Fotogrammetria digitale terrestre e laser scanner per lo studio della stabilità dei fronti nelle cave di Marmo di Carrara

Riccardo SALVINI, Marco ANSELMI & Pier Lorenzo FANTOZZI

Centro di GeoTecnologie - Università di Siena, Via Vetri Vecchi 34, 52027 S. Giovanni Valdarno (AR), tel.+39 055 9119441, *fax.* +39 055 944119, *e-mail*: salvinir@unisi.it, www.geotecnologie.unisi.it

Riassunto

Gli agri marmiferi di Carrara, nelle Alpi Apuane, rappresentano il più grande e sfruttato bacino d'Europa. L'intensità della fratturazione dei fronti di scavo in queste zone costituisce un elemento fondamentale ai fini estrattivi e sopratutto nell'analisi della stabilità per la sicurezza in cava. La frequente inaccessibilità delle pareti di scavo non consente però una misura diretta delle superfici di discontinuità tramite le tradizionali metodologie geologiche.

La fotogrammetria digitale terrestre è una tecnica che può essere utilizzata per effettuare un rilevamento di dettaglio anche su superfici inaccessibili e per questo utile per lo studio della stabilità delle pareti marmifere. Tuttavia, in tutto il bacino marmifero carrarese, le tradizionali tecniche di fotogrammetria terrestre, che prevedono prese pseudo-normali, non possono essere utilizzate a causa dell'elevata estensione verticale dei fronti di escavazione (fino ad alcune centinaia di metri) e, d'altro canto, non possono essere utilizzati elevatori meccanici di grandi dimensioni a causa dell'inaccessibilità delle cave stesse. Tale problematica è stata superata in questo lavoro alloggiando l'attrezzatura per la ripresa fotografica digitale su un pallone aerostatico che consente una copertura completa dell'intero fronte di scavo mediante strisciate di sviluppo verticale. L'analisi fotogrammetrica è stata integrata con dati provenienti da rilievi laser scanner, effettuati sperimentalmente, per verificare la validità di questo strumento in applicazioni geologiche mirate non solamente agli aspetti topografici, ma soprattutto, ad una modellazione strutturale comprendente anche un importante fattore interpretativo.

L'orientamento esterno del blocco fotogrammetrico ha permesso la stereorestituzione digitale delle superfici di discontinuità delle quali, mediante analisi tridimensionale, sono state calcolate le giaciture necessarie per lo studio della stabilità dell'ammasso roccioso. E' stato costruito un *geodatabase* contenente le fratture ed i relativi cunei di roccia, per i quali sono stati calcolati, con software di modellazione 3D, il volume e il centro di massa ed analizzate le condizioni di stabilità.

Abstract

The Carrara Marble District (Apuan Alps) is one of the widest and more exploited in Europe. The study of jointing in rock slopes represents in such areas a fundamental topic both in site exploitation and in the evaluation of stability in quarry activities. Frequently, the hard accessibility of the walls of excavations does not allow direct measurements of discontinuities through the traditional geological methods. The digital terrestrial photogrammetry is a technique that can be used for a detailed survey especially in hardly accessible sites; it can be uses as data source for studying the rocky slope stability in marble quarries. Nevertheless, for the whole Carrara Marble District, the traditional terrestrial photogrammetry can be restrictedly utilised because of the high vertical extension of the excavation fronts. Otherwise, the use of either appropriate mechanical arms or lifts cannot be adopted due to their size in respect of the accessibility to the quarries. Such a limitation has been avoided by installing the necessary equipment for the photo acquisition on an aerostatic balloon; such a vector must be placed in front of the slope with the possibility of being moved in any direction; by means of a remote control the whole surface can be covered by a real

photogrammetric block. The stereoscopic model can be created by utilising GCPs well distributed inside the slope, which must be measured through topographic total stations. The extraction of all the discontinuities has been obtained by means of the exterior orientation of the stereo pairs. Spatial 3D analyses have been used to calculate the joints strike and dip in respect to the geographic north; such measures represent input data for the kinematics study of rock slope stability. The geodatabase of joints and wedges was built and 3D modelling software permitted to calculate volume, centre of mass and stability conditions of each rock.

Introduzione

Il gruppo di ricerca al quale gli Autori afferiscono, da anni svolge studi geologici di base ed applicati nei distretti estrattivi delle Alpi Apuane, con particolare riferimento al Bacino Marmifero di Carrara, ove le attività estrattive del settore lapideo costituiscono la principale risorsa economica (Carmignani, 1985; Meccheri, 1996; Guastaldi et al., 2004). Negli ultimi anni, in collaborazione con la ASL n°1 di Massa e Carrara, responsabile dell'attività di controllo della sicurezza dei luoghi di lavoro, è stata svolta una ricerca applicata alle discontinuità meccaniche (giunti e fratture) quali possibile origine di fenomeni di instabilità gravitativa in pareti rocciose naturali ed artificiali. I fronti di cava, sub-verticali e talvolta aggettanti per oltre cento metri di altezza, sono solo in parte di origine naturale: gran parte della loro estensione verticale è stata causata dagli sbassi delle coltivazioni marmifere. I fronti sono inoltre caratterizzati dalla presenza di numerosi sistemi di fratturazione, la cui intersezione con la superficie del versante genera cunei di roccia ed altre forme instabili, di dimensioni variabili dal decimetro al decametro. L'interesse giacimentologico dell'area richiede quindi un approfondimento delle conoscenze sulla presenza e sullo stato di stabilità dei cunei di roccia al fine di proseguire in condizioni di sicurezza l'attività estrattiva. A tal fine, un metodo di indagine preliminare di grande dettaglio, in grado di indirizzare adeguatamente i successivi rilievi geomeccanici e le eventuali opere di messa in sicurezza, è la fotogrammetria digitale terrestre (Poropat, 2003; Lemy & Hadjigeorgiou, 2003), la quale:

- consente una visione dettagliata, a diversi ingrandimenti e da differenti punti di vista, di aree raggiungibili direttamente solo con grande difficoltà (e rischio) tramite "calate";
- consente di rilevare e misurare gli elementi geomeccanici e facilita enormemente la loro archiviazione in banche dati;
- permette di fare misure precise di superfici e di volumi in ogni punto della parete;
- consente una discussione tra gli addetti ai lavori anche di diversa estrazione culturale (geologi, ingegneri, ecc.), attraverso un facile esame congiunto del modello stereoscopico tridimensionale.

Area di studio

In questo lavoro vengono descritte le metodologie di analisi ed i risultati del rilevo effettuato nella Cava Lorano (Tecchia Pradetto) sita nel Bacino Marmifero di Torano 2 (Figura 1). La tecchia è sviluppata in direzione NW-SE per oltre 120 metri e si eleva con un fronte sub-verticale e talvolta aggettante di

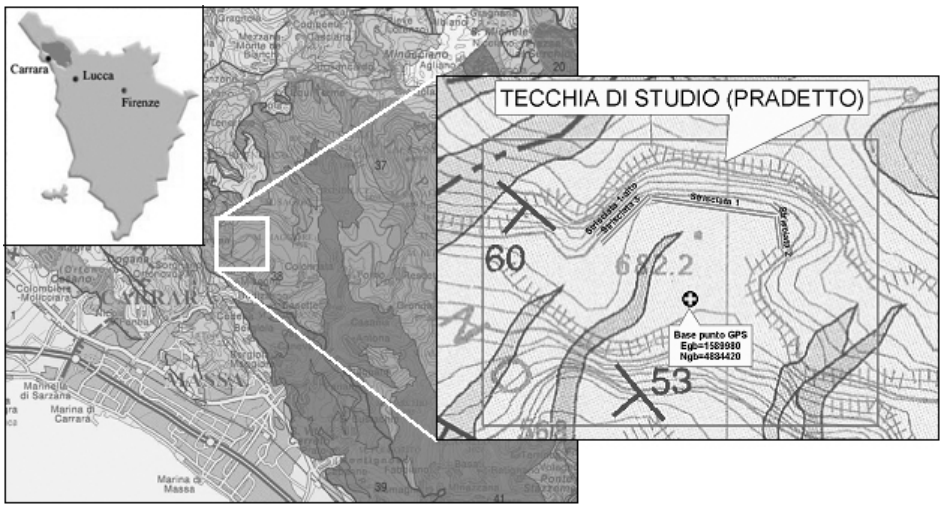

Figura 1 – Inquadramento geografico dell'area di studio

oltre 100 metri di altezza rispetto all'antistante piazzale di cava di quota 682.2, posto a sud della parete (Figura 1). L'area è caratterizzata dall'affioramento di marmi tipo Ordinario (MM1) a grana da fine a medio grossa, di colore bianco perlaceo, talvolta cosparsi da piccole macchie e vene grigie (Meccheri, 1996). Il fronte è caratterizzato dalla presenza di numerosi sistemi di fratturazione, di continuità in affioramento da decimetrica a metrica, la cui intersezione con la superficie del versante genera cunei di roccia ed altre forme instabili che, in passato, hanno indotto i conduttori della cava ad intraprendere misure per la messa in sicurezza della tecchia mediante chiodi, tiranti ed opere di disgaggio.

Metodologie di analisi

Il rilievo fotogrammetrico delle superfici di discontinuità, dei blocchi e l'analisi della tipologia di movimento hanno l'obiettivo di fornire i parametri geometrici funzionali alla determinazione dei problemi di stabilità da affrontare in fase di presentazione del Piano di Coltivazione secondo le vigenti normative.

1. Presa Fotogrammetrica

La strumentazione di ripresa fotogrammetrica consta di un pallone aerostatico in PVC (Figura 2), alimentato ad elio, in grado di sollevare 2 fotocamere digitali Nikon™ Coolpix 5000 che eseguono scatti contemporanei con una base di presa pari a 1,5 metri. L'intero fronte viene fotografato mediante strisciate di sviluppo verticale. Il vettore ha una capacità di 48 m^3 ed una portanza di circa 20 Kg. Il pallone è frenato da terra mediante tiranti, collegati a basi mobili in calcestruzzo, che ne controllano l'altezza e l'assetto. Un telaio in alluminio, portante le 2 fotocamere digitali ed il sistema di scatto a distanza, è spostabile ad altezze differenti rispetto al fronte mediante un sistema di carrucole che lo raccordano a due barre in alluminio poste rispettivamente sotto al pallone ed a terra; quest'ultima barra serve per controllare la deriva del sistema ed imporre la direzione di scatto.

Figura 2 – Pallone aerostatico a lavoro presso la Cava Lorano

2. Orientamento e Triangolazione

L'orientamento dei fotogrammi è stato effettuato con il modulo *LPS* del software ERDAS™ IMAGINE 8.7. Per risolvere le equazioni d'orientamento assoluto dei fotogrammi, nella ricostruzione dei modelli stereoscopici, sono state utilizzate le coordinate di punti notevoli riconoscibili sulle foto. Nel caso di una parete di cava la rappresentazione cartografica convenzionale è molto limitata, in quanto questi fronti sono rappresentati da linee simboliche come scarpate, linee di cresta o dirupi, anche in caso di basi topografiche dettagliate. Per ovviare all'assenza d'informazioni, è stato modificato il piano di rappresentazione cartografica da orizzontale, come nella cartografia convenzionale, a verticale. E' stato quindi effettuato un rilievo topografico di dettaglio collimando *marker* naturali ed artificiali con una Stazione Totale Laser Leica™ TPS1200. Sono stati utilizzati 84 GCP per l'orientamento assoluto dei fotogrammi relativi alle 5 strisciate fotografiche effettuate nella Tecchia Pradetto. La procedura di triangolazione ha consentito di orientare tutti i fotogrammi e di valutare l'RMSE di ogni singola strisciata (N.B. non è stato ricostruito l'intero blocco fotogrammetrico perchè il fronte di cava prevede tecchie tra loro ortogonali – Figura 1); l'RMSE risultante è compreso tra 0.8 e 2.1 pixel, corrispondenti a circa 5-10 cm sul fronte.

3. Rilevamento del fronte di cava con laser scanner

La tecnologia di scansione del laser utilizzato (Riegl™ Z420i) prevede la rotazione di uno specchio che dirige il fascio laser secondo un angolo esatto di ampiezza nota. La risoluzione spaziale selezionata al fronte è di 5 cm, in modo da restituire una maglia di informazioni densa ma comunque gestibile nei sistemi adottati. I dati ottenuti dal rilievo sono stati gestiti in separati file per le diverse tecchie ognuno contenente le distanze dei punti misurati dalla stazione di osservazione e la terna di coordinate riferite al sistema locale adottato.

4. Fotointerpretazione delle fratture che delimitano cunei di roccia suscettibili di movimento

L'analisi stereoscopica ha portato all'individuazione dei cosiddetti "cunei liberi", vale a dire possibili di cedimento in base all'orientazione dei piani che li limitano ed alla loro relazione con la superficie libera, cioè il versante. Nella tecchia in esame, la struttura geomeccanica dell'ammasso prevede principalmente mobilità dei blocchi per ribaltamento, in corrispondenza delle superfici di discontinuità circa parallele al versante, e per scivolamento lungo 1, 2 o più superfici di discontinuità. La stereorestituzione delle superfici di fratturazione è stata effettuata tramite il modulo *StereoAnalyst* di ERDAS™ IMAGINE 8.7; le superfici che caratterizzano i diedri di fatturazione sono state materializzate per mezzo di triangoli complanari con le discontinuità, in modo da ottenere dei piani la cui attitudine geometrica (direzione di immersione ed inclinazione) identifichi al meglio la giacitura delle fratture in esame (Figura 3).

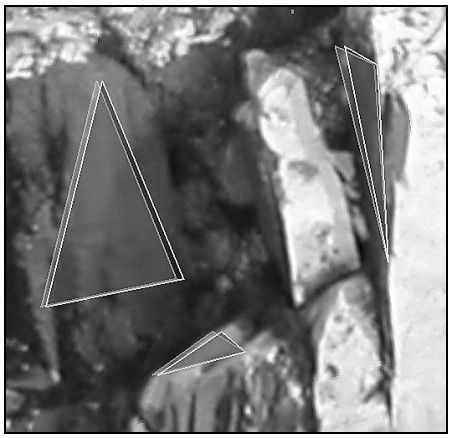

Figura 3 – Cuneo di roccia instabile per scivolamento identificato da un sistema di fratture restituite mediante triangoli

Successivamente, per ogni superficie di fratturazione è stato costruito un *DSM* (*Digital Surface Model*), formato TIN, il quale, analizzato tramite le funzioni *Aspect* e *Slope* del software Esri™ ArcMap, ha consentito di ricavare rispettivamente i dati di direzione di immersione rispetto al nord e di inclinazione rispetto al piano orizzontale. Questa procedura è stata validata attraverso il confronto della giacitura tra superfici di fratturazione accessibili, misurate in situ, e le stesse fotorestituite; il confronto ha mostrato una buona congruenza fra le due serie di dati con un *range* di variazione medio pari a ± 5° considerato tollerabile rispetto agli standard di misura geologica.

La restituzione ha compreso, per ogni singolo blocco mobile, il calcolo della giacitura locale del versante, utile nei successivi calcoli di stabilità dell'ammasso e la realizzazione del *DSM* necessario alla ricostruzione geometrica dell'elemento insieme al rilievo laser scanner.

Dal *DSM* dell'intero fronte di cava, estratto tramite l'autocorrelazione delle immagini nel modulo *LPS* ed opportunamente editato in *StereoAnalyst*, sono state create le ortofoto delle singole immagini con dimensioni di cella centimetriche. La giustapposizione o la mosaicatura delle ortofoto permette una visione integrale e georeferenziata dell'intero fronte di cava, utile soprattutto per la presentazione degli elaborati alla committenza. Sulle ortofoto possono essere visualizzati i cunei di roccia identificati e, attraverso uno strumento di consultazione, è possibile interrogare il *Geodatabase*.

5. Calcolo volumetrico dei cunei fotointrepretati

A partire dalle superfici che delimitano i blocchi mobili e dal loro *DSM*, la geometria di ogni singolo blocco è stata calcolata con il software Rhinoceros™ SR3 attraverso due passaggi:

- estensione delle superfici che delimitano il blocco mobile e determinazione della loro intersezione per determinare la forma del cuneo anche nel lato "verso monte"; quest'operazione ha consentito di determinare anche il tipo e la direzione di possibile movimento;
- intersezione tra le superfici di frattura e la "superficie libera" per determinare il volume, il centroide ed il peso di ogni singolo blocco mobile.

La Figura 4 mostra i principali parametri geometrici calcolati per il blocco di Figura 3.

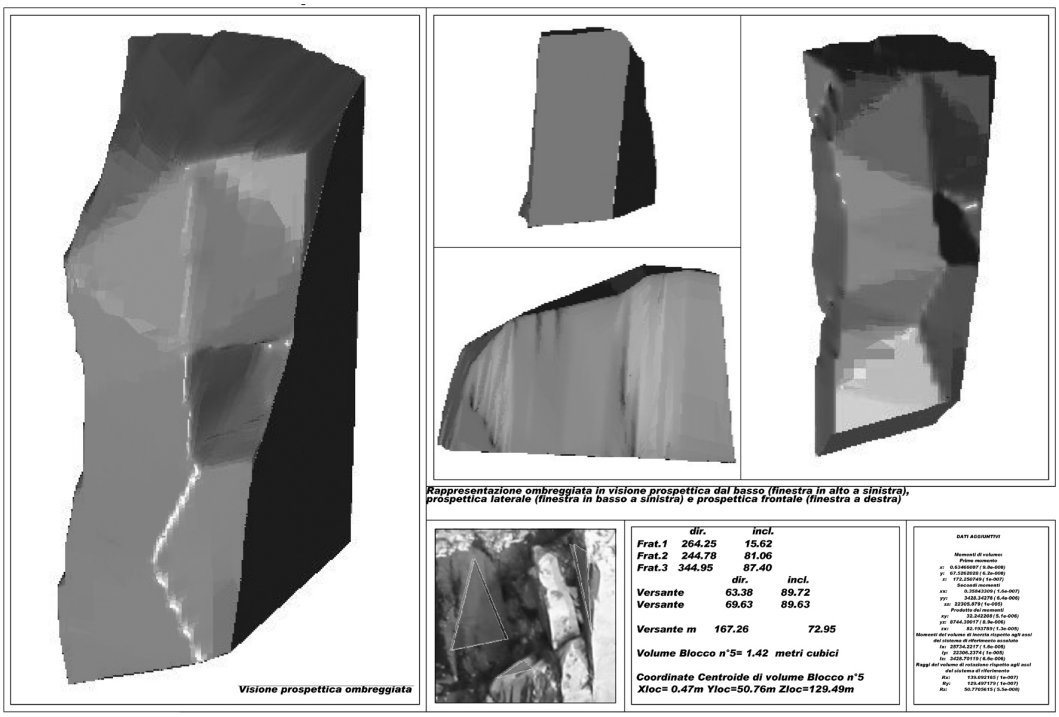

Figura 4 – Scheda relativa al blocco di Figura 3

Il successivo studio della stabilità è stato condotto in "modalità cinematica" considerando la geometria del moto dei corpi e non le forze che ne determinano il movimento ("analisi dinamica"). Le modalità di cedimento degli ammassi rocciosi, proprio perché avvengono esclusivamente lungo i piani di debolezza, sono fortemente direzionali, cioè strettamente controllati dalla struttura dell'ammasso. Le condizioni di cedimento individuate dalla sola analisi cinematica possono quindi restare latenti finché non variano le forze in gioco (pressioni neutre, forze sismiche, altri carichi dinamici, ecc.). L'analisi cinematica della stabilità, effettuata mediante proiezioni stereografiche, prevede la conoscenza delle giaciture delle discontinuità, della giacitura del versante (entrambe ricavabili dalla fotogrammetria digitale terrestre) e della resistenza al taglio superficiale f . Considerata l'onerosità delle prove in sito e la difficoltà di ottenere buoni campioni per *tilt test* oppure prove di taglio diretto di laboratorio, nel presente lavoro sono stati utilizzati valori dell'angolo di attrito presenti in letteratura. E' stato scelto un intervallo di valori di f con un limite minimo e massimo rispettivamente di 33° e 40°, valido per rocce calcaree con superfici di discontinuità non alterate e prive di asperità (Barton, 1973).

Risultati e conclusioni

Il lavoro descritto ha permesso di identificare 26 blocchi mobili posti a diverse altezze sopra il piazzale di cava (altezza variabile da 36 a 96 metri di quota). Per ogni blocco sono stati definiti volume e baricentro e, attraverso l'analisi dei piani che lo caratterizzano, sono state elaborate delle proiezioni stereografiche che aiutino nella comprensione dei meccanismi di instabilità.

E' importante sottolineare la flessibilità e la possibilità di implementazione dei dati ottenuti: una volta eseguito l'orientamento delle immagini è possibile ricorrere alla stereoscopia in qualsiasi momento ed individuare altri blocchi mobili, inizialmente sfuggiti all'analisi, anche integrando le evidenze raccolte in successivi sopralluoghi svolti con tecnici che operano in parete ("tecchiaioli"). Inoltre, il sistema e le procedure proposte non devono essere intese come un'alternativa al rilevamento di campagna, ma come un sostegno all'analisi dei dati funzionali alla messa in sicurezza del fronte. E' possibile ipotizzare un percorso che, partendo dalla identificazione dei blocchi mobili sulla parete, sia articolato come segue:

- Valutazioni di tipo statistico: suddividere i blocchi mobili in classi dimensionali e per presunto meccanismo di rottura – predisporre grafici “dimensioni dei blocchi/frequenza”;
- Analisi di stabilità parametriche ipotizzando una variazione dei valori di resistenza di interfaccia derivanti da una caratterizzazione geomeccanica e valutazione, in relazione alle classi selezionate, ad esempio di 3 categorie: blocchi mobili “stabili”, blocchi mobili con fattori di sicurezza bassi e molto bassi;
- Rappresentazione grafica dei risultati sulla parete utile a valutare la distribuzione e le categorie di rischio: si potrebbe di fatto parlare di analisi di rischio sfruttabile come strumento decisionale per definire le successive azioni;
- Definizione di criteri per:
  - escludere fenomeni di instabilità in determinate zone;
  - perimetrare aree con esigenza di controlli/monitoraggio;
  - individuare zone ove può essere necessario mettere in atto interventi sulla parete (disgaggi, stabilizzazioni, ecc.) o programmare misure di sicurezza (modifica del Piano di Coltivazione, protezioni, ecc.) in relazione ad una analisi costi-benefici.

Riguardo l’impiego della tecnologia laser scanner eventualmente alternativa al rilevo fotogrammetrico, il lavoro ha permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- La tecnologia laser permette di ricostruire in tempi rapidi e con grande precisione la morfologia del fronte di cava. In questo senso il metodo fotogrammetrico richiede più tempo sia per quanto attiene la presa dei fotogrammi sia per l’orientamento, restituzione ed elaborazione dei dati.
- Nonostante la notevole distanza cui è possibile posizionare lo strumento rispetto al fronte di cava sono molte le aree in “ombra” rispetto al raggio laser: questo è legato all’elevato angolo di incidenza della ripresa per il dislivello altimetrico tra lo strumento e la superficie indagata ed alla forte irregolarità del fronte caratterizzato da incavi e sporgenze che coprono spesso la visuale di accesso al raggio. In questo senso le informazioni ricavate dalla fotogrammetria mediante pallone aerostatico sono notevolmente più complete.

In conclusione, quando l’obiettivo del lavoro non è esclusivamente il rilievo morfologico del fronte di cava ma anche l’interpretazione del suo assetto geologico-strutturale, e soprattutto l’individuazione, la misura e la verifica della continuità delle fratture, l’impiego della tecnologia laser scanner è da considerasi integrativo e in nessun modo alternativo al rilievo fotogrammetrico ed alla conseguente analisi stereoscopica. Tale integrazione è inoltre da ponderare in ragione dei costi di esecuzione del rilievo laser scanner che in ogni caso non possono essere marginali.

Bibliografia

1. Barton N. R. (1973), “Review of a new shear strenght criterion for rock joints”. Engeneering Geology, Elsevier. Vol. 7, 287-332.
2. Carmignani L. (1985), “Carta Geologico-Strutturale del Complesso Metamorfico delle Alpi Apuane (Foglio Nord)”. Litografica Artistica Cartografica, Firenze.
3. Fondelli M. (1992), “Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica”. Laterza, Bari.
4. Guastaldi E., Salvini R., Anselmi M., Fantozzi P.L. & Meccheri M. (2004), “Digital terrestrial photogrammetry for the evaluation of rock slope stability in the Carrara marble district (Italy)”. 32nd International Geological Congress, Firenze, Italia, 20-28 Agosto 2004 (CD del Congresso).
5. Lemy F. & Hadjigeorgiou J (2003), “Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures”. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, 903–917.
6. Linder W. (2003), “Digital Photogrammetry, Theory and Applications”, 102-106.
7. Meccheri M. (1996), “Carta Geologico-Strutturale delle varietà merceologiche dei Marmi del Carrarese”.
8. Poropat G. (2003), “A new tool for mapping rock mass structure in open pits”. Division of Exploration and Mining, Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization (CSIRO) Publications.