio del rischio geologico relativo alla stabilità dei fronti rocciosi sono necessari dati geomeccanici e informazioni geometriche riguardanti il versante e le discontinuità (es. giacitura e spaziatura). A questo proposito le tecniche proposte permettono di acquisire tali informazioni anche in aree inaccessibili. Parallelamente è sempre necessario eseguire un rilievo geomeccanico ed acquisire le conoscenze delle proprietà fisico-meccaniche della roccia intatta e delle superfici di discontinuità.

L'insieme dei dati ricavati da metodologie tradizionali e da più innovative tecniche di rilievo geomatico, ha permesso in questo lavoro di effettuare con accuratezza l'analisi di stabilità mediante tecniche di modellazione numerica agli elementi distinti valutando lo stato tensionale dell'ammasso e i possibili meccanismi di cedimento.

Abstract

With the increasing awareness to the geological risks, the study of rock slope stability plays a key role in the Earth Sciences, especially in areas with high vulnerability for the presence of infrastructures and human activities. These issues require an accurate analysis of the geological processes which knowledge can be obtained from several independent or integrated measurement techniques; nowadays, Digital Terrestrial Photogrammetry (DTP) and Laser Scanning (LS) are some of the most widespread techniques used in studying the slope stability.

The engineering-geological data and the geometrical setting of the rock slopes and discontinuities (ex. attitude and spacing) are needed to study the geological risk related to the stability of natural or artificial fronts. DTP and LS allow to get this information also in inaccessible sites and they permit to manage data within a GIS. In addition, it is always necessary to know the physical-mechanical properties of intact material and joints; such information come either from laboratory or in situ tests and from engineering-geological surveys.

Data collected by traditional methods and recent geomatics techniques, have allowed an accurate analysis of slope stability by means of distinct elements numerical modeling; in such a way the mass stress has been evaluated and the possible failure mechanisms recognized .

Introduzione

Il presente lavoro documenta le procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati rilevati in un fronte di cava ubicato nell'area estrattiva del Bacino Marmifero Carrarese, nelle Alpi Apuane (Figura 1), mediante l'uso di procedure geomatiche e geomeccaniche finalizzate alla verifica di stabilità.

In particolar modo verranno mostrati i risultati ottenuti dall'integrazione di tecniche di FDT e LS. Il rilievo LS ha permesso di ottenere una perfetta ricostruzione geometrica del fronte, inteso sia come versante che come fratturazione in esso riconoscibile; la FDT ha consentito di avere una maggiore interpretazione del dato rilevato grazie alla visione fotografica stereoscopica. I dati così ottenuti, uniti a quelli ricavati dal rilievo geomeccanico, risultano essere di elevata precisione e rappresentativi dell'intero fronte a differenza di quelli ottenibili con le sole metodologie di rilievo geologico più comuni; tali dati sono stati utilizzati per effettuare l'analisi di stabilità tramite modellazione ad elementi distinti.



Figura 1 – Area estrattiva in esame, Bacino Marmifero Carrarese - Alpi Apuane.

Le Alpi Apuane fanno parte dell'Appennino Settentrionale, una catena a thrust e pieghe sviluppatesi durante l'orogenesi terziaria. Esso è composto dalla sovrapposizione di unità tettoniche derivate dal corrugamento avvenuto da W verso E (ovvero dal Mar Tirreno verso il Mar Adriatico) con delle successioni sedimentarie che si erano depositate nella geosinclinale alpino-appenninica.

Nell'area in esame, oltre alla copertura detritica superficiale, costituita soprattutto dai ravaneti, sono presenti le formazioni litoidi appartenenti alla Serie Toscana Metamorfica (Carmignani, 1985). In particolare l'area d'interesse è caratterizzata principalmente dall'affioramento di marmo tipo "Ordinario" (Lias inf.) e "Venato" (Meccheri et al., 2004). Sul fronte sono presenti anche numerose fratture, penetrative per spessori difficilmente stimabili che superano spesso il metro di profondità, e persistenti per lunghezze variabili da decimetriche a decametriche.

Metodi ed Analisi

Rilievo Laser Scanner

La tecnologia laser scanning consente di rilevare in maniera geometricamente corretta e automatica un oggetto di qualsiasi tipo, complessità o dimensioni, con tempi e quantità di informazioni registrate notevolmente superiore ad ogni altra tipologia di rilievo topografico ad oggi disponibile, restituendo in uscita una rappresentazione dell'oggetto investigato sotto forma di "nuvola di punti" di distanza dall'origine. Nel caso in esame il rilievo LS è stato effettuato tramite strumentazione *Leica*TM *ScanStation 2* (Fig. 2) con una risoluzione pari a 2 cm a 100 metri di distanza dal fronte. È stata sufficiente una sola scansione per rilevare l'intero versante; la nuvola di punti ottenuta è stata georeferenziata nel sistema UTM WGS84 grazie ad un rilievo GPS differenziale effettuato con strumentazione *Leica*TM *GPS System 1200*.



Figura 2 – Fasi del rilievo Laser Scanning.

Rilievo Fotogrammetrico

La strumentazione di ripresa fotogrammetrica utilizzata per il rilievo è composta da un pallone aerostatico in poliuretano alimentato ad elio, in grado di sollevare un supporto in alluminio il quale ospita due macchine fotografiche digitali Reflex Nikon D80 che eseguono scatti contemporanei con una base di presa pari a 5 metri (Fig.3).



Figura 3 – Supporto in alluminio che ospita le due macchine fotografiche digitali Reflex Nikon D80 e pallone aerostatico ad elio in volo.

L'intero fronte è stato acquisito mediante strisciate verticali dall'alto verso il basso, con il pallone stabile in quota e la strumentazione che scende grazie a carrucole e verricelli elettrici.

Questo ha permesso di avere una visione completa dell'intero versante andando a coprire anche le parti alte del fronte dove la nuvola di punti proveniente dal rilievo laser inevitabilmente presenta zone d'ombra a causa del dislivello spesso superiore ai 150 metri.

Analisi dei dati

Dalla nuvola di punti proveniente dal LS e integrata con informazioni geometriche ricavate dal rilievo fotogrammetrico orientato (Ackermann F. 1983) e successivamente stereorestituito in ambiente *ERDAS™ Leica Photogrammetry Suite*, è stata possibile l'estrazione delle giaciture dei piani di discontinuità (Slob et al., 2002), effettuata interamente con il software *LEICA™ Cyclone 6.0* mediante una procedura semi-automatica: una volta individuato un piano di discontinuità sulla nuvola, sono stati manualmente selezionati i punti maggiormente rappresentativi del piano stesso ed è stata attivata la procedura automatica che ha consentito di ricavarne la giacitura. Sono stati individuati in totale 2859 piani di discontinuità le cui giaciture sono state statisticamente analizzate al fine di ottenere le famiglie di fratturazione (Tab 1).

Famiglia	Immersione	Inclinazione
K1	128	56
K2	103	verticale
K3	63	verticale
K4	8	verticale

Tabella 1 – Giaciture dei principali sistemi di fratturazione individuati dalla nuvola di punti rappresentante il versante in studio.

Questa procedura è stata successivamente validata confrontando tali dati con quelli ottenuti dal rilievo geomeccanico; il risultato ottenuto è stato molto buono con uno scarto massimo di 7 gradi per i sistemi K1, K2 e K4. Leggermente più alto invece si è presentato lo scarto per il sistema K3 probabilmente a causa di una variazione dell'andamento dell'attitudine del sistema nella parte più alta del fronte, impossibile da verificare dal rilievo geomeccanico senza attrezzatura alpinistica. Al fine di procedere con l'esecuzione di un'analisi di stabilità cinematica è stato necessario definire l'orientazione dei versanti di riferimento; l'intero fronte di cava è stato quindi scomposto in 4 sub-fronti (Fig.4) di estensione planimetrica minore, immersione omogenea ed inclinazione sub-verticale seguendo l'approccio il più possibile cautelativo.

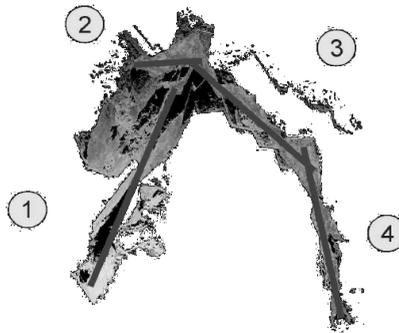


Figura 4 – Suddivisione del versante di cava in 4 fronti di estensione minore.

L'analisi cinematica ha permesso di verificare le direzioni di immersione più soggette ai fenomeni di scivolamento planare, su cuneo e di ribaltamento. Su di esse sono stati costruiti, a partire dalla nuvola di punti, 14 profili lungo i quali è stata effettuata l'analisi di stabilità dinamica con la tecnica di modellazione numerica agli elementi distinti tramite il software *ITASCATM Udec 4.0*. Nella Figura 5 è possibile vedere un esempio del Profilo 4 e delle relative discontinuità individuate in precedenza grazie al software *LEICATM Cyclone 6.0*.



Figura 5 – Esempio del Profilo 4 con rappresentate le discontinuità individuate.

Oltre a tali informazioni geometriche sono stati necessari per la modellazione i dati relativi alle caratteristiche fisico-meccaniche delle fratture e del materiale roccia (Tab. 2); queste sono state ottenute dal rilievo geomeccanico e da prove di laboratorio precedentemente effettuate nell'area di studio (Andrei R, Corniani M. 2006).

Roccia intatta		Superfici di discontinuità	
Densità	2700 Kg/m ³	Normal Stiffnes	5.59 GPa/m
Modulo di compressibilità	70 GPa	Shear Stiffnes	0.08 GPa/m
Modulo di taglio	28 GPa	Angolo di attrito	25°
Angolo di resistenza al taglio	37°	Coesione	0.0001 GPa
Coesione	0.025 GPa	Angolo di dilatazione	5°
		Resistenza atrazione	0.00015 GPa

Tabella 2 – Caratteristiche fisico-meccaniche del materiale roccia e delle fratture.

In ultima analisi, grazie all'aiuto delle stereocoppie orientate, prima di procedere con l'analisi dei possibili cedimenti, è stato possibile localizzare e modellare i rinforzi strutturali installati in parete con lavori precedenti. Tutte queste informazioni hanno permesso infine di effettuare l'analisi di stabilità tramite il software di modellazione numerica *ITASCATM Udec 4.0* (Fig. 6).

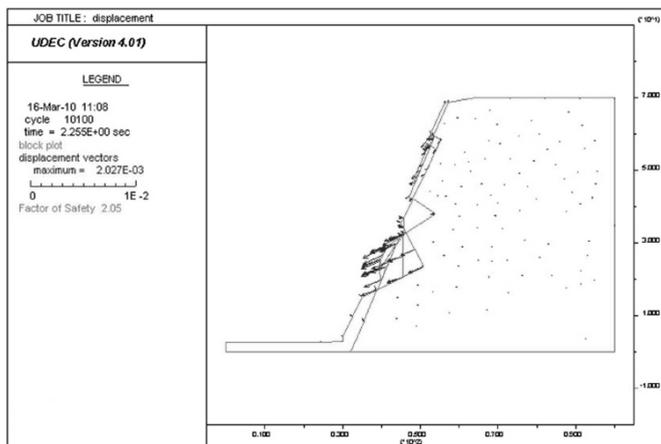


Figura 6 – Grafico degli spostamenti ottenuto dall'analisi di stabilità effettuata con il software di modellazione numerica UDEC 4.0.

Risultati

Dall'analisi delle risultanze e' emerso che l'intero fronte di cava e' attualmente stabile, seppur esistano delle zone di maggiore rischio principalmente riferibili alle porzioni centrali del fronte n°2 (Sezione 8) e del fronte n°3 (Sezione 10). In tali profili sono stati infatti evidenziati spostamenti centimetrici di blocchi che comunque coinvolgono rapidamente fino alla stabilizzazione sul pendio. I presenti risultati descrivono la situazione alla data del rilievo senza tener conto dell'eventuale presenza di acqua sul fronte, relativa ad eventi meteorici, oppure di sisma. La modellazione di queste variabili di analisi e' attualmente in corso.

Le informazioni fin qui ottenute sono comunque gia' state utilizzate dagli organismi competenti per la pianificazione dei futuri interventi di stabilizzazione dei fronti.

In riferimento alle chiodature gia' presenti ed individuate sui fronti, e' da sottolineare come queste concorrano in maniera determinante alla stabilità generale; le prove eseguite hanno infatti rimarcato che diversi pendii risulterebbero instabili in loro assenza, con possibile innesco di fenomeni di scorrimento e ribaltamento dei blocchi.

Conclusioni

Il codice di modellazione numerica ad elementi distinti utilizzato ha permesso l'esecuzione di verifiche di stabilità molto accurate dato che dipendono direttamente dai parametri di input utilizzati. Nella maggior parte dei casi sono proprio questi parametri, provenienti da metodologie di rilievo basate su analisi statistiche del dato, ad essere legati ad una soggettività nelle interpretazioni da parte degli operatori. Proprio per queste ragioni, l'aiuto di innovative tecnologie geomatiche di rilievo, ha permesso di ridurre l'interpretazione del dato passando da un'analisi statistica ad una più deterministica. Infatti, con l'aiuto del laser scanner, è possibile estendere la misura delle giaciture su tutto il fronte e ottenere una mole di dati molto maggiore rispetto ai comuni sistemi di rilievo (Abellan et al., 2006). Per quanto riguarda la FDT con pallone aerostatico, essa ha permesso di coprire le zone d'ombra della nuvola di punti e di riconoscere, attraverso la visione stereoscopica, le opere di stabilizzazione già installate sui fronti rivelatesi fondamentali ai fini della stabilità'.

All'operatore e' rimasto comunque l'obbligo di individuare le problematiche circostanziate ad ogni tipo di approccio e valutarne di conseguenza gli aspetti migliori in modo da ridurre grossolani errori valutativi, in quanto ogni tipo di modellazione numerica "non deve essere utilizzata come una sostituzione del pensiero, ma come un aiuto a pensare" (Eberhardt et al., 2002).

Riferimenti bibliografici

- Abellán A, Vilaplana JM, Martínez J. (2006), "Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain)", *Engineering Geology*. Volume 88, Issues 3-4, Pages 136-148.
- Ackermann F. (1983): High precision digital image correlation. Paper presented at 39th Photogrammetric Week, Institute of Photogrammetry, University of Stuttgart, 231-243.
- Carmignani L. (1985), "Carta geologico strutturale del complesso metamorfico delle Alpi Apuane (Foglio Nord) Scala 1:25.000, LAC – Litografia Artistica Cartografica, Firenze (Italia).
- Andrei R, Corniani M. (2006), "Relazione tecnica sulle condizioni delle superfici di Monte Vergine sovrastante le cave n° 75 Ciresuola A e n° 80 Ciresuola B".
- Eberhardt E, Stead D, Coggan J, Willemborg H. (2002), "An integrated numerical analysis approach applied to the Randa rock slide", 1st European Conference of Landslide, Prague, Czech Republic, pp 355-362.
- Meccheri M, Massa G, Bigoni G. (2004), "Carta giacimentologica dei marmi delle Alpi Apuane", Sez. 249100 Carrara. Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena. San Giovanni Valdarno (AR).
- Slob S., Hack R., Turner A. K., 2002. An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions – Eurock 2002, Funchal, Portogallo.