

La geomatica per la modellazione 3D di placche rocciose di grandi dimensioni e applicazioni geologiche: il caso della rupe di San Leo (RN)

Gabriele Bitelli, Lisa Borgatti, Federico Cervi, Mirko Dellapasqua, Francesca Franci, Valentina Alena Girelli, Alessandro Lambertini, Alberto Landuzzi, Emanuele Mandanici, Alessandro Pacini, Margherita Cecilia Spreafico, Maria Alessandra Tini

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) – Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna (BO), e-mail: (gabriele.bitelli, lisa.borgatti, federico.cervi2)@unibo.it, mirko.dellapasqua@gmail.com, (francesca.franci, valentina.girelli, alessandro.lambertini, alberto.landuzzi, emanuele.mandanici)@unibo.it, pacioalex@tiscali.it, (margherita.spreafico2, mariaalessandra.tini)@unibo.it

Riassunto

Il lavoro si riferisce all'uso delle moderne tecniche geomatiche, in particolare il laser a scansione terrestre, per il rilevamento e la modellazione tridimensionale di una grande placca rocciosa ai fini di una accurata descrizione geometrica, nel supporto ad analisi di carattere geologico e per scopi di monitoraggio. L'esperienza illustrata si riferisce alla rupe su cui sorge l'abitato di San Leo (RN); la cittadina è situata sulla sommità di una placca lapidea di forma quadrangolare, con dimensioni di circa 500x600 m e delimitata da pareti verticali di altezza fino a circa 100 m. L'area è caratterizzata da fenomeni di instabilità dei versanti in evoluzione, il cui evento più recente è la frana che ha interessato la parete nordorientale nel 2014.

Nel corso del 2013 è stato eseguito il rilievo dei versanti Sud e Ovest della rupe utilizzando il sistema Riegl VZ400 supportato dalla tecnica GNSS per l'allineamento e la georeferenziazione; il modello tridimensionale ottenuto è stato integrato per i rimanenti due versanti con nuvole di punti di minore densità acquisite da terzi in epoca precedente e per la parte sommitale con i dati altimetrici desunti da base cartografica, integrati e validati con un rilievo GNSS cinematico.

La disponibilità di un modello tridimensionale dettagliato e georeferenziato della rupe ha consentito di effettuare analisi finalizzate all'individuazione delle discontinuità sull'intero ammasso roccioso, anche nelle zone difficilmente raggiungibili con i metodi tradizionali di rilievo geomeccanico.

L'esperienza maturata, ancora in corso, ha evidenziato come, ad integrazione del rilievo tradizionale, la sinergia delle diverse metodologie adottate possa permettere un'investigazione accurata ed in remoto, in totale sicurezza, delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche in contesti operativi che presentano problematiche oggettive di sicurezza ed accessibilità. Nella trattazione vengono descritte le fasi di rilievo ed elaborazione dati, evidenziando le problematiche operative e le soluzioni tecniche adottate, fino alla estrazione dei dati geometrici dal modello 3D della rupe.

Abstract

The work refers to the use of modern geomatic techniques, in particular the terrestrial laser scanning, for surveying and three-dimensional modelling of a large rock plate for the purpose of its accurate geometric description, in support to geological analyses and monitoring. The experience carried out is referred to San Leo's cliff (RN); the town lays on the top of a quadrangular rock slab, with dimensions of about 500x600 m bounded by vertical walls of height up to about 100 m. The area is characterized by active and dormant slope instability processes, as the landslide which affected the northeastern wall in 2014.

The survey of the side walls was performed with a terrestrial laser scanner supported by GNSS measurements for geo-referencing; the 3D model of the summit was completed with elevation data derived from cartographic database, integrated and validated with a kinematic GNSS survey. The availability of a complete three-dimensional model of the cliff, detailed and georeferenced, allowed the rock mass to be analysed, even in dangerous areas, difficult to be surveyed with traditional geomechanical methods.

The experience has shown that, complementary to traditional surveys, the synergy of the different adopted approaches may allow an accurate investigation with no-contact – and then in complete safety - of geological and geomorphological characteristics also in contexts with serious accessibility issues. In the paper, the phases of survey and processing of the data will be described, highlighting the operational issues and the technical solutions for the extraction of geometric data from the 3D model of the cliff.

Introduzione

Le moderne tecniche della geomatica offrono oggi numerose possibilità per investigare e descrivere oggetti e fenomeni geologici. Ad integrazione delle tecniche geotecniche e geologiche che offrono strumenti di valutazione e monitoraggio locali e puntuali, la geomatica svolge infatti un ruolo fondamentale per lo studio di aree estese e non direttamente accessibili. In questi casi, sono oggi largamente utilizzati i metodi cosiddetti *non contact*, tra i quali si riconoscono i sistemi laser a scansione terrestri (TLS) che permettono di ottenere prodotti estremamente precisi e caratterizzati da un'elevata ricchezza e completezza descrittiva, tali da costituire un flessibile strumento a supporto di diverse attività, quali la documentazione, l'analisi geologica ed il monitoraggio (Bitelli et al., 2004; Borgatti et al., 2010; Jaboyedoff et al., 2010).

Il caso di studio descritto nel lavoro si riferisce alla rupe di San Leo (provincia di Rimini, Alta Valmarecchia). San Leo è luogo di grande interesse sia dal punto di vista ambientale che per i suoi importanti trascorsi storici e per il ricco patrimonio culturale che ospita. Come molti centri abitati nord-appenninici risalenti all'epoca medievale, la città è stata costruita per scopi difensivi sulla sommità di un ammasso roccioso isolato (figura 1a). In particolare, la rupe è costituita da materiale calcareo-arenaceo e presenta una forma quadrangolare con lati di circa 500x600 m, delimitata da pareti verticali di altezza fino a circa 100 m, raggiungendo alla sommità una quota di circa 600 metri s.l.m.

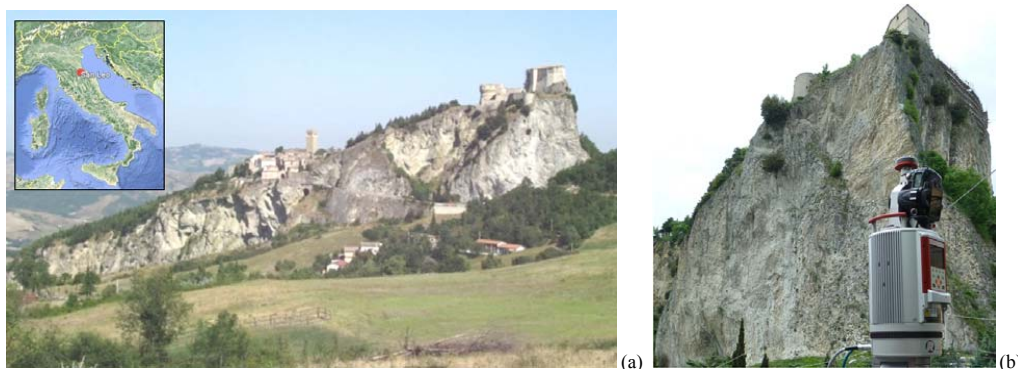


Figura 1 – (a) vista di San Leo, parete Sud della rupe; (b) rilievo TLS nella parte sottostante il castello.

Da un punto di vista geologico, questo ammasso roccioso rappresenta un esempio di placca *Epiligure* della *Valmarecchia* costituita da calcari della *Formazione di San Marino* ai quali è sovrapposta la sequenza *arenaceo-calcareo* della *Formazione del Monte Fumaiolo*. Tale placca

calcareo-arenitica poggia su un substrato *Liguride* alloctono, costituito da argille policrome note come *Argille Varicolori della Valmarecchia*.

Sia la placca rocciosa che il sottostante substrato argillitico sono interessati da fenomeni di instabilità (D'Ambra et al., 2004; Benedetti et al., 2013). In particolare, gli ultimi eventi franosi rilevanti, crolli e ribaltamenti in roccia, hanno interessato il versante nord nel 2006, spostandosi poi verso est con la frana del febbraio 2014 e arrivando a minacciare la sicurezza del centro abitato (Borgatti et al., 2015).

La causa predisponente di questi fenomeni è probabilmente da ricercarsi nell'elevato stato di fratturazione della rupe che, associato alla permeabilità trascurabile del substrato argilloso, permette un'intensa circolazione idrica nell'ammasso roccioso e consente la formazione di un acquifero che alimenta alcune sorgenti alla base della placca stessa (Spreafico et al., 2014). Il flusso dell'acqua, tramite processi chimici e fisici, causa l'erosione e il rammollimento del substrato, portando alla formazione di vere e proprie caverne al di sotto della parete rocciosa. Spreafico et al. (2015a), tramite modellazione numerica, hanno verificato il legame tra i fenomeni franosi che si registrano al perimetro della placca, come ad esempio la frana del 2014 (ca. 300.000 m³), e l'escavazione alla base della stessa¹.

In un tale contesto evolutivo è dunque evidente l'importanza della caratterizzazione strutturale dell'ammasso roccioso nella procedura di analisi della pericolosità del fenomeno franoso. Data l'impossibilità di un accesso diretto e sicuro alle pareti della rupe, è stata particolarmente utile ed interessante la possibilità di attuare un rilievo "in remoto" grazie alla tecnica laser scanner terrestre, che ha consentito di ottenere un modello digitale della rupe sufficientemente preciso e dettagliato da consentire analisi geologico-strutturali direttamente sul modello.

Tale analisi, in particolare, si è posta in prima istanza l'obiettivo della determinazione delle famiglie di discontinuità che interessano una porzione del versante Sud, assunta come area test. L'estrazione dei piani dal modello tridimensionale è stata condotta secondo due diverse procedure operative: una che prevede unicamente l'intervento manuale da parte dell'operatore, l'altra che si basa su una procedura semiautomatica che mira a ridurlo al minimo. Il confronto dei risultati ottenuti con quelli desunti dal rilievo geomeccanico tradizionale eseguito in situ, ha permesso di valutare le potenzialità offerte dall'utilizzo del modello tridimensionale. I dati di assetto delle discontinuità ottenuti sono poi stati utilizzati per l'analisi cinematica, tramite il Test di Markland, per evidenziare la probabilità di innesco di tre diversi meccanismi di instabilità: *planar sliding*, *wedge sliding*, *toppling*.

Rilievo TLS della rupe di San Leo

Una delle principali difficoltà connesse alla realizzazione del modello tridimensionale di tale ammasso roccioso è da imputarsi alla vastità dell'oggetto indagato ed alla difficoltà di avvicinamento alla base della rupe a causa della morfologia accidentata del terreno e della presenza di vegetazione. Tali problematiche hanno orientato all'adozione sistematica della tecnica TLS rispetto a quella fotogrammetrica, che pure è stata sperimentata (Spreafico et al., 2015b). Considerando la necessità di inquadrare il rilievo in un sistema di riferimento globale, la scelta metodologica e strumentale è stata orientata ad un approccio integrato che ha previsto, oltre all'utilizzo del laser scanner per la descrizione tridimensionale della rupe, l'adozione di strumentazione GNSS e topografica classica.

Per l'acquisizione delle nuvole tridimensionali è stato utilizzato il sistema laser Riegl VZ400 (figura 1b), le cui caratteristiche di precisione (3-5mm) e portata (fino a 600 m nella modalità *long range*) rispondono alle esigenze operative del contesto descritto. Questo sistema, inoltre, si presta particolarmente al rilievo in ambito territoriale, perché implementa la tecnologia *Full Wave Form*

¹ La quantificazione del materiale interessato dalla frana del febbraio 2014 è stata effettuata sulla base di un ulteriore rilievo TLS effettuato dal DICAM successivamente all'evento. Questa attività, che non viene descritta nel presente lavoro, è parzialmente riportata in Spreafico et al. (2015).

che, analizzando il segnale di ritorno, permette di identificare diverse eco di risposta e quindi classificare i target acquisiti come esemplificato in figura 2. Questa funzionalità ha facilitato il filtraggio della vegetazione che ricopre parzialmente la rupe.



Figura 2 - Sezione trasversale del terreno che evidenzia le eco di ritorno registrate.

Il rilievo dei due versanti Sud ed Ovest è stato eseguito nel 2013 (precedentemente quindi all'ultimo grande evento di frana) nel corso di cinque giorni di attività dedicate parallelamente al rilievo di inquadramento ed alla esecuzione delle scansioni. Ai fini dell'allineamento e della georeferenziazione del modello tridimensionale, sono state acquisite le posizioni di punti naturali e di target artificiali sferici e piani. I target sferici sono stati rilevati direttamente per via satellitare per mezzo di un rilievo GNSS in modalità rapido-statica; gli altri vertici sono stati invece determinati con un rilievo classico integrativo tramite stazione totale.

Per il rilievo satellitare sono stati utilizzati un sistema Ashtech ProMark 500 in doppia frequenza, un sistema Ashtech ProMark 3 in singola frequenza ed un ricevitore Trimble R7 con antenna Zephyr Geodetic 2 in doppia frequenza. La stazione master è stata determinata nel frame europeo ETRF2000 (epoca 2008.0), attraverso il collegamento con quattro stazioni permanenti della rete dinamica nazionale. Complessivamente la precisione ottenuta sulla posizione assoluta è di pochi centimetri. Il sistema ETRF2000 si può ritenere per questo livello di precisione coincidente con il WGS84. I punti di riferimento sono poi stati proiettati nel sistema cartografico UTM fuso 33. La conversione delle quote ellissoidiche in quote ortometriche è stata effettuata con il software ConvER della Regione Emilia Romagna (versione 2.01.11).

Per la realizzazione del modello tridimensionale delle pareti Sud e Ovest, sono state complessivamente acquisite 16 scansioni con un passo di campionamento medio intorno ai 2 cm sulle pareti rocciose. Nelle scansioni eseguite da distanze superiori a 350 metri, dovendo utilizzare lo strumento in modalità *long range*, tale parametro è stato aumentato a 5 cm.

Le operazioni di processamento delle nuvole di punti ottenute hanno riguardato sostanzialmente le fasi di filtraggio e allineamento. Un primo filtraggio è stato eseguito a monte dell'elaborazione, sfruttando la tecnologia *Full Wave Form* per conservare unicamente le eco ricadenti nelle categorie *single* e *last*, in modo da escludere almeno una parte dei punti appartenenti alla vegetazione. Le nuvole di punti rilevate sono state poi allineate tra loro per punti omologhi, sfruttando i target naturali ed artificiali ottenuti dal rilievo di inquadramento. Per i due versanti rilevati nel 2013 si è ottenuto complessivamente un modello tridimensionale a colori reali, costituito da circa 400 milioni di punti con una densità di media di 2 cm ed una precisione complessiva di pochi centimetri.

Per quanto riguarda, invece, i versanti Nord ed Est il modello è stato integrato con nuvole di punti acquisite da terzi negli anni 2008 e 2011, fornite in coordinate Gauss-Boaga e caratterizzate da una densità spaziale inferiore. In questo caso, poiché non è stato possibile individuare punti omologhi sufficientemente affidabili nelle aree di sovrapposizione tra i due modelli, l'allineamento è stato eseguito semplicemente con una conversione delle coordinate nel sistema di riferimento UTM-WGS84, ottenendo localmente scostamenti di diversi centimetri.

La parte sommitale è invece stata estratta dalla cartografia tecnica disponibile. Il prodotto è stato poi validato e georeferenziato tramite un rilievo GNSS cinematico eseguito ad hoc nel centro abitato.

Infine, sono state attuate un'ulteriore operazione di editing manuale del modello per eliminare in modo più puntuale i residui della vegetazione ed una decimazione necessaria per le successive analisi geologiche, con una ricampionatura del 50%.

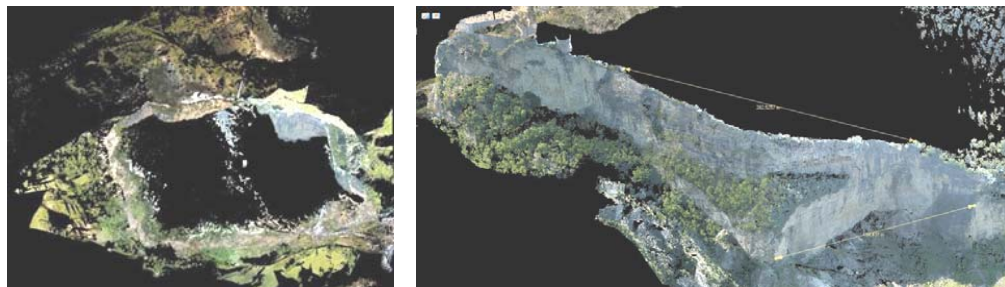


Figura 3 - Modello tridimensionale complessivo dei versanti della rupe di San Leo. La nuvola è costituita da oltre 618 milioni di punti.

Determinazione delle famiglie di discontinuità

L'area di studio scelta per condurre l'analisi sulla nuvola di punti (Spreafico et al., 2015b) è costituita dalla porzione di roccia del versante Sud della rupe, nelle vicinanze della porta di ingresso al paese evidenziata con la campitura rossa in figura 4.



Figura 4 - Porzione di parete Sud utilizzata per analisi geologiche.

La determinazione delle famiglie di discontinuità è stata effettuata determinando l'orientazione di un piano nello spazio, definito dai seguenti parametri (figura 5):

- *Dip (inclinazione)*: questo parametro rappresenta l'angolo che il piano forma con l'orizzontale.
- *Dip direction (immersione)*: orientamento, rispetto ai punti cardinali, della linea di massima pendenza. In pratica l'immersione è l'angolo che tale linea, proiettata sull'orizzontale, forma con il Nord magnetico.
- *Strike (direzione)*: orientamento rispetto al nord della linea d'intersezione del piano con un piano orizzontale; la direzione è sempre perpendicolare alla sua immersione, quindi il suo valore varia di 90° rispetto al valore di immersione.

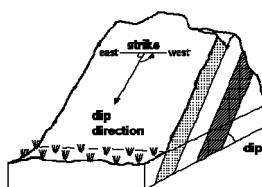


Figura 5 - Angoli mediante i quali è possibile caratterizzare l'orientazione delle discontinuità.

L'assetto di tali piani è stato ricavato secondo tre distinti metodi operativi (figura 6):

- Rilievo geomeccanico tradizionale, effettuato direttamente in campagna con l'utilizzo di bussola e clinometro;
- Metodo manuale sulla nuvola di punti proveniente dal rilievo TLS, realizzato con software *Polyworks* (Innovmetric, 2014);
- Metodo semiautomatico sulla nuvola di punti proveniente dal rilievo TLS, effettuato con l'utilizzo del software *Coltop3D* (Jaboyedoff et al., 2007).

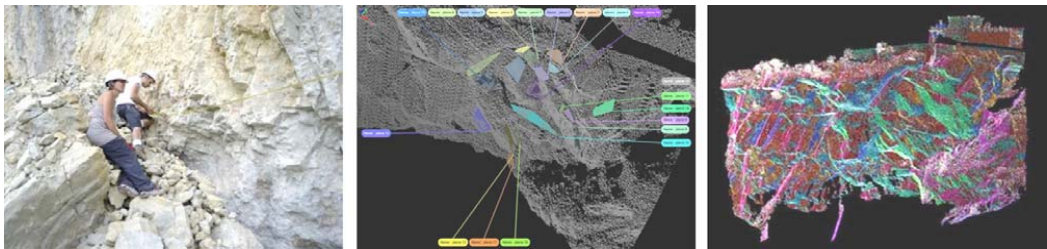


Figura 6 - Da sinistra a destra: metodo tradizionale, metodo manuale, metodo semiautomatico.

I risultati ottenuti dai primi due metodi sono stati riportati su opportune proiezioni stereografiche, che permettono di visualizzare ed interpretare i set di dati di riferimento della situazione tridimensionale indagata mediante una visione bidimensionale (vedi figura 7). Nello specifico, per le prime due metodologie adottate, i dati sono stati rappresentati su proiezioni stereografiche ricavate con l'ausilio del software *Dips* (Rocscience, 2014), mentre per il metodo semiautomatico si è utilizzata una rappresentazione propria del software *Coltop 3D*.

Confrontando le tre immagini è possibile osservare che i risultati ottenuti con il metodo tradizionale permettono l'individuazione solo di alcune delle famiglie di discontinuità, ed in particolare per lo più quelli alla base della parete e rilevabili quindi manualmente; le ricerche condotte invece sul modello tridimensionale hanno evidenziato anche la presenza di altre famiglie di piani che interessano l'intera porzione di parete indagata, fino ad altezze ben maggiori di quelle alle quali un operatore possa spingersi in condizioni normali e in sicurezza, senza l'ausilio di supporti adeguati.

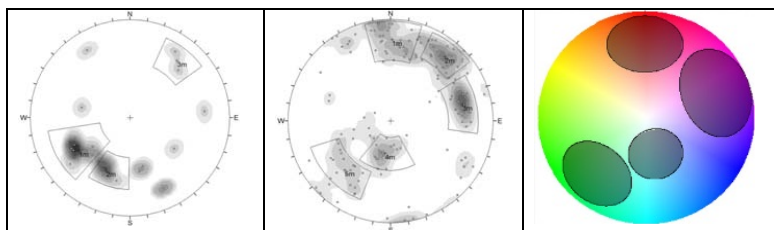


Figura 7 - Da sinistra a destra: risultati ottenuti con metodo tradizionale, manuale, semiautomatico.

Analisi cinematica: test di Markland

Sulla medesima area test è stata poi condotta l'analisi cinematica, sulla base dei parametri di assetto delle discontinuità identificati nella precedente fase di studio, del piano di interpolazione della porzione di parete indagata e dell'angolo di attrito del materiale roccioso.

In particolare, è stata valutata la possibilità che si verifichino i seguenti meccanismi di rottura:

- *Planar Slide*: si riferisce ad uno scivolamento planare di blocchi di roccia.
- *Wedge Slide*: si riferisce ad uno scivolamento di cunei di roccia.
- *Toppling*: si riferisce al caso di ribaltamento puro.

La descrizione della procedura esecutiva dell'analisi viene omessa, rimandando alle fonti bibliografiche (Rocscience, 2014). Poiché i parametri descrittivi delle discontinuità estratti sulla nuvola di punti sono molto simili ai fini dell'analisi cinematica, vengono presentati unicamente i risultati ottenuti con i dati desunti dal rilievo geomeccanico tradizionale e da quello manuale. Gli stereogrammi presentati nella figura 8 mostrano le famiglie di discontinuità che possono presentare criticità per ciascuno dei tre fenomeni sopra elencati.

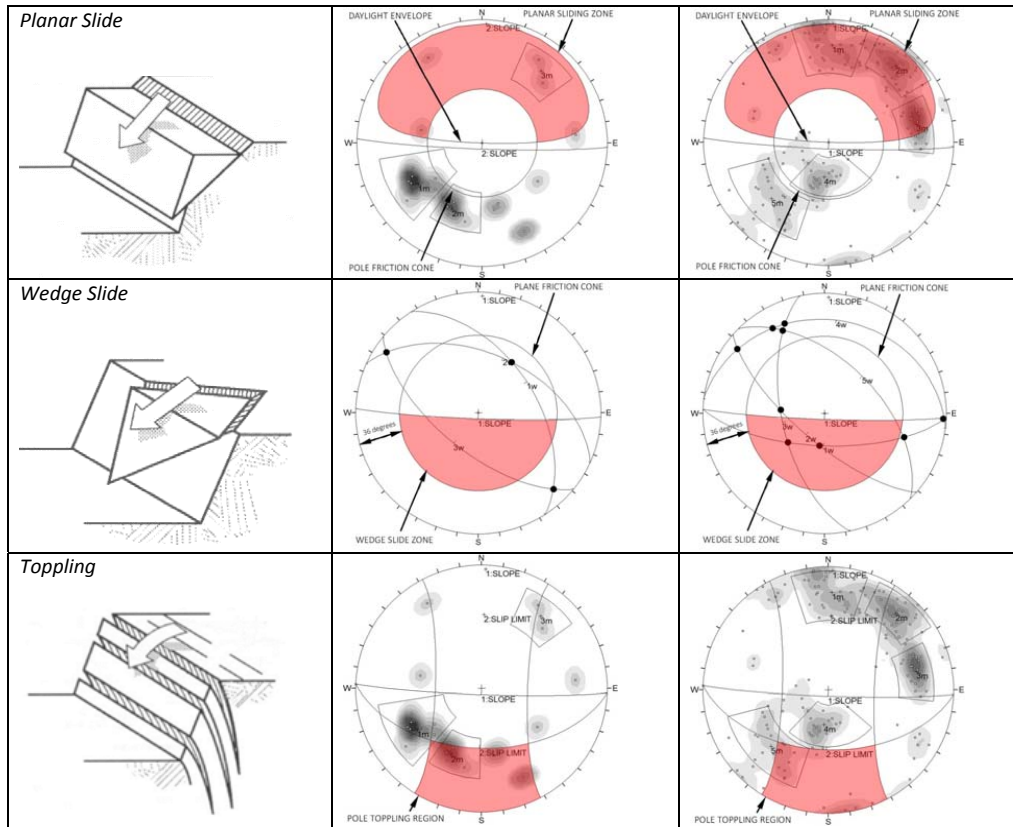


Figura 8 - Meccanismi di rottura esaminati (a sinistra), stereogrammi delle famiglie di discontinuità individuate con la metodologia tradizionale (al centro) e con il metodo manuale da TLS (a destra).

Nei riguardi del meccanismo *Planar Slide* si può notare come vi sia una famiglia di discontinuità individuata sia dal rilievo tradizionale che dalla metodologia basata da nuvola di punti; tuttavia quest'ultima è stata in grado di evidenziare due ulteriori famiglie di discontinuità rispetto alla metodologia tradizionale. Nei confronti del meccanismo *Wedge Slide*, si possono avanzare considerazioni analoghe a quelle del caso precedente, con la sola differenza che in base ai dati ottenuti con il rilievo geomeccanico tradizionale non si evidenziano punti che possano dare luogo a fenomeni di instabilità. Questo aspetto mette in luce la validità dell'analisi condotta sulla nuvola di punti che ha così permesso di porre attenzione su aspetti che altrimenti si sarebbero trascurati con i soli dati provenienti da rilievo tradizionale. Infine, nel caso del *Toppling* si nota come in entrambi i casi siano stati individuati piani di discontinuità simili ricadenti all'interno della zona di probabile ribaltamento. In questo caso, tale fenomeno, a differenza dei precedenti, risulta essere bene rappresentato anche da un campione di piani rilevabili in sito alla base della parete.

Conclusioni

L'esperienza condotta sul caso di studio della rupe di San Leo ha permesso di analizzare potenzialità e problematiche connesse all'utilizzo integrato di tecniche geomatiche per la produzione di modelli tridimensionali adatti ad analisi geologico/strutturali. Le scelte adottate per il rilievo e l'elaborazione dei dati hanno permesso di ottenere prodotti finali caratterizzati da elevata precisione e capacità descrittiva, sia grazie alla densità dei punti sia grazie alla disponibilità dell'informazione di colore; le nuvole di punti acquisite costituiscono un ricchissimo patrimonio informativo utilizzabile anche per eventuali successivi studi multi-disciplinari e/o multi-temporali.

Le analisi geologico-strutturali effettuate a partire dal modello tridimensionale hanno dato esito soddisfacente. Nelle zone direttamente accessibili anche con le tradizionali tecniche di rilievo geologico i parametri estratti sono equivalenti a quelli ottenuti dalle indagini in situ; sull'area test è stato possibile individuare ulteriori famiglie di discontinuità e potenziali instabilità anche in zone non direttamente accessibili in condizioni di sicurezza. L'integrazione tra le diverse tecniche si è rivelata molto utile per ottenere una descrizione completa dell'ammasso roccioso.

Sono in programma ulteriori indagini su alcuni aspetti relativi al legame fra la caratterizzazione e il formato del dato laser e le informazioni ottenibili dalle analisi geologiche. Tali considerazioni vogliono orientarsi anche e soprattutto alla riduzione dei tempi di elaborazione dei dati e di conseguenza all'onerosità di tali approcci.

Bibliografia

- Benedetti G, Bernardi M, Bonaga G, Borgatti L, Continelli F, Ghirotti M, Guerra C, Landuzzi A, Lucente CC, Marchi G. (2013), "San Leo: centuries of coexistence with landslides", *Landslide Science and Practice*, 6: 529-528.
- Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A. (2004), "Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies". *The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV, Part B, 246-251.
- Borgatti L, Vittuari L, Zanutta A. (2010), "Geomatic methods for punctual and areal control of surface changes due to landslide phenomena", in: "Landslides: Causes, Types and Effects", Hauppauge, NY, Nova Science Publishers Inc., 133-176.
- Borgatti L, Guerra C, Nesci O, Romeo RW, Veneri F, Benedetti G, Landuzzi A, Marchi G, Lucente CC (2015), "The 27th February 2014 San Leo rock fall (northern Italy)", *Landslides*, 12, 2, 387-394.
- D'Ambra S, Giglio G, Lembo-Fazio A. (2004), "Interventi di sistemazione e stabilizzazione della Rupe di San Leo", X Congress Interpraevent 2004, Riva del Garda, 2, 4: 103-114.
- InnovMetric Software (2014), Polyworks version 2014, Quebec City, Canada (<http://www.innovmetric.com/>).
- Jaboyedoff M, Metzger R, Oppikofer T, Couture R, Derron M-H, Locat J, Turmel D. (2007), "New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software". In: Eberhardt E, Stead D & Morrison T (Eds.), *Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and demands*, 1, 61-68.
- Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, Derron MH, Loye A, Metzger R, Pedrazzini A. (2010), "Use of LIDAR in landslide investigations: a review", *Natural Hazards*, 61: 5-28.
- Rocscience (2014), Dips version 6.0, Rocscience Inc., Toronto, Canada (<https://www.rocscience.com>).
- Spreafico MC, Girelli VA, Lucente CC, Tini MA, Bitelli G, Borgatti L. (2014), "Terrestrial laser scanner point clouds for landslide hazard assessment in the cliff of San Leo (northern Apennines, Italy)", 9° Convegno Nazionale del Gruppo di Geologia Informatica, Montefalco (PG).
- Spreafico MC, Francioni M, Cervi F, Stead D, Bitelli G, Ghirotti M, Girelli VA, Lucente CC, Tini MA, Borgatti L. (2015a), "Back Analysis of the 2014 San Leo Landslide Using Combined Terrestrial Laser Scanning and 3D Distinct Element Modelling", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI: 10.1007/s00603-015-0763-5.
- Spreafico MC, Perotti L, Cervi F, Bacchetti M, Bitelli G, Girelli VA, Mandanici E, Tini MA, Borgatti L. (2015b), "Terrestrial remote sensing techniques to complement conventional geomechanical surveys for the assessment of landslide hazard: the San Leo case study (Italy)", *European Journal of Remote Sensing* (in print).