LASER SCANNER E RILIEVO GEOMECCANICO NELLO STUDIO DELLE CAVE SOTTERRANEE DEL CAGLIERON (TV)

Giordano Teza (*), Antonio Galgaro (*), Rinaldo Genevois (*), Christian De Prà (*), Annapaola Gradizzi (**)

(*): Università di Padova, Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Via Giotto, 1, 35137 Padova, e-mail: {giordano.teza@unipd.it, antonio.galgaro@unipd.it, rinaldo.genevois@unipd.it, christian.depra@virgilio.it}
(**): Geo Solution, Caprino (VR), e-mail: annapaola.gradizzi@libero.it

Riassunto
Il laser scanner terrestre (TLS) permette una dettagliata caratterizzazione della geometria della superficie osservata. Per tale motivo, possono ottenersi buoni risultati nello studio di versanti instabili, con la possibilità di valutare variazioni di volumi e profili, come pure di individuare il campo degli spostamenti. Inoltre, il TLS viene talvolta utilizzato anche nel rilievo geomeccanico. Una campagna di misura con TLS e metodi geomeccanici di tipo tradizionale è stata condotta in una serie di cave sotterranee di epoca medievale nel distretto del Caglieron (Treviso), al fine di:
a) generare un dettagliato modello digitale 3D di ciascuna cava a partire da dati TLS;
b) individuare particolari di interesse geomeccanico (ad esempio, piani di discontinuità, lenti di conglomerato) mediante analisi delle nuvole di punti e/o dei modelli ottenuti da osservazioni TLS;
c) integrare i dati da TLS con quelli forniti dal rilievo geomeccanico di tipo tradizionale, in modo da caratterizzare il materiale e di verificare l'idoneità del TLS stesso in tale tipo di rilievi.
I risultati di questa analisi, completata dalla modellazione numerica, sono stati utilizzati nella progettazione di una serie di interventi per la messa in sicurezza delle cave in questione.

Abstract
The terrestrial laser scanner (TLS) allows the detailed geometric characterization of a surface. For this reason, good results can be obtained in the study of unstable slopes. Variation of profile and volume, as well as the displacement filed, can be evaluated. Moreover, the TLS is used also in the geomechanical survey. A survey with TLS and traditional geomechanical measurements has been performed is in the Caglieron district (Treviso, Italy), to study a series of medieval underground quarries, with three purposes:
a) generation of a detailed 3D digital model of each quarry by using TLS data;
b) recognition of geomechanical features (e.g., discontinuity planes, conglomerate lenses);
c) integration of the TLS data with those obtained with a traditional geomechanical survey, in order to completely characterize the involved materials and to verify the ability of TLS in such a survey.
The results of these analyses, completed by numerical modelling, have been used to design a series of interventions aimed to warrant the safety of these quarries.

Introduzione

Il laser scanner terrestre (TLS) permette l'acquisizione della superficie esterna di un versante instabile con elevate precisione e risoluzione. Alla distanza di 100 m, un tipico strumento a lungo *range* permette di considerare un passo di campionamento dell'ordine dei 2-3 cm e fornisce dati con una precisione sul singolo punto centimetrica o anche subcentimetrica. Ne consegue la possibilità di caratterizzare con grande dettaglio la geometria della superficie osservata e di eseguire analisi quantitative. La disponibilità di dati multitemporali permette la valutazione di variazioni di profilo

(Hunter *et al.*, 2003), di elevazione e volume (Bitelli *et al.*, 2004), o anche il calcolo del campo di spostamenti (Teza *et al*., 2006).
Lo studio delle caratteristiche delle discontinuità è di fondamentale importanza per la valutazione delle condizioni di stabilità di versanti in roccia. Tale studio è normalmente attuato mediante il rilievo geomeccanico classico (Priest, 1993), per il quale è tuttavia necessario il contatto con la superficie indagata, da cui il limite di poter investigare in dettaglio solamente le porzioni di versante accessibili. Grazie a tecniche di telerilevamento terrestre, è possibile estendere l'analisi geomeccanica ad ammassi rocciosi di difficile accesso. In particolare, i rilievi con TLS consentono di valutare l'orientazione dei piani di discontinuità, peraltro con elevato grado di automazione (Slob *et al.*, 2005). Inoltre, un rilievo ravvicinato può consentire l'analisi della rugosità delle superfici di discontinuità (Fardin *et al.*, 2003), come pure di individuare le lenti di conglomerato.
La geometria acquisita con TLS e i dati di tipo geomeccanico possono integrarsi in un modello numerico, grazie al quale alla mera descrizione si affianca la previsione del comportamento del sistema esaminato, importante ai fini della mitigazione del rischio indotto da fenomeni di instabilità.
Le descritte tecniche di rilievo geometrico, geomeccanico e di analisi numerica sono state applicate ad alcune cave sotterranee di epoca medievale, caratterizzate da grande importanza dal punto di vista storico e naturalistico e per le quali è stato definito un piano per il recupero e la messa in sicurezza, al fine di renderne possibile la piena fruibilità da parte del pubblico.

Il distretto minerario del Caglieron

Le "Grotte del Caglieron (Comune di Fregona, Provincia di Treviso, Fig. 1), in realtà cavità artificiali dell'omonimo distretto minerario, si trovano in una profonda forra, incisa dal torrente Caglieron negli strati di conglomerati calcarei di arenarie e di marne del Miocene medio, occupando un'area che collega alla pianura veneta le propaggini meridionali dell'altopiano del Consiglio, appartenente alla fascia prealpina orientale. La forra si sviluppa verso SE perpendicolarmente ai suddetti strati. A causa della presenza di una frazione importante di matrice calcarea delle arenarie, si sono sviluppati lungo la forra fenomeni carsici, fatto testimoniato da un breve percorso naturale sotterraneo del torrente Caglieron.

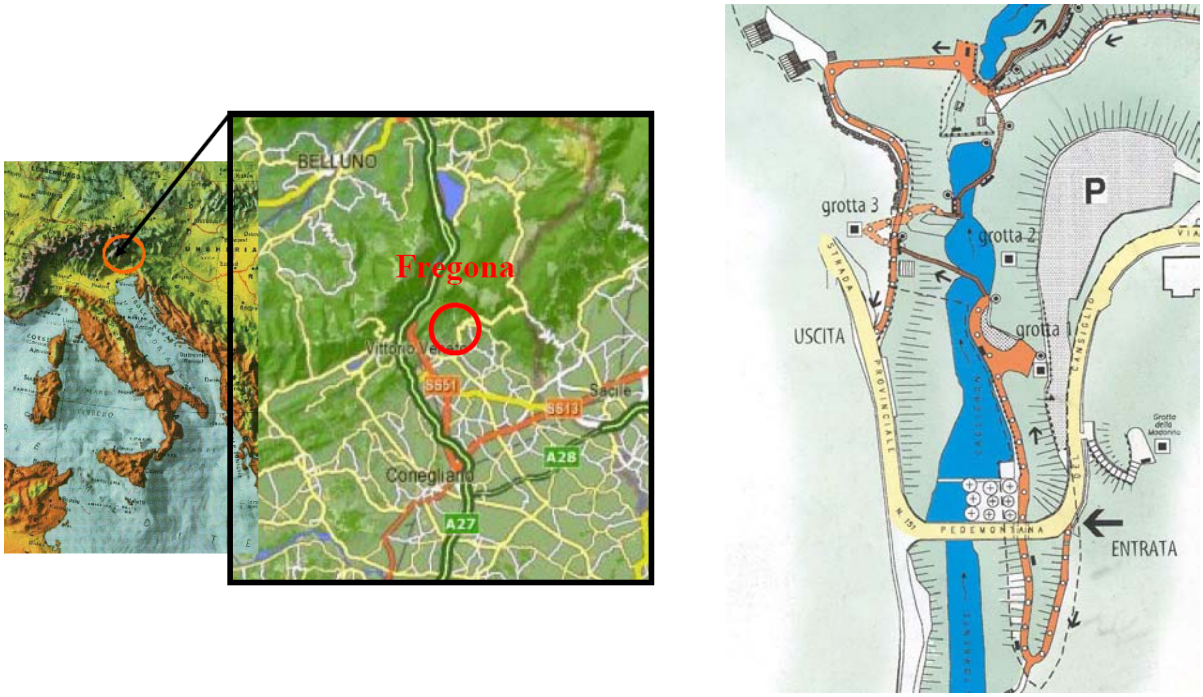

Figura 1 - Localizzazione (destra) e planimetria della parte del distretto minerario del Caglieroni, in cui sono evidenziate le posizioni di alcune cave (dette "grotte").

La peculiarità del sito "Grotte del Caglieron" consiste nel suo straordinario interesse naturalistico ed antropologico. Aspetti, questi, che nella loro fusione determinano un suggestivo paesaggio, interessante dal

punto di vista scientifico e paesaggistico, ed unico dal punto di vista antropologico, etnologico e dell'archeologia industriale. Sulle pareti della forra si aprono infatti delle grandi cavità artificiali ottenute dall'estrazione dei livelli arenaci. L'attività estrattiva, che risale al 1500 e forse anche ad epoche precedenti, forniva il materiale per la costruzione di stipiti, architravi, ecc., come si può ancora osservare sulle vecchie case e palazzi di Vittorio Veneto e dintorni. La coltivazione della pietra nelle gallerie avveniva per taglio di porzioni di roccia, lasciando, a mano a mano che l'avanzamento procedeva, delle colonne a sostegno della volta. La volta è costituita dalla medesima arenaria sfruttata, ma lasciata in posto allo scopo di permettere al soffitto della galleria di permanere in condizioni di stabilità. Infatti le rocce immediatamente sopra alla bancata di arenaria, oggetto di sfruttamento, risultano essere costituite da livelli di conglomerati e marne generalmente teneri e molto inclini all'alterazione ed alla degradazione, e quindi propensi al rapido disfacimento. Lo strato di arenaria costituente la volta è attualmente compreso tra 0.5 ed 1 m, e solo localmente maggiore.
Le cave sono circa 30, di cui 10 di rilevanti dimensioni. Si trovano lungo l'affioramento delle arenarie e lungo la forra, dando all'insieme un aspetto notevolmente suggestivo e interessante turisticamente. Sono previsti lavori di consolidamento, per permetterne l'accessibilità in piena sicurezza, a 6 delle cave maggiori.

Rilievo con laser scanner e modellazione geometrica

Il rilievo con laser scanner è stato eseguito con due diversi strumenti: Optech ILRIS 3D (completo di base rotante/basculante per l'acquisizione su 360°) e Leica HDS 3000, le cui caratteristiche tecniche principali sono riportate in Tabella 1 (si veda anche POB, 2006). Entrambi gli strumenti possono acquisire nuvole di punti su 360°, fattore di grande importanza nel rilievo di un ambiente chiuso o che comunque circonda l'osservatore. In particolare, l'ILRIS 3D è stato utilizzato nel rilievo di due cave, l'HDS 3000 in tutte le altre. Per rilevare ciascuna cava è stato necessario considerare vari punti di vista, le cui nuvole di punti sono state registrate su di un sistema di riferimento comune mediante algoritmi di *surface matching* iterativo implementati nei software di processamento dei dati (Innovmetric PolyWorks 9 e Leica Ciclone 5.0, il secondo solo per i dati Leica; si veda POB, 2006). La distanza di acquisizione era generalmente compresa tra i 5 e i 30 m, tranne che nel caso delle viste panoramiche esterne, e il passo di campionamento mediamente 2 cm. In figura 2 è presentato un esempio di nuvola di punti completa di informazione sul colore. Il passo di campionamento, coerente con la risoluzione reale degli strumenti (Lichti, 2004), ha consentito di produrre una grande mole di dati, eccessiva ai fini della modellazione geometrica, ma importante ai fini di individuare le tracce di piani di discontinuità o di riconoscere eventuali differenti strati di materiale.

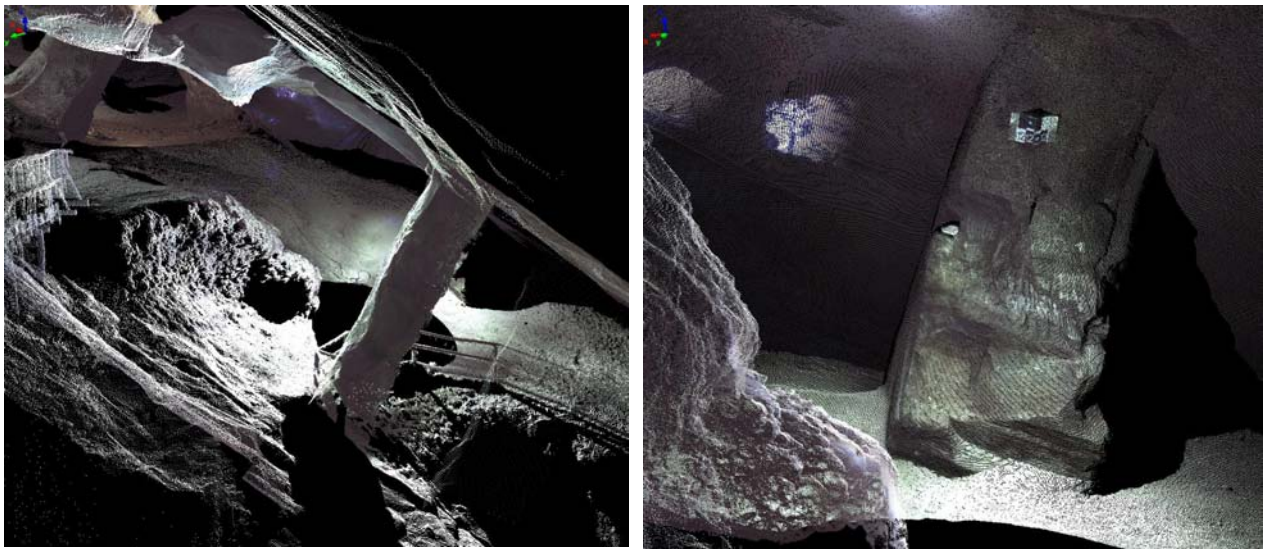

Figura 2. Nuvola di punti relativa alla grotta 3. Sinistra: ingresso. Destra: particolare di una colonna. Si noti il target artificiale posato a fini di georeferenziazione.

Il processamento dei dati, come d'uso, si è articolato in varie fasi, dalla registrazione e georeferenziazione delle scansioni alla generazione di un modello digitale 3D per ciascuna delle cave. L'obiettivo della modellazione geometrica è duplice: da un lato, offrire una geometria di riferimento per la successiva modellazione numerica; dall'altro, fornire modelli da inquadrare in un sistema di navigazione virtuale al fine di promuovere in internet la visita al sistema di cave del Caglieron. In ogni caso, un passo di 2 cm deve ritenersi eccessivo ai fini della modellazione geometrica, da cui un ricampionamento delle nuvole a 5 cm. Le tracce dei piani di discontinuità, individuate anche grazie al passo molto stretto, sono poi state considerate come dei vincoli nella generazione dei modelli, in modo da non perdere o compromettere tale importante informazione. La georeferenziazione ha richiesto la posa di target ad alta riflettività all'interno di ciascuna cava, acquisiti mediante stazione totale al fine di istituire una rete topografica di appoggio.
Riguardo al comportamento degli strumenti, il Leica HDS 3000, strumento specializzato nel rilievo architettonico e caratterizzato da migliori precisione e risoluzione , è risultato essere nettamente più adatto dell'altro in questo tipo di osservazioni. Pur con le limitazioni emerse in questo tipo di rilevo, l'ILRIS 3D deve comunque considerarsi un buon strumento, destinato all'osservazione di versanti distanti anche svariate centinaia di metri dal punto di osservazione. Ciò è testimoniato dal fatto che l'osservazione di un soggetto difficile quale il Vesuvio, caratterizzato da materiale lavico a bassa riflettanza, ha fornito ottimi risultati pur con distanze di acquisizione di 500-600 m (Pesci, 2006).

Tabella 1. Caratteristiche principali degli strumenti utilizzati.

Parametro	**Unità**	**Optech ILRIS-3D**	**Leica HDS3000**
Lunghezza d'onda	nm	1535 (infrared)	532 (visible)
Classe di protezione del laser		1 (eyesafe)	3R
Portata (bersagli con riflettanza del 10%)	m	700	134
Divergenza del fascio laser	mrad	0.17	0.12
Risoluzione effettiva alla distanza di 50 m	mm	17.7†	5.2†
Precisione sull'acquisizione del singolo punto a 50 m	mm	7	4
Precisione del modello a 50 m	mm	3	2
Passo di scansione minimo a 50 m	mm	1.3	0.5
Velocità di scansione	pts/s	2000 (fissa)	1800 (massima)

†: da Licthi (2004). Tutti gli altri dati sono dichiarati dai costruttori (si veda anche POB, 2006)

Rilievo geomeccanico

Il rilievo geomeccanico classico è stato eseguito con martello di Schmidt (da cui dati sulla resistenza a compressione), bussola, pettine di Barton (identificazione della rugosità di fratture e superfici di strato), nonché prelievo di campioni, successivamente analizzati in laboratorio con macchina *point-loud* al fine di individuare resistenze al taglio e alla trazione, angolo di attrito e coesione. Tale rilievo ha permesso l'individuazione delle situazioni di instabilità e rischio più gravose.
La sequenza di conglomerati e arenarie presentano qualità geomeccaniche da mediocri a buone; la variabilità dipende dal litotipo, dalla presenza di stratificazioni e livelli poco cementati o sabbioso-argillosi intercalati ai conglomerati, che generalmente risultano compatti. La fratturazione e le superfici di strato di regola sono chiuse, più raramente debolmente aperte e beanti. Le superfici di stratificazione presentano rugosità prevalentemente ondulata scabra. Sono presenti fratture nell'ammasso roccioso, tuttavia a persistenza va da bassa (2 - 5 m) a molto bassa (5 - 10 m).
La permeabilità della roccia è legata alle superfici di stratificazione beanti e alla sua fratturazione. Le caratteristiche della circolazione idrica sotterranea sono di complessa valutazione, ma certamente seguono direzione e inclinazione delle superfici di stratificazione oltre ad una non trascurabile attività carsogenetica. Il grado di filtrazione rilevato risulta II e III.
La roccia considerata globalmente come ammasso roccioso possiede discrete proprietà geomeccaniche, tanto da dare origine a pareti sub-verticali ed a mantenere in equilibrio statico le volte delle cavità naturali ed artificiali. Il volume unitario (VMU) può essere assunto compreso tra

0.5 e 2 m^3, con peso di volume 2.4 t/m^3. La roccia può essere considerata resistente, con valori di resistenza a compressione monoassiale semplice stimati tra 25 e 50 MPa.

Un esempio di modellazione numerica: studio della stabilità di una sezione di cava

L'analisi condotta ha lo scopo di fornire dati utili ai fini della progettazione di opere per la messa in sicurezza delle cave del Distretto del Caglieron, e quindi garantirne la fruibilità al pubblico . Per tale motivo, i dati acquisiti con TLS e rilievo geomeccanico tradizionale sono stati direttamente utilizzati nella modellazione numerica. La modellazione numerica di una massa di roccia ne permette infatti una caratterizzazione completa, non limitata agli aspetti geometrici o cinematici, ma estesa a quelli dinamici. L'uso di uno schema agli elementi distinti (DEM), in ambiente 2D o 3D, è particolarmente adatto alla modellazione di masse di materiale caratterizzate dalla presenza di discontinuità marcate (Brideau *et al.*, 2006).

Si presentano qui i risultati salienti conseguiti nell'analisi di una sezione della "grotta 1" (fig. 3).

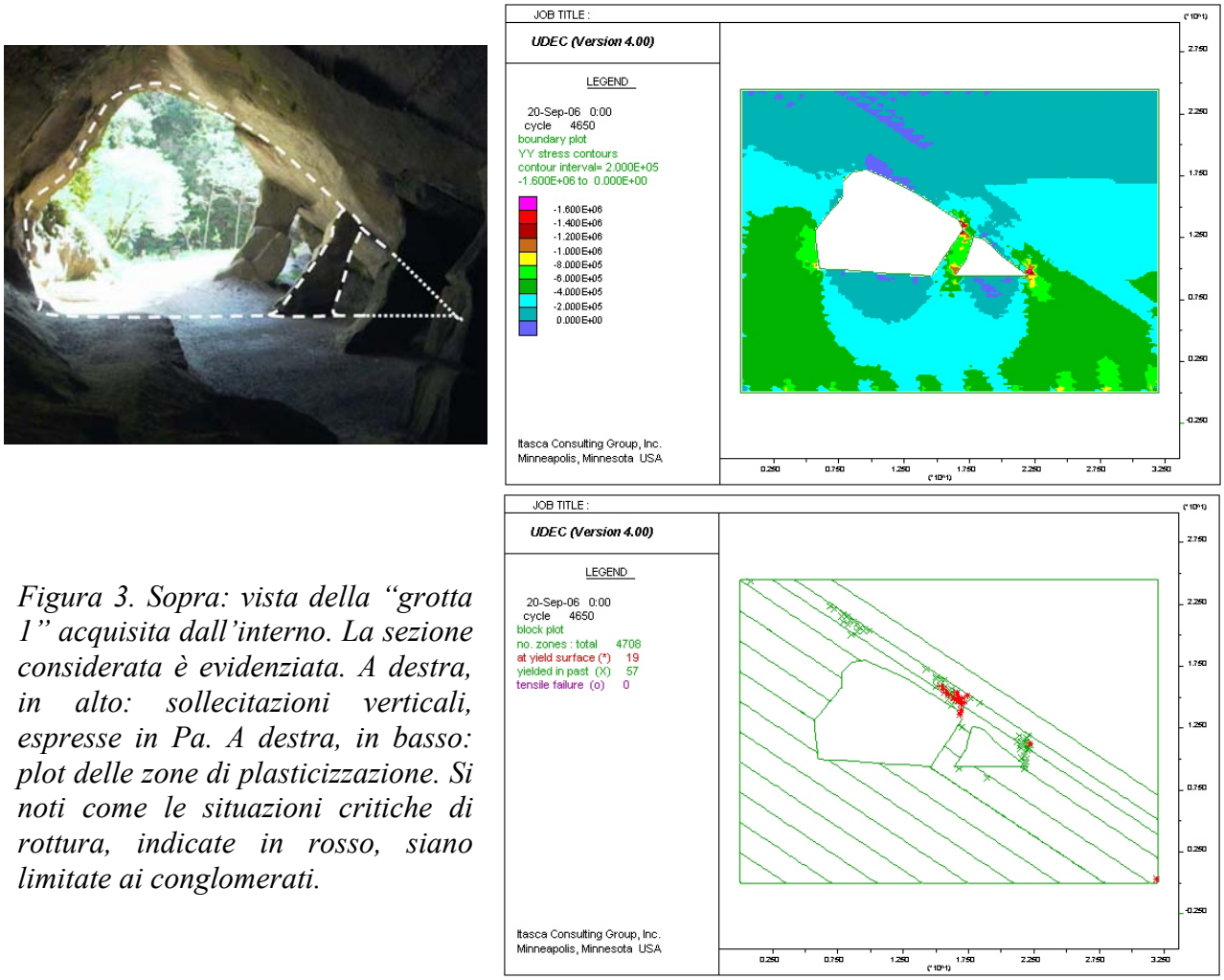

Figura 3. Sopra: vista della "grotta 1" acquisita dall'interno. La sezione considerata è evidenziata. A destra, in alto: sollecitazioni verticali, espresse in Pa. A destra, in basso: plot delle zone di plasticizzazione. Si noti come le situazioni critiche di rottura, indicate in rosso, siano limitate ai conglomerati.

La modellazione numerica 2D della sezione è stata attuata utilizzando il software Itasca Udec 4.0. Il bordo superiore del modello è orizzontale e coincide con il piano di un parcheggio. L'analisi del plot delle zone di plasticizzazione evidenzia che le situazioni critiche di rottura si trovano in corrispondenza ai conglomerati; lo spostamento massimo è contenuto in 1 mm. Dai risultati si trae che la chiodatura sistematica della volta, che avrebbe un evidente impatto ambientale, non è necessaria. La messa in sicurezza della cava (relativamente alla sezione considerata) può invece ottenersi mediante chiodatura limitata alle zone di conglomerato. Lo studio ha dunque prodotto indicazioni immediatamente utilizzate nell'attività di progettazione delle opere di risanamento.

Conclusioni

Il lavoro condotto nel distretto minerario medievale del Caglieron ha evidenziato le potenzialità del TLS nel rilievo non solo geometrico, ma anche geomeccanico, in integrazione con tecniche di tipo tradizionale. Grazie al TLS è stato infatti possibile caratterizzare la geometria delle varie cave sotterranee costituenti il complesso, da cui modelli 3D molto dettagliati. Inoltre, l'analisi delle nuvole di punti ha permesso di ottenere dati utili riguardo ai piani di discontinuità, come pure sulla presenza di differenti materiali sulle pareti e sulle volte delle "grotte". Il TLS, ovviamente, non si sostituisce alle tecniche tradizionali del rilievo geomeccanico, assolutamente necessarie per una completa caratterizzazione delle caratteristiche dei materiali, ma le integra efficacemente consentendo di estendere l'analisi a superfici di difficile o pericoloso accesso.
La modellazione numerica agli elementi distinti, attuata considerando i modelli geometrici ottenuti con TLS e i dati di tipo geomeccanico, ha permesso di studiare la stabilità delle cave sotterranee, da cui utili indicazioni, prontamente utilizzate, per i progettisti degli interventi di risanamento e messa in sicurezza delle cave stesse.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la dott. Maria Concetta Armento per il supporto nella modellazione numerica e il sig. Stefano Castelli per il rilievo in campagna con il laser scanner.

Bibliografia

Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004), "Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies", in *Proceedings of XX ISPRS Congress*, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey, O. Altan (Ed.): 246-251.
Brideau M.-A., Stead D., Couture R. (2006), "Structural and engineering geology of the East Gate Landslide, Purcell Mountains, British Columbia, Canada", *Engineering Geology*, 84 (3-4): 183-206.
Fardin, N., Feng, Q., Stephansson, O., (2003), "Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (2): 329-335.
Hunter G., Pinkerton H., Airey R., Calvari S. (2003), "The application of a long-range laser scanner for monitoring volcanic activity on Mount Etna", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123: 203-210.
Lichti D.D. (2004), "A resolution measure for terrestrial laser scanners", in *Proceedings of XX ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004, Commission V, O. Altan (Ed.): 216-221.
Pesci A., Loddo F., Conforti D. (2006), "The first terrestrial laser scanner application over Vesuvius (Napoli, Italy): the high resolution model of volcano crater", *International Journal of Remote Sensing* (accettato per la pubblicazione, manoscritto ID TRES-PAP-2005-0260).
POB (2006), "Laser scanner hardware and software survey 2006". Disponibile online al'indirizzo: http://files.bnpmedia.com/POB/2006/05/Files/PDFs/POB0506-LaserScanningSurvey.pdf (ultimo accesso: 10.09.2006).
Priest S.D. (1993), *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall, London, 473 pp.
Slob S., van Knapen B., Hack R, Turner K., Kemeny J. (2005), "A method for automated discontinuity analysis of rock slopes with 3D laser scanning". *Transportation research record*, 1913 (1): 187-208.
Teza G., Galgaro A., Zaltron N., Genevois, R. (2006), "Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach", *International Journal of Remote Sensing* (accettato per la pubblicazione, manoscritto ID TRES-PAP-2006-0131).