

FOTOGRAMMETRIA DIGITALE TERRESTRE E LASER SCANNER PER L'ANALISI DELLA DINAMICA GRAVITATIVA DI VERSANTE: IL CASO DEL BACINO DEL MIAGE

Marco Giardino*, Daniele Chiuminatto*, Luigi Perotti*, Davide Marenchino**

(*) Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra, Via Valperga Caluso 35, 10125 Torino
marco.giardino@unito.it – danielle.chiuminatto@unito.it – luigi.perotti@unito.it

(**) Politecnico di Torino, DITAG, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino – davide.marenchino@polito.it

Riassunto

Al fine di studiare l'evoluzione nel tempo della dinamica gravitativa dei versanti del bacino glaciale del Miage (Massiccio del Monte Bianco), sono state svolte alcune campagne di rilevamento morfostrutturale sulle pareti rocciose, mediante l'utilizzo di tecnologie innovative di rilievo. Questi studi sono stati affiancati ai tradizionali rilievi geomorfologici e geologico-strutturali, utili per evidenziare come i fenomeni di crollo dalle pareti rocciose da un lato siano strettamente dipendenti dalle caratteristiche geologiche intrinseche dell'ammasso, dall'altro siano in grado di condizionare profondamente la dinamica del ghiacciaio del Miage.

L'analisi dell'assetto morfostrutturale delle pareti rocciose è stata affrontata attraverso la sperimentazione di tecniche fotogrammetriche (fotogrammetria digitale terrestre) in grado di offrire, una volta orientate le immagini in laboratorio, la possibilità di restituire i parametri geometrici di orientazione nello spazio delle fratture in roccia. Inoltre è stata condotta una campagna di scansioni Laser di porzioni dei versanti, selezionate sulla base delle loro caratteristiche geomorfologiche e litostrutturali. L'analisi, mediante opportuni software, dei parametri geometrici di orientazione delle fratture ricavati dal trattamento della nuvola di punti generata dal Laser ha permesso una caratterizzazione morfostrutturale dell'ammasso roccioso comparabile all'analisi fotogrammetrica.

Localizzazione geografica e inquadramento geologico-geomorfologico

Il Ghiacciaio del Miage è ubicato nel settore NW della Valle d'Aosta, sul versante SW del Massiccio del Monte Bianco ed occupa una valle laterale sinistra tributaria della Val Veny.

Dal punto di vista morfostrutturale l'area in esame è dominata dalla presenza di un'importante direttrice tettonica regionale (Fronte Pennidico, che pone a contatto il dominio Elvetico con quello Pennidico) orientata NE-SW, lungo la quale si allineano la Val Veny e la Val Ferret, impostate alla base del versante meridionale del massiccio del M. Bianco.

Osservando la sezione trasversale di queste valli appaiono evidenti, oltre al profilo ad U di chiara impronta glaciale, la notevole asimmetria tra i due versanti opposti, imputabile alle diverse condizioni litostrutturali. Nel caso della Val Veny, il versante settentrionale, dove è impostata la Valle del Miage, è infatti costituito da pareti in roccia con andamento sub-verticale e con creste spartiacque che superano spesso la quota di 4000 m. Qui le rocce sono prevalentemente di tipo granitico e metamorfico (Massiccio Cristallino Esterno del Monte Bianco), quindi molto resistenti e scarsamente erodibili; ne risulta una morfologia molto aspra e articolata e le principali forme di erosione osservabili sono da imputare all'azione dei ghiacciai. Per contro, il versante meridionale della Val Veny è costituito prevalentemente da rocce metamorfiche scistose di origine sedimentaria (Zona Sion-Courmayeur, Antoine, 1972) quindi meno resistenti all'erosione. L'attuale

modellamento del versante è prevalentemente imputabile all'azione delle acque meteoriche ruscellanti e incanalate, con fenomeni di tipo detritico-torrentizio.

Assetto litostrutturale ed evoluzione tettonica

L'area di studio si sviluppa all'interno delle unità Massiccio del M. Bianco, dove è possibile distinguere un cristallino antico, probabilmente precambriano, da una copertura sedimentaria paleozoica (Von Raumer, 1987). L'intrusione del plutone granitico del Monte Bianco risale secondo le più recenti datazioni a 300 Ma, ma il contatto intrusivo è preservato solo nella zona sud-occidentale del massiccio (e quindi anche nella valle del Miage), mentre altrove è tettonico (Baggio et al., 1967; Bussy et al., 1990).

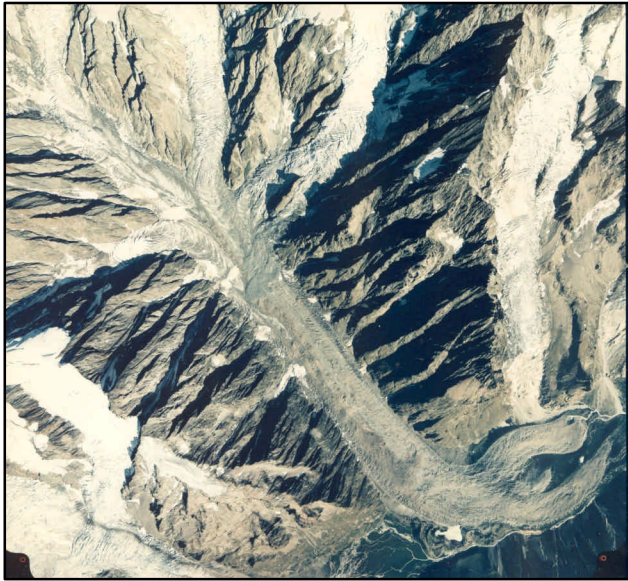


Figura 1: immagine aerea del ghiacciaio del Miage (volo RAVA '91, str. A1-11, fot. 379)

Dal punto di vista strutturale, il pattern che caratterizza le discontinuità di stile fragile alla scala dell'intero massiccio presenta generalmente alti valori dell'angolo di inclinazione, variabili tra i 50° e la verticale. La direzione prevalente dei piani di faglia è NE-SW, mentre la loro immersione può essere opposta, verso SE o verso NW. Osservando una sezione N-S del massiccio, l'intero sistema di faglie sembra convergere verso il basso, presentando nel complesso un aspetto a ventaglio. Alle faglie parallele all'allungamento del massiccio si associano faglie oblique e trasversali, con prevalente direzione NW-SE, talora con componente di movimento trascorrente.

L'intensità delle deformazioni all'interno del massiccio va progressivamente aumentando avvicinandosi al Fronte Pennidico; essa può

essere genericamente ricondotta ad un sistema compressivo con asse di raccorciamento di direzione NW-SE di età alpina che ha prodotto intensi fenomeni di sollevamento. I movimenti normali osservati lungo le superfici ad immersione SE del settore esterno potrebbero indicare una loro riattivazione in regime estensionale. Le faglie trascorrenti con direzione NW-SE potrebbero, allo stesso modo, essersi originate durante una fase di deformazione posteriore alla compressione NW-SE (Bertini et al., 1985).

Morfodinamica della Valle del Miage

All'interno della Valle del Miage, l'ambiente tipico è quello d'alta quota e, se si prescinde dal prevalente modellamento glaciale, il processo morfogenetico dominante in tempi recenti (post-PEG, *Piccola Età Glaciale*) è rappresentato dai crolli di roccia. Tale fenomeno è responsabile della copertura detritica pressoché continua della massa glaciale al di sotto dei 2500 m di quota che a partire dalla fine dell'Ottocento ha reso il Miage un ghiacciaio nero (*debris covered glacier*). Precedentemente il De Saussure, nei suoi *Voyages dans les Alpes* (1786) aveva descritto il ghiacciaio come limpido e totalmente libero di detriti. I crolli risultano fortemente condizionati dagli effetti dei recenti cambiamenti climatici. Il recente diffuso ritiro dei ghiacciai espone al crollo porzioni rocciose dei versanti in precedenza contenute dalla pressione della massa glaciale. Inoltre, il ghiaccio che pervade le fratture in roccia varia di volume e le oscillazioni della tavola del *permafrost* all'interno dell'ammasso roccioso possono favorire l'innescare di fenomeni di instabilità.

Analisi morfostrutturale

Considerando le caratteristiche geomeccaniche intrinseche degli ammassi rocciosi dell'area in esame, unitamente alla distribuzione geometrica delle maggiori discontinuità strutturali che

interessano l'ammasso stesso, è stata eseguita un'analisi morfostrutturale delle pareti sottoposte a deformazione gravitativa. Sono stati quindi estrapolati valori di carattere quantitativo, rilevati secondo criteri geotecnici, e considerazioni qualitative sulla stabilità dei versanti e sulle modalità di deformazione.

L'analisi morfostrutturale è stata condotta mediante l'esecuzione di 21 stendimenti, collocati ove l'analisi fotointerpretativa e le osservazioni di terreno hanno permesso di individuare zone in cui le discontinuità principali intersecano settori in deformazione gravitativa o settori caratterizzati da scadenti condizioni dell'ammasso roccioso. Un fattore condizionante la localizzazione degli stendimenti è stato rappresentato dalla difficoltosa accessibilità delle pareti: infatti nella valle del Miage, oltre i 2200-2300 m di quota i settori laterali del ghiacciaio si presentano fortemente crepacciati ed a diretto contatto con le pareti rocciose, rendendo impossibile la raccolta di misure in condizioni di sicurezza, soprattutto sul versante destro.

L'analisi dei dati raccolti ed elaborati ha permesso una caratterizzazione dell'ammasso roccioso, che si presenta in generale di qualità scadente, con numerosi settori di roccia fratturata e rilasciata, talvolta disarticolata. Il controllo strutturale sulla dinamica dei versanti appare molto intenso: infatti, la forma e la distribuzione delle principali nicchie di distacco e degli accumuli evidenziano come i fenomeni di crollo si orientano secondo l'andamento delle discontinuità tettoniche che spesso intersecano con continuità i versanti e le creste di bacini attigui. Al contrario, i fenomeni di decompressione postglaciale sui versanti (post-PEG) sono poco evidenti nell'asse vallivo principale del Miage, dove un'estesa copertura detritica ha impedito un drastico abbassamento della superficie glaciale.

Applicazione di nuove tecnologie

Per dare nuovo impulso alla ricerca nell'ambito della caratterizzazione morfostrutturale dell'ammasso roccioso è stata sperimentata la scansione Laser dei versanti rocciosi della parte bassa del bacino ed è stata condotta una campagna di riprese fotografiche digitali con camera calibrata, per il loro montaggio stereoscopico attraverso appositi *software*. Tutto ciò al fine di indagare in modo più rapido e preciso l'andamento delle discontinuità dell'ammasso roccioso. L'individuazione delle principali fratture è avvenuta sia mediante analisi geometrica dei modelli 3D derivanti dalle scansioni, sia mediante restituzione dei modelli stereoscopici. Ciò permette di ricavare una notevole quantità di dati sull'assetto morfologico dei versanti rocciosi e sullo stato di fratturazione degli stessi, risparmiando tempo nei rilievi sul terreno (dove spesso si opera in condizioni avverse, in modo particolare alle alte quote) e ricavando i parametri significativi sulle discontinuità successivamente in laboratorio.



Figura 2: fasi del lavoro di terreno con laser scanner in azione.

Lavoro di terreno

1. Materializzazione del sistema di riferimento

Il sistema di riferimento è stato materializzato definendo le coordinate di due punti (RP, reference point) nel sistema cartografico UTM WGS84 ed in un piano locale. Le operazioni di misura sono state condotte con l'utilizzo di due GPS doppia frequenza Trimble serie 4000, I punti sono posizionati sui due fili di cresta delle morene laterali ed individuabili in due grandi massi su ognuno dei quali è stato sistemato un chiodo per la materializzazione: uno si trova in corrispondenza del contatto tra morena laterale destra e versante in roccia, l'altro nella parte mediana del bacino sul filo della morena laterale sinistra. Il post-processamento differenziale dei dati per compensare le coordinate dei 2 punti acquisiti dati è stato effettuato utilizzando le coordinate e le acquisizioni di

alcune stazioni GPS fisse presenti nell'arco alpino occidentale (Biella, Torino, Francia). Collegandosi a questi punti, è stato possibile progettare ed eseguire l'operazione di appoggio per la fotogrammetria e per la georeferenziazione dei dati laser.

Il versante in esame è ubicato nel settore laterale destro e nella porzione mediana del bacino glaciale, ha un'estensione di circa 400 m in altezza e 300 m in larghezza e presenta notevole irregolarità morfologica. Il rilievo di dettaglio è stato eseguito mediante una Stazione Totale TopCon GPT 8201A. La stazione di misura è stata collocata sulla morena mediana del ghiacciaio, in posizione sopraelevata, in modo che entrambi i RP fossero visibili e collimabili. Sono stati successivamente rilevati 16 punti naturali in parete, necessari per l'appoggio fotogrammetrico. Inoltre sono stati misurati 5 marker riflettenti, posti su apposite mire con treppiede e situate alla base della parete, per permettere la successiva georeferenziazione delle nuvole di punti laser.



Figura 3: il versante indagato con la localizzazione dei punti utili per la collimazione delle immagini

2. Il rilievo fotogrammetrico

Mediante l'utilizzo di una camera calibrata Rollei 6008 PhaseOne con sensore da 22 milioni di pixel sono state effettuate le prese fotogrammetriche del versante indagato. In particolare sono state realizzate due strisciate a differenti distanze di presa, con rapporto di base:1/3. La fase di

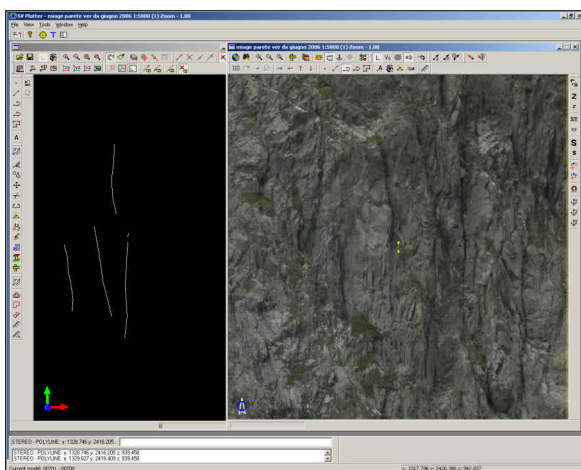


Figura 4: restituzione fotogrammetrica delle fratture in parete con StereoView Plotter (Menci)

orientamento è stata al momento eseguita su una coppia di fotogrammi, con distanza di presa $Z=300$ m. I risultati dell'orientamento "relativo-assoluto", condotto con il software "StereoView", sono del tutto soddisfacenti: gli scarti sui punti d'appoggio utilizzati per l'assoluto sono dell'ordine del cm. Inoltre l'alta risoluzione delle immagini permette una visualizzazione del modello stereoscopico con un elevato grado di dettaglio. Ciò offre la possibilità di restituire le discontinuità e le fratture dell'ammasso roccioso rispondendo pienamente ai requisiti richiesti in ambito geologico. La fase di restituzione permette di editare le entità di interesse ed esportarle in formato .vettoriale. In particolare i piani di fratturazione vengono restituiti per punti. In quest'ambito è in fase di realizzazione un software per l'elaborazione di questi dati, al fine di calcolare automaticamente i valori di immersione e inclinazione (dip e dip direction) relativi ad ogni singolo piano, attraverso la stima dei piani interpolanti i punti collimati.

3. Rilievo laser

Il rilievo Laser è stato realizzato con lo strumento RIEGL, modello LMS-Z420, che dispone di una camera fotografica digitale “Nikon D1X”. Il sistema genera una pulsazione laser che, in funzione della natura del punto oggetto, viene riflessa o parzialmente assorbita. Il segnale di ritorno è quindi registrato da un sensore. E’ così possibile determinare le coordinate spaziali (x,y,z) dei punti rilevati in modo automatico, ad elevata densità ed in tempo reale, con la precisione di +/- 20 mm. La camera digitale, opportunamente orientata rispetto al sistema laser, permette di ottenere informazioni radiometriche sull’oggetto in esame, le quali possono essere opportunamente integrate con i dati LASER, per la produzione di nuvole colorate e delle “Immagini solide”.

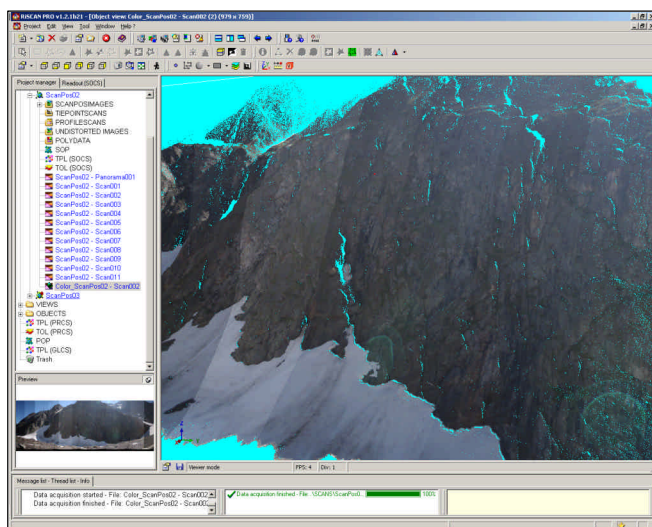


Figura 5: nuvola di punti colorata con Riscan Pro

punti e consente il “re-allineamento” delle immagini rispetto al sistema Laser. L’operazione è stata svolta manualmente, con la collimazione dei marker sull’immagine. Il software permette infine la colorazione delle nuvole di punti e la successiva esportazione in formato ASCII.

Il software LSR consente invece di svolgere in modo automatico:

- l’importazione dei dati Riscan;
- la ricerca dei marker;
- la filtratura delle nuvole di punti, con l’eliminazione degli errori grossolani;
- la georeferenziazione nel sistema UTM WGS84.

Oltre al modello 3D colorato, LSR fornisce un interessante prodotto: l’ “Immagine solida”. Quest’ultima è un’immagine RGB alla quale sono aggiunte le matrici di distanza D tra centro di proiezione dell’immagine e punto oggetto, e di riflettività R. In questo modo l’immagine possiede informazioni metriche, che la rendono un vero e proprio strumento di misura con cui è possibile misurare direttamente distanza, angoli, superfici e piani. Quest’ultima applicazione è molto utile per lo studio delle discontinuità del versante: collimando una serie di punti sull’immagine è possibile ottenere automaticamente l’equazione del piano interpolante e gli angoli di immersione ed inclinazione senza operare sul modello fotogrammetrico orientato.

Considerazioni conclusive

L’applicazione di tecnologie innovative quali la fotogrammetria digitale terrestre ed il Laser scanner per lo studio delle condizioni di fratturazione e della stabilità dei versanti rocciosi alle alte quote nel bacino glaciale del Miage si è rivelata efficace. In questa prima fase della ricerca è stata messa a punto una metodologia di lavoro sul terreno in grado di restituire dati sulla morfologia della parete senza necessità da parte dell’operatore di raggiungere la parete stessa per il posizionamento di mire. Il lavoro è stato improntato soprattutto sulla verifica dell’applicabilità delle due diverse metodologie

Durante la campagna di rilievo sono state realizzate tre scansioni del versante da diverse posizioni: due a circa 200 m ed una a 350 m. dalla base della parete. Per ognuna di esse sono stati rilevati i marker riflettenti posti sulle mire alla base del versante, in modo da poter georiferire le nuvole di punti. Inoltre per ogni scansione è stata scattata una serie di immagini dei marker e del versante interessato. I dati del rilievo vengono trasmessi in tempo reale dallo strumento ad un PC portatile grazie al software “Riscan Pro” (Riegl).

La fase di elaborazione dei dati è avvenuta in maniera automatica con l’ausilio del software Riscan Pro e del software LSR, realizzato dal Politecnico di Torino. Riscan Pro permette la ricerca automatica dei marker sulle nuvole di

(Laser e fotogrammetria) anche in settori impervi con evidenti difficoltà logistiche; inoltre è stata posta particolare attenzione alla fase di trattamento e filtratura dei dati (sono stati testati diversi *software* oltre a quelli citati nel testo). La successiva fase di lavoro consentirà nell'analisi strutturale

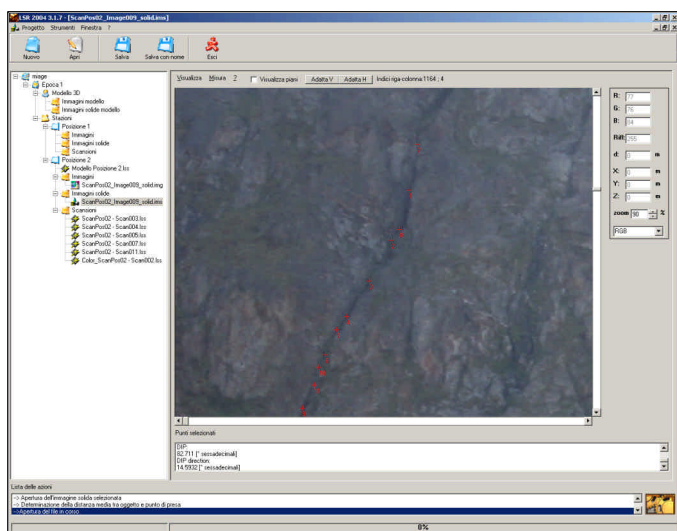


Figura 5: individuazione delle discontinuità sull'immagine solida prodotta da LSR, con individuazione automatica dei valori di immersione ed inclinazione

dell'ammasso roccioso e nella verifica della precisione delle misure in parete con le due diverse metodologie: primi test già rivelano come la fotogrammetria consenta di compiere un'analisi su ampie zone di versante, con il vantaggio di poter restituire le entità di interesse in stereoscopia, apprezzando al meglio le discontinuità ed i piani di frattura. I limiti sono dovuti alla necessità di possedere una stazione fotogrammetrica digitale. La scansione Laser invece può dare ottimi risultati nell'analisi di porzioni di versante non troppo ampie, e grazie all'immagine solida, consente di ottenere informazioni metriche su un'immagine, senza l'ausilio di sistemi per la visione stereoscopica.

La messa a punto, l'applicazione e la verifica delle metodologie innovative proposte per l'analisi morfostrutturale risultano molto utili per garantire: a) una migliore comprensione delle relazioni fra i processi gravitativi (disgregazione meccanica dei fronti rocciosi; frane di crollo diffuse; grandi fenomeni di crollo) e le condizioni lito-strutturali in alta montagna; b) un approccio "completo" all'analisi dei fenomeni gravitativi di versante a differente scala, qualitativo e quantitativo, sia in senso temporale (infra-pluriannuali) che spaziale (dalla singola parete all'intero massiccio).

Bibliografia

- Antoine P. (1972), "Le domaine pennique externe entre Bourg-Saint-Maurice (Savoie) et la frontiere italo-suisse (Bilan des connaissances actuelles sur ce secteur de la zone des Breches de Tarentaise)", *Geol. Alpine*, 48(1), 5-40 (incl. Engl. sum.).
- Baggio P., Ferrara G., Malaroda R. (1967), "Result of some Rb/Sr age determinations on the rocks of the Mont Blanc tunnel", *Boll. Soc. Geol. It.*, 86, 193-212.
- Bertini G., Marcucci M., Nevini R., Passerini P., Sguazzoni G. (1985), "Patterns of faulting in the Mont Blanc granite", *Tectonophysics*, 111, 65-86.
- Bornaz L., Dequal S. (2003), "L'IMMAGINE SOLIDA: un concetto innovativo e le sue applicazioni", *ASITA*.
- Bornaz L., Rinaudo F. (2004), "TERRESTRIAL LASER SCANNER DATA PROCESSING", *Proceedings of XX ISPRS Congress*.
- Bussy F. (1990), "Petrogenese des enclaves microgrenues associées aux granitoides calco-alcalins: exemple des massifs varisque du Mont Blanc et miocène du Monte Capanne", *Mém. géol. Lausanne*, 7.
- Von Raumer J. (1987), "Les massifs du M. Blanc et des Aiguilles Rouges : temoins de la formation de croute varisque dans les Alpes occidentales", *Géol. Alpine*, 63, 7-24.