

Applicazioni del Laser Scanner terrestre a temi geologico-tecnici

Alberto Clerici¹, Massimo Gelmini¹, Michelangelo Ravelli¹, Matteo Sgrenzaroli²,
Giorgio Vassena¹

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Brescia; Via Branze, 38 - 25125 Brescia; fax: 0303715503;
e-mail: alberto.clerici@ing.unibs.it, massimo.gelmini@ing.unibs.it, michelangelo.ravelli@ing.unibs.it, giorgio.vassena@ing.unibs.it
²Inn. Tec.srl., Via Branze, 38, - 25123 Brescia; sgrenzaroli@topotek.it

Terrestrial Laser Scanner Applied for Geological Survey

ABSTRACT: Laser scanner is an electronic instrument capable to survey the three-dimensional geometry of an object through a laser pulse measuring the distance between the laser head and the objects surface. Accuracy, acquisition time and range varies between several commercial products. Short range (up to 50-70 m) scanners can survey in few minutes at high resolution (ca. ± 2 mm), while long range scanners (up to 2000 m) can provide a decimetric accuracy and need more acquisition time. Laser scanner has the advantage that doesn't need passive corner reflector on the object but on the other hand the measure accuracy could be dependent on the surface characteristics (material, dielectric constant, etc.). The laser scanner output is a three-dimensional cloud of points colored by reflectance values. Both the cloud of point and the derived mesh model can be textured using a external digital images; the final result is photorealistic model of the object completely measurable. Terrestrial laser scanner technology (hardware and software) is in continues developing and several application are related to the geological survey field of application. In particular laser scanner was applied for geo-mechanical analyses, rock fall monitoring, tunnel and cave survey, glacier monitoring. Further development are planned to simplified the usage and analyses of laser data for geologist trough user friendly software tool.

Key terms: Laser scanner, engineering geology, topographic survey, slope stability

Termini chiave: laser scanner, geologia applicata, rilievo topografico, stabilità dei versanti.

Riassunto

Negli ultimi anni la tecnica di rilevamento “laser scanning terrestre” (dove la specificazione “terrestre” serve per distinguerla dalla tecnica di scansione da aeromobile), è andata progressivamente sviluppandosi, estendendo via via il proprio campo di applicazione e migliorando sia le apparecchiature di rilievo che il software per l'elaborazione dei dati.

Sono sempre più numerose le esperienze maturate in ambito geologico-applicativo che hanno mostrato la potenzialità di questa nuova tecnica come ausilio nella raccolta dei dati. Interessanti sono le applicazioni nel rilievo geomeccanico, nello studio della stabilità di versanti, nei rilievi in attività minerarie a cielo aperto, nel rilievo di gallerie esistenti, nello studio della caduta massi ed in ambito glaciologico. Attualmente la ricerca si sta rivolgendo alla realizzazione di strumenti software per il trattamento dei dati in grado di rendere sempre più semplice la lettura e l'estrazione delle informazioni del rilevamento, in modo che esse possano venire eseguite direttamente dal geologo o, comunque, da chi dovrà utilizzare successivamente i dati, e non più esclusivamente dal topografo esperto.

Introduzione

Il laser scanner è uno strumento elettro-ottico meccanico in grado di rilevare la geometria tridimensionale di oggetti tramite la scansione non a contatto degli stessi da parte di un distanziometro laser. La rapidità, l'accuratezza e la portata dello strumento dipendono dalle caratteristiche costruttive dello stesso. Si spazia infatti da strumenti in grado di rilevare in pochi minuti ed elevate accuratezze (ca. ± 2 mm) ma con portate ridotte (dell'ordine di 30-40 metri), a strumenti in grado di rilevare con tempi assai più dilatati fino a distanze nominali dell'ordine di 2000 metri ed accuratezze centimetriche. La misurazione viene effettuata dallo strumento senza la necessità di apporre sull'oggetto rilevato (architettura, fronte roccioso, terreno, ecc.) alcun riflettore passivo (prisma o superficie riflettente), come invece richiedono molte stazioni totali topografiche. Per tale ragione le caratteristiche di accuratezza e di portata non sono descrivibili in modo univoco ma in funzione delle caratteristiche superficiali dell'oggetto rilevato (Marbs, 2002). Il primo risultato della misurazione è una descrizione dell'oggetto osservato tramite una nuvola tridimensionale di punti a cui viene in genere associato anche un valore di riflettanza. Al modello tridimensionale o direttamente ad ogni punto, a seconda del processo di elaborazione scelto,

può anche essere associata un'immagine digitale, arrivando a realizzare un vero e proprio modello tridimensionale virtuale misurabile dell'oggetto rilevato (Sequeira et al., 1999).

Le applicazioni della tecnologia laser scanner terrestre a tematiche geologico-tecniche hanno avuto, negli ultimissimi anni, uno sviluppo ed una sperimentazione di grande interesse per le applicazioni pratiche. Attraverso strumenti informatici si possono quindi indagare le principali caratteristiche geomorfologiche e geometriche dell'oggetto naturale ed eventualmente quantificare le variazioni geometriche occorse nel tempo.

L'interesse del mondo della ricerca nella realizzazione di applicazioni della metodologia laser scanner ad alcuni temi geologico-applicativi ha due principali obiettivi: in primo luogo quello di verificare l'utilità pratica di tale tecnica, e in seconda battuta di sviluppare programmi specifici di semplice uso che possano essere utilizzati anche da non esperti del settore topografico.

I campi applicativi in cui è stato impiegato il metodo sono principalmente sei:

1) nella conduzione dei rilievi geomeccanici (punto di partenza insostituibile in ogni studio degli ammassi rocciosi), come strumento in grado sia di arricchire la quantità e la precisione nell'acquisizione dei parametri geometrici (giacitura delle discontinuità, spaziatura, intercetta, volume roccioso unitario, ecc.) ove la conduzione di un rilievo tradizionale è possibile, sia di estenderne l'acquisizione ad aree di difficile accesso, spesso forzatamente trascurate nella pratica tradizionale di rilievo;

2) nello studio della stabilità dei versanti in roccia, sia per l'esecuzione di rilievi geomeccanici in zone di difficile accesso, che per la quantificazione di movimenti lenti;

3) nel rilievo topografico di aree di cava a cielo aperto, permettendo la quantificazione certa dei volumi estratti e la caratterizzazione degli ammassi da coltivare con riferimento alla intensità di fratturazione degli stessi;

4) nel rilevamento dello stato di fatto in gallerie esistenti, anche a seguito di crolli;

5) nello studio della caduta massi, sia per il rilievo delle condizioni geomeccaniche di pareti di distacco di difficile accesso, che per il rilievo accurato della morfologia del pendio di caduta, a tutto beneficio della significatività delle simulazioni relative alle possibili traiettorie dei massi in caduta;

6) negli studi glaciologici.

Il laser scanner nei rilievi geomeccanici

Il rilievo geomeccanico costituisce il punto di partenza per ogni studio relativo ad un ammasso roccioso, quale che sia il problema che si deve affrontare. Esso, come noto, è un insieme ordinato di misure ed osservazioni di caratteristiche litologiche, geometriche e tecniche dell'ammasso roccioso che è indispensabile conoscere in qualsiasi problema applicativo in quanto da esso derivano la classificazione

tecnica dell'ammasso roccioso, la definizione di alcune caratteristiche geomeccaniche altrimenti difficilmente determinabili ed una serie di indicazioni progettuali sia per ammassi in superficie che in sotterraneo.

Alcuni limiti del rilievo geomeccanico tradizionale consistono spesso nella difficoltà di accesso alla parete rocciosa e nella limitata estensione della superficie rocciosa su cui vengono effettivamente eseguite le misure; un altro problema frequente, soprattutto avendo a che fare con rocce deboli, è costituito dalla pericolosità oggettiva del sito.

In ammassi rocciosi di buona o discreta qualità si può decidere di operare con tecnica alpinistica, ma in questo caso i tempi medi necessari per il rilievo si allungano tanto da rendere spesso economicamente insostenibile tale attività. Tali tempi sono grandemente funzione di alcune variabili, come l'accessibilità alla sommità della parete, la pendenza della stessa, l'eventuale necessità di un disaggio preventivo, l'esperienza degli operatori ed eventuali difficoltà di comunicazione tra gli operatori a causa ad esempio di tratti strapiombanti. A titolo indicativo, ad una squadra di due operatori esperti può essere necessario, per un rilievo di grande dettaglio, un tempo dell'ordine di 7 ore per una strisciata verticale di 3 m della lunghezza di 40 m. I tempi possono dimezzarsi misurando comunque tutti i parametri ma riducendo il numero di misure per ciascuno di essi e possono dimezzarsi ulteriormente eseguendo un rilievo speditivo.

Anche operando in parete, si hanno comunque altri limiti operativi dovuti all'impossibilità, con i rilievi eseguiti lungo le verticali di calata, di rilevare effettivamente l'intera superficie di interesse, alla difficoltà di conoscere l'esatta posizione in cui si stanno svolgendo le misure, alla forzata aderenza fisica con la parete che, spesso, è di ostacolo alla comprensione dello schema distributivo delle famiglie di discontinuità che interessano l'ammasso.

La tecnica del laser scanner consente al contrario di misurare rapidamente e con sufficiente precisione tutte le maggiori caratteristiche geometriche di un ammasso roccioso, come la giacitura delle discontinuità, la spaziatura, l'intercetta, la forma delle discontinuità ed il volume roccioso unitario; in qualche caso si può rilevare anche l'apertura delle discontinuità.

Mediante l'analisi geometrica del modello digitale, gli angoli di immersione ed inclinazione relativi alle principali famiglie di discontinuità possono essere facilmente ricavati utilizzando le informazioni numeriche fornite dal software (Slob et al., 2002). Una volta infatti georiferite le scansioni rispetto ad un sistema di riferimento correttamente orientato, si ottengono i parametri descrittivi delle entità geometriche.

Tramite semplici relazioni trigonometriche, ad esempio, è possibile determinare, una volta definito il piano che meglio le approssima (Fig. 1), gli angoli relativi all'orientamento delle discontinuità, deducendoli dai parametri geometrici del piano stesso.

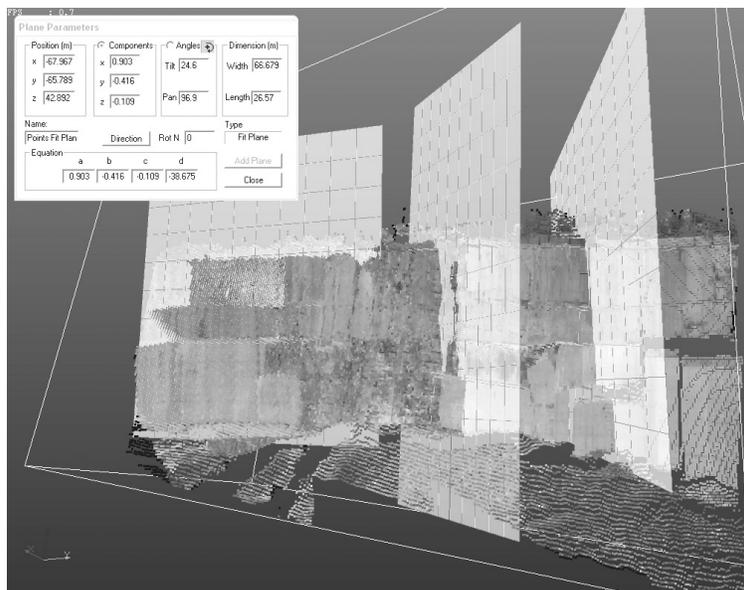


Figura 1: Definizione dei piani nel modello tridimensionale fotorealistico (Area di cava della Cooperativa Valverde di Botticino Mattina, Brescia).

Setting of planes on the tridimensional textured model (Valverde Cooperative extraction area, Botticino Mattina, Brescia)

Il laser scanner nello studio della stabilità di versanti

Le potenzialità della metodologia di rilievo con laser scanner nella quantificazione dei movimenti relativi ai versanti sono notevoli. Questa tecnica presenta infatti numerosi vantaggi rispetto ai sistemi di rilevamento tradizionale come la stazione totale o rispetto al sistema GPS di più recente diffusione: non richiede contatto ed è caratterizzata da una velocità di acquisizione incomparabilmente maggiore (si acquisisce la posizione di migliaia di punti al secondo). Va tuttavia considerato che presenta limitazioni in presenza di una notevole copertura vegetale. Questo comporta, in alcuni casi, la necessità di integrare il rilevamento laser con dati provenienti da altre metodologie di rilevamento per colmare le zone da esso non visibili. Inoltre l'utilizzo del sistema GPS o della stazione totale si rendono comunque necessari perché, per poter monitorare gli spostamenti, si ha la necessità di geo-riferire le nuvole di punti acquisite rispetto ad un sistema di riferimento da essi indipendente.

Per calcolare e mettere in evidenza gli eventuali spostamenti, le nuvole di punti acquisite in tempi diversi vengono elaborate e confrontate attraverso l'utilizzo di software specifici. Attualmente i laser terrestri permettono di apprezzare spostamenti sub-centimetrici, considerando che le apparecchiature in commercio raggiungono accuratèzze dell'ordine di alcuni millimetri ma solo nel caso si possa operare a distanze dell'ordine di qualche decina di metri dal versante. Aumentando la distanza fino a varie centinaia di metri, l'accuratèzza decade fino a qualche centimetro e gli spostamenti rilevabili sono superiori al

centimetro

Il modello tridimensionale del territorio rilevato con laser (rappresentato da una nuvola di punti o da un modello tridimensionale triangolato) può essere facilmente integrato con i normali sistemi di disegno CAD, permettendo una efficace progettazione anche di elementi di ingegneria civile da inserire nel contesto rilevato. In Figura 2 viene visualizzato l'inserimento di una briglia idraulica, disegnata a CAD, nel rilevamento tridimensionale effettuato con laser a scansione.

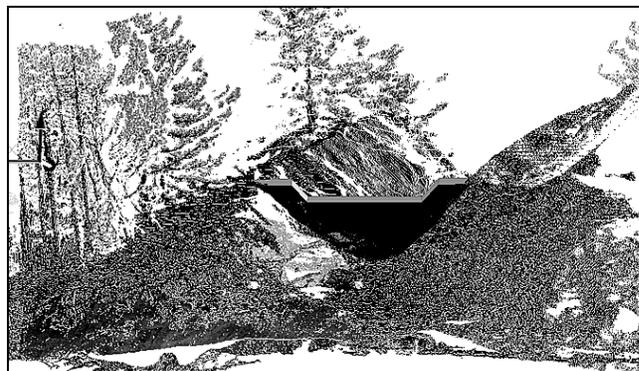


Figura 2: Progetto di una briglia sulla base del modello 3D.
Planning example of an hydraulic construction on the base of 3D Model.

Il laser scanner nei rilievi in cave a cielo aperto

La tecnologia laser dimostra di essere di notevole aiuto anche nel rilievo di cave a cielo aperto, dove con tecniche di rilievo di tipo tradizionale risulta spesso difficoltosa sia

l'individuazione che la quantificazione delle zone di estrazione. Le fasi e le modalità che caratterizzano il rilievo laser in questo ambito possono considerarsi simili al caso del rilevamento di versanti. Confrontando i dati geometrici tridimensionali ottenuti in intervalli temporali differenti, è possibile valutarne le variazioni in termini lineari, superficiali o volumetrici. Il modello tridimensionale rilevato e georeferenziato può essere infatti analizzato sia attraverso gli strumenti software di gestione del laser medesimo, che con gli strumenti software normalmente impiegati dal cavatore o dal rilevatore di fiducia. La densa nuvola di punti può essere infatti filtrata e semplificata in modo da poter essere gestita dai tradizionali programmi di calcolo volumetrico e rappresentazione tridimensionale, permettendo al gestore della cava o al rilevatore di trattare con un unico strumento software i dati rilevati nel tempo per via topografica classica o con laser scanner.

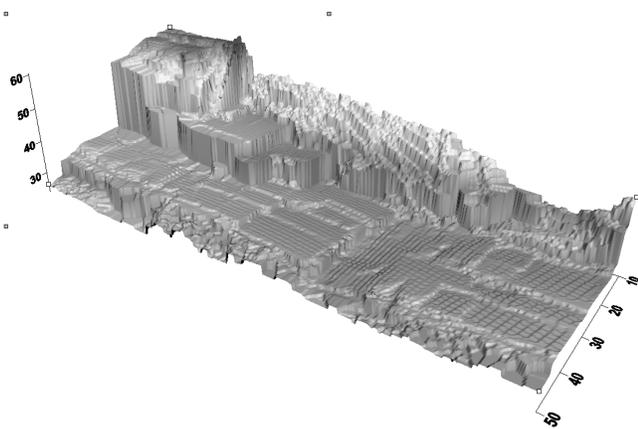


Figura 3: Esempio di modello digitale altimetrico di un fronte di cava (Cave di Botticino, Brescia)
DEM example of a marble quarry front wall (Extraction area in Botticino, Brescia).

Nel monitoraggio dell'attività estrattiva, la valutazione del volume estratto (dato di notevole interesse) può essere dunque notevolmente facilitata e velocizzata sovrapponendo i modelli superficiali del fronte di cava (Fig. 3) e calcolandone il volume tra essi compreso. Il volume calcolato con tale metodologia risulta molto accurato dal momento che le caratteristiche geometriche della superficie del fronte di cava vengono rilevate con una maglia di punti ad elevata densità e con accuratezze sub-centimetriche.

Un ultimo importante aspetto di cui tenere conto è la possibilità di agganciare l'immagine del fronte di cava al modello tridimensionale rilevato. Tale documento può dunque diventare uno strumento incontestabile per la soluzione di controversie o contenziosi tra gestori della cava e concessionari, a riguardo della stima dei reali volumi estratti. Esso può costituire infine un utile supporto per la progettazione degli interventi di ripristino ambientale previsti dalla legge al termine dell'attività estrattiva.

Il laser scanner nei rilievi in galleria

Il rilievo dei manufatti stradali e ferroviari in gallerie, naturali o munite di rivestimento, può essere affrontato in modo efficace e speditivo mediante la tecnologia laser scanner. Con questo sistema vengono acquisite la geometria precisa ed il dato di riflettanza (immagine all'infrarosso vicino) relativo alla superficie scansionata. Il dato geometrico può essere inoltre integrato dall'immagine fotografica che rappresenta una informazione fondamentale per il riconoscimento delle differenti unità geologiche presenti nel modello digitale, permettendo una analisi geometrico-strutturale a tavolino. Una delle problematiche alla quale porre attenzione nel rilievo laser in galleria è rappresentata dalla fase di unione e georeferenziazione delle varie scansioni: non è possibile in questo caso sfruttare l'algoritmo di unione automatica delle scansioni a causa della geometria "tubolare" del manufatto; il metodo può non convergere per la mancanza di elementi geometrici di vincolo lungo l'asse della galleria stessa. Si devono perciò predisporre una serie di targets riconoscibili nella nuvola di punti e realizzare l'unione delle varie scansioni mediante la corrispondenza di almeno tre targets per coppia di scansioni, oppure mediante la georeferenziazione di ogni singola scansione in un sistema di riferimento globale.

Acquisire il maggior numero di informazioni possibile in tempi brevi risulta fondamentale in situazioni complesse, come in occasione di un crollo quando è urgente la messa in sicurezza del manufatto ed il suo ripristino, oppure dove è indispensabile ridurre al minimo i tempi di interruzione della viabilità (ad esempio in gallerie stradali od idroelettriche), oppure ancora dove occorre operare con rapidità sfruttando gli intervalli nel passaggio dei convogli (nelle gallerie ferroviarie). Un rilevamento mediante laser scanner, se condotto con opportuni criteri, riduce notevolmente i tempi delle operazioni di campagna garantendo l'acquisizione della quasi totalità delle caratteristiche geometriche (Fig. 4) con elevate accuratezze e sempre con la possibilità di associare al rilievo geometrico l'informazione fotografica. L'intervento e l'operatività in campagna può in tal modo avvenire in tempi brevissimi, mentre il vaglio delle informazioni da estrarre può essere fatto a posteriori, in fase di elaborazione dei dati acquisiti (Ravelli et al., 2005).

Non secondaria è inoltre la possibilità di rilevare con rapidità e precisione la posizione e l'andamento di unità geologiche e strutturali il cui rilievo con le tecniche tradizionali della geologia applicata risulta macchinoso e forzatamente impreciso (come sulla calotta della galleria, Fig. 5).

Il laser scanner nello studio della caduta massi

Anche nel campo dello studio della caduta massi il contributo del laser a scansione è di grande interesse. Il rilevamento con scanner laser ben si presta sia ai rilievi sulle pareti di distacco o di potenziale distacco, spesso di

difficile accesso diretto o talvolta troppo estese per essere convenientemente descritte con rilievi geomeccanici tradizionali, sia per rilevare con dettaglio la morfologia del pendio di caduta in assenza di copertura vegetale continua. Soprattutto volendo impiegare metodi predittivi delle traiettorie di caduta di tipo tridimensionale, l'accuratezza con cui è nota la forma e la scabrezza della superficie topografica è infatti determinante per la significatività delle stime.

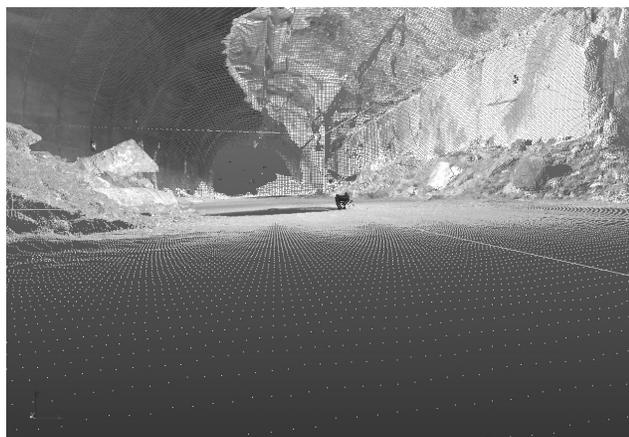


Figura 4: Ricostruzione tridimensionale di una galleria rilevata tramite laser a scansione.

Tridimensional representation of a road tunnel surveyed by laser scanner technique.

Ad esempio, analisi a ritroso di eventi di crollo provocati nell'ambito di uno studio mirato (Clerici e Sfratato, 2004) hanno mostrato come solo operando con una base topografica sufficientemente dettagliata (con equidistanza di 2 m) sia possibile effettuare analisi a ritroso significative; con morfologie sufficientemente regolari, il passaggio ad una equidistanza di 10 metri comporta ad esempio l'introduzione di errori non trascurabili per quanto riguarda sia l'ampiezza del fronte di arrivi (che si restringe mediamente del 75%), che la distanza del punto di arresto (che aumenta fino al 20%); differenze ben maggiori si hanno via via che la morfologia reale del pendio diventa più articolata. Conseguentemente variano le traiettorie, le velocità di caduta e le energie cinetiche dei massi: va quindi da sé che la possibilità di rilevare rapidamente e con grande dettaglio il pendio di caduta consente un significativo incremento nella qualità dei modelli predittivi, a tutto beneficio della progettazione degli interventi di difesa.

Il Laser scanner negli studi glaciologici

L'impiego di laser a scansione terrestre in ambito glaciologico si è rivelato valido supporto per il monitoraggio e l'analisi multi-temporale dell'evoluzione degli apparati glaciali (Carcano et al., 2005).

Si è dimostrato, sia attraverso esperienze sull'arco alpino che su apparati glaciali Himalayani, che la

strumentazione laser a scansione può essere efficacemente combinata con rilievi puntuali condotti mediante l'utilizzo di ricevitori GPS sia per esigenze di georeferenziazione che di misurazioni delle velocità di punti noti. La misurazione con laser, particolarmente indicata per ambiti locali e indagini di dettaglio, ma teoricamente applicabile anche per estensioni maggiori, produce un modello tridimensionale del ghiacciaio rilevato, arricchito della informazioni colorimetriche ottenute associando all'informazione geometrica immagini ad alta risoluzione acquisite con camera digitale (Fig. 6). Oltre all'aspetto metrico, che è garantito dalla possibilità di estrarre dal modello misure lineari, superficiali e di volume, un significativo vantaggio è costituito dalle potenzialità di visualizzazione, sfruttabile per analisi tematiche e morfologiche di ambienti glaciali di tipo detritico, anche situati in aree remote.



Figura 5: Un particolare della zona di crollo in galleria.
Detail of a tunnel's damage zone.

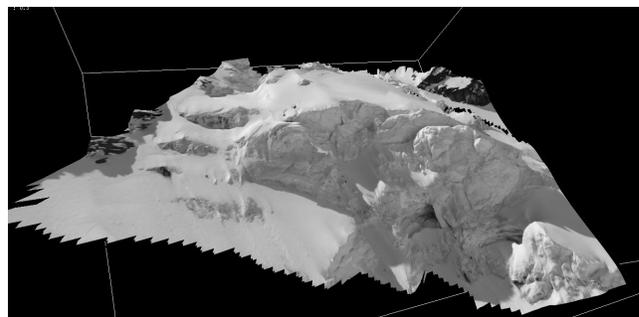


Figura 6: Modello tridimensionale con informazione di colore del seracco del Monte San Matteo (Alta Valtellina - Italia)
Tridimensional model with coloured texture of a serac on San Matteo peak (Valtellina - Italy)

Conclusioni

Alla luce delle sempre più numerose esperienze acquisite, la tecnologia laser a scansione è oramai da considerarsi un supporto efficiente ed affidabile in rilievi in ambito geologico-applicativo. La tecnica laser si integra

efficacemente con le tecniche di rilevamento classiche, sia di rilevamento diretto, sia cartografiche o realizzate con sistemi GPS o con stazioni totali. Peraltro, l'uso integrato dei sistemi di posizionamento satellitare o di misura con stazione totale è quasi sempre previsto per l'esecuzione delle operazioni di georeferenziazione delle scansioni stesse.

Nell'ottica di rendere i risultati del rilievo laser sempre più facilmente gestibili, la ricerca e lo sviluppo tecnologico sono attualmente rivolti alla progettazione e realizzazione di strumenti software per il trattamento dati di semplice uso.

Ciò al fine di permettere l'estrazione diretta delle informazioni utili in ambito geologico (giacitura delle discontinuità, spaziatura, intercetta, volume roccioso unitario, volumi di scavo) direttamente dal geologo (o, comunque, da qualunque figura professionale che dovrà utilizzare i dati) e di interfacciarli con strumenti software già in uso. Unitamente allo sviluppo software si sta assistendo anche ad una rapida evoluzione degli strumenti laser, volta innanzitutto a migliorarne portate, risoluzione e maneggevolezza, aspetto quest'ultimo fondamentale per facilitare le operazioni di campagna.

Bibliografia

Marbs A., 2002. Experiences with Laser Scanning at i3mainz; CIPA, Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece.

Carcano G., Gelmini M., M. Sgrenzaroli M, Vassena G., 2005. Il monitoraggio glaciologico con laser a scansione terrestre: modalità operative su ghiacciai di alta quota (Changri Nup - Nepal), Atti del 49° Convegno Nazionale SIFET, Palermo, Italia.

Clerici A. & Sfratato F., 2004. Sperimentazione in sito ed analisi del fenomeno di caduta massi. GEAM Torino, Italia, n. 1-2, 39-47.

Ravelli M., Clerici A., Gelmini M., Lanzi C., Riva P., Sgrenzaroli M., Vassena G., 2005. A Laser Scanning approach to model and survey road tunnel. Workshop Italy - Canada 2005 "3D Digital Imaging and Modeling: Applications of Heritage Industry Medicine and Land", Padova, Italia.

Sequeira V., Ng K., Wolfart E., Gonçalves

J.G.M., Hogg D.C., 1999. Automated Reconstruction of 3D Models from Real Environments; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (Elsevier), 54, 1-22

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.