

# Rapporti tecnici

## INGV

**Misure geomeccaniche e di  
telerilevamento per la caratterizzazione  
di una parete rocciosa**

# 286



## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)

Luigi Cucci (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM1)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Marcello Vichi (INGV - BO)

Sara Barsotti (INGV - PI)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (Seconda Università di Napoli, INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 095 7165851

redazionecen@ingv.it

# Rapporti tecnici INGV

## MISURE GEOMECCANICHE E DI TELERILEVAMENTO PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UNA PARETE ROCCIOSA

Stefano Miele<sup>1</sup> e Arianna Pesci<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Bologna (Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali)

<sup>2</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

# 286



## **Indice**

Introduzione	7
1. Breve descrizione dell'area di studio	7
2. Misure geomeccaniche in situ e dati estratti dal TLS	10
3. Il rilievo laser scanning e l'analisi dati	13
4. Ispezione del modello TLS ed estrazione dati: famiglie e giaciture	17
5. Cinematismo e verifica di stabilità	21
6. Conclusioni	23
Ringraziamenti	23
Bibliografia	24



## Introduzione

Il laser scanning è una tecnologia ormai ampiamente diffusa sia nell'ambito della ricerca che in quello professionale. Esistono gamme estremamente differenti di strumenti ma tutti sono accumulati dalla possibilità di fornire, in tempi rapidi e con grande accuratezza e dettaglio, densi insiemi di punti le cui coordinate sono misurate nell'ambito di ogni singola scansione [Sgrenzaroli e Vassena, 2007]. In linea generale è possibile affermare che questa tipologia di strumenti è caratterizzata dalla capacità di inviare segnali laser secondo una griglia angolare calibrata e di investire così interamente una superficie fisica di interesse. Per ogni direzione di invio il sensore misura il tempo impiegato dal segnale nel tragitto strumento-oggetto-strumento da cui è immediato il calcolo della distanza e, noti gli angoli di invio, è altresì immediato collocare in modo preciso il punto investito dal raggio laser nello spazio 3D. Si tratta di un sistema di riferimento relativo il cui centro è il centro strumentale e che può essere poi in un secondo tempo roto-traslato in sistemi esterni di qualsivoglia tipo [Rinaudo, 2003]. Di fatto, l'acquisizione è una vera e propria scansione secondo linee orizzontali e verticali ognuna consistente in un insieme di punti misurati/calcolati in modo ordinato in base al principio meccanico e ottico di funzionamento dello specifico strumento: si tratta di meccanismi ad alta precisione realizzati per deflettere il raggio laser secondo, appunto, una griglia angolare calibrata e regolare che, in caso di misura effettuata da una posizione più o meno frontale, permette di ottenere una nuvola di punti caratterizzata da un passo di campionamento pressoché costante su tutta l'area scansionata. Questo tipo di rilievo, cui si rimanda il lettore alla ampia bibliografia, risente delle condizioni atmosferiche e degli ostacoli fisici che possono letteralmente occludere l'area da osservare creando delle zone d'ombra (o gap) nella nuvola di punti. Per questo motivo, nella programmazione dei rilievi sia terrestri che da piattaforma mobile (terrestre o aerea) di aree fortemente vegetate si prediligono i mesi invernali al fine di limitare al massimo gli effetti negativi causati dalla presenza di tali ostacoli naturali. Questo lavoro, che nasce dalle esperienze di rilievo e lavoro effettuate nell'ambito di una tesi di laurea magistrale, frutto della collaborazione tra INGV ed il Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali dell'Ateneo di Bologna, mostra l'impiego della tecnologia Optech ILRIS ER [Optech, 2006] nel rilievo e analisi di un affioramento roccioso nell'Appennino bolognese, al fine di una completa caratterizzazione morfologica e geomeccanica dello stesso.

L'idea è stata quella di realizzare uno studio geomeccanico avvalendosi non soltanto delle misurazioni classiche in situ (acquisite scendendo in corda sulla parete) ma anche navigando virtualmente nelle nuvole di punti ed estraendo i parametri necessari al fine di una migliore comprensione fisico-meccanica dell'ammasso roccioso. L'oggetto di studio si trova nel basso Appennino Emiliano, appena oltrepassata la frazione di Pioppe di Vergato e appare come un affioramento in roccia isolato, dall'aspetto massivo. Su questo elemento paesaggistico si è focalizzato lo studio, in previsione dell'allestimento di una "palestra di roccia" per la pratica dell'arrampicata sportiva e in particolare del Paraclimbing ([www.federclimb.it](http://www.federclimb.it)). Le condizioni di sicurezza per gli arrampicatori, ed in particolare per quelli portatori di handicap, devono essere esaminate con particolare attenzione, ragion per cui sono stati effettuati rilievi geomeccanici in situ, rilievi terrestri laser scanning (TLS) ed analisi cinematiche per fornire indicazioni e dati su cui basare eventuali valutazioni dei rischi geomorfologici per l'arrampicata sportiva [Motta et al., 2009].

L'utilizzo del TLS ha fornito la restituzione sia delle nuvole di punti che di un modello digitale del terreno (DTM) sul quale è stato possibile effettuare osservazioni generali dell'ammasso e comparative con i dati provenienti dal rilievo geomeccanico in situ, per quanto riguarda la giacitura delle discontinuità ed il loro raggruppamento in famiglie. Inoltre l'analisi del modello digitale ha permesso di visualizzare e successivamente quantificare i parametri di spaziatura e persistenza delle famiglie presenti nell'ammasso roccioso, parametri in questo caso difficilmente determinabili con le tecniche standard di rilievo.

### 1. Breve descrizione dell'area di studio

L'area di studio si trova in località Casalino, tra Pioppe (direzione Nord) e Calvenzano (direzione sud), circa 250 metri a Ovest dell'Agriturismo "Le Piane" (Fig. 1), e identificato al Foglio 28, Mappale 157 del Catasto del Comune Vergato (BO). La parete rocciosa, oggetto della tesi, è raggiungibile dalla SS64 "Porrettana", in corrispondenza del km 61 IV, da cui dista circa 60 metri. Partendo da Bologna e viaggiando verso sud, sulla sinistra idrografica del fiume Reno, di fronte al Monte Sole, nella seconda fascia collinare bolognese e a ridosso dell'orizzonte submontano (solo localmente si oltrepassano i 600 m s.l.m.), si trova

un'area aspra, dirupata e boscosa in cui si riconoscono gli affioramenti rocciosi, spesso dai colori diversi, che rivelano una complessa ossatura geologica.



Figura 1. Mappa geografica e foto dell'ammasso roccioso (estate 2013).

La zona rientra nella porzione meridionale del Sito di Importanza Comunitaria (SIC) IT4050014 di "Monte Radicchio, Rupe di Calvenzano" (BO), con una superficie di 1.300 ha, appartenente alla fascia collinare e ambiente prevalentemente roccioso calcarenitico (Fig. 2).

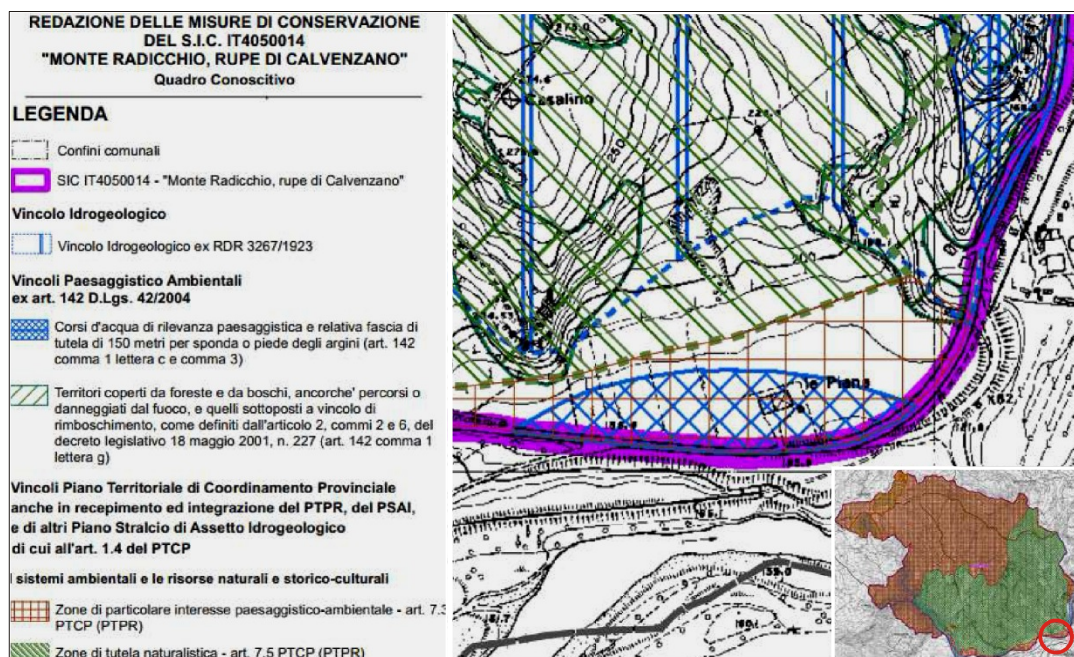
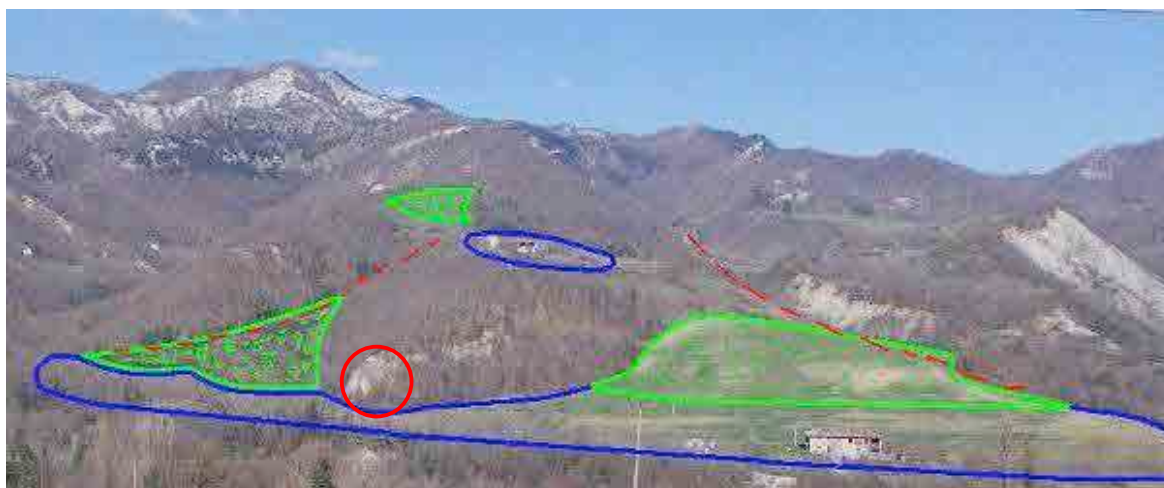


Figura 2. S.I.C. IT4050014 "Monte Radicchio, rupe di Calvenzano", estratto dalla carta dei vincoli.

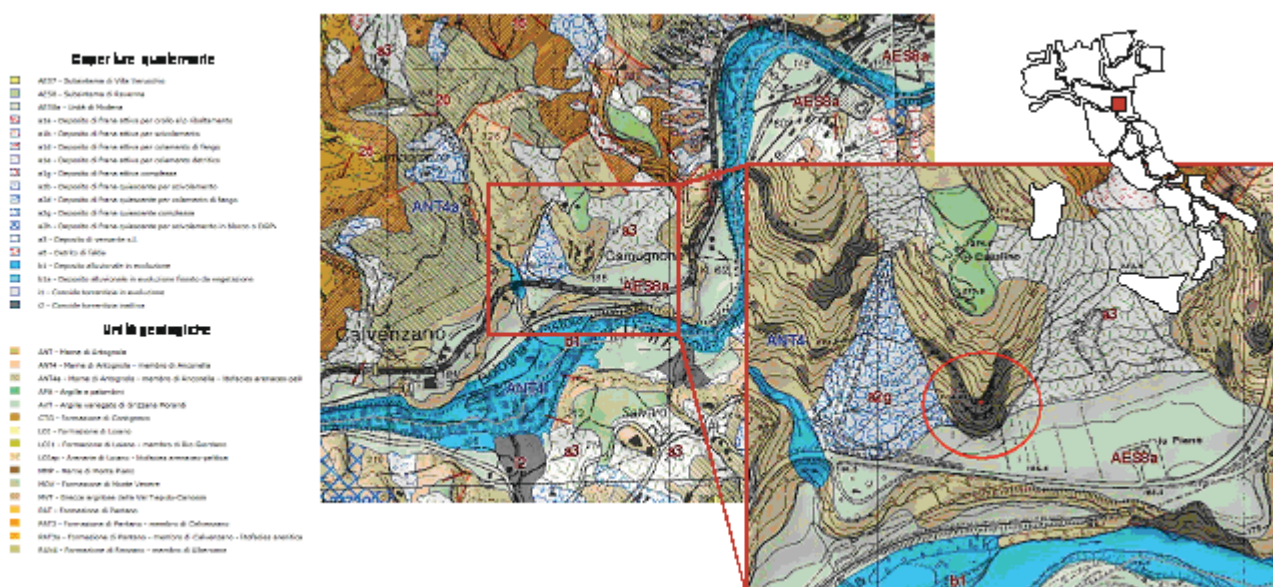


Osservando i rilievi collinari è possibile riconoscere la presenza di rocce a diversa “durezza”, sulle quali gli agenti atmosferici hanno modellato un paesaggio dalle forme spesso contrastanti. I profili dei versanti e dei crinali aiutano a identificare le rocce più resistenti all'erosione; in loro corrispondenza i pendii sono più ripidi, spesso boscati e nelle parti più ripide è talora visibile la roccia.

L'Appennino settentrionale è, come noto, una catena a falde caratterizzata, come ogni catena orogenica, dalla sovrapposizione di porzioni degli elementi paleogeografici più interni su quelli più esterni, rispetto alla polarità della deformazione. L'area di studio è interamente occupata da corpi rocciosi appartenenti alla falda sommitale dell'intero edificio orogenico, formatesi a seguito della sovrapposizione tettonica di coperture sedimentarie appartenenti a vari domini paleogeografici durante la fase di subduzione ensialica (subduzione di tipo A, [Bally et alii, 1985]); questa falda corrisponde alle Liguridi ed alle unità litostratigrafiche su di queste sedimentatisi (depositi epiliguri e depositi neogenici del margine padano). La parete rocciosa, oggetto del nostro interesse, è delimitata, ad est e a ovest, da due valli, presumibilmente di origine tettonica, lungo le quali affiorano depositi di versante, un deposito di versante eluvio-colluviale (a3) e un accumulo di frana quiescente complessa (a2g), quest'ultimo composto da materiale eterometrico ed eterogeneo, con ciottoli che arrivano fino a 0.5 m di diametro in una matrice da fine a grossolana (vedi Fig. 3, Fig. 4 e legenda).



**Figura 3.** Panoramica parete rocciosa (cerchiata in rosso). In blu: terrazzi alluvionali di ordine diverso; in verde a pallini grossi: fenomeni gravitativi di versante quiescenti; in verde a trattini: deposito eluvio colluviale inattivo; in rosso: linee di faglia presunta.



**Figura 4.** Foglio 237 “Sasso Marconi” della Carta Geologica d’Italia, scala ritaglio 1:6.000; si distinguono la parete rocciosa (cerchio rosso), i depositi gravitativi e i terrazzi alluvionali.

## 2. Misure geomeccaniche in situ e dati estratti dal TLS

Il rilievo geomeccanico è stato realizzato seguendo una procedura ben definita in relazione alle caratteristiche geomeccaniche delle discontinuità come indicate nelle norme ISRM [1978]. I dati sono stati acquisiti mediante una discesa in corda con la tecnica della “corda doppia” che ha permesso la discesa in sicurezza lungo pareti verticali di più operatori contemporaneamente. Infatti l'uso di due corde o di una sola corda doppiata, oltre a garantire un maggiore attrito e quindi un maggior controllo della discesa, consente l'utilizzo di entrambe le braccia (Fig. 5).

Mediante il rilevamento geomeccanico in corda, sono stati acquisiti i seguenti parametri di (i) orientazione della discontinuità, (ii) rugosità, (iii) resistenza, (iv) apertura, (v) spaziatura e (vi) persistenza. L'orientazione delle discontinuità è definita da direzione e inclinazione della linea di intersezione tra la superficie da misurare ed un piano orizzontale; la rugosità si riferisce alle irregolarità delle superfici di rottura nella direzione di scivolamento e in quella perpendicolare a essa; la resistenza a compressione uniaassiale della roccia corrisponde al carico di rottura di un provino sottoposto ad una forza verticale in assenza di confinamento laterale e, in questo caso, è stata misurata tramite prove sclerometriche; l'apertura è definita come la distanza perpendicolare che separa le due superfici di una discontinuità; la spaziatura e la persistenza delle famiglie di discontinuità, sono stati stimati dal modello TLS, come vedremo nel paragrafo successivo mediante una ispezione geometrica della nuvola di punti.







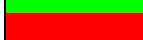

**Figura 5.** L'operatore mentre si cala ed effettua le misure in sosta sulla parete assicurato con la doppia cordatura.

La fase di elaborazione dei dati geomeccanici ha lo scopo di definire le principali famiglie di discontinuità presenti nell'affioramento e di attribuire a ciascuna di esse i valori rappresentativi per la loro caratterizzazione. Preliminarmente al rilievo geomeccanico, sono state valutate l'altezza e la lunghezza dell'affioramento e, naturalmente, la giacitura del versante. L'elaborazione delle misure effettuate in campagna e quelle ottenute a posteriori sul modello di TLS, hanno consentito di caratterizzare compiutamente l'ammasso roccioso. A causa della struttura massiva dell'ammasso roccioso [ISRM, 1978], le caratteristiche di spaziatura e persistenza non sono state raccolte durante il rilevamento in corda ma sono state calcolate direttamente sul modello ottenuto con i dati laser scanning, che sono descritti nei paragrafi successivi, con ottimi risultati sia dal punto di vista quantitativo sia da quello qualitativo.

Nel corso del rilevamento geomeccanico in corda sono state misurate 34 discontinuità, distribuite in 5 discese, a cui se ne sommano altre 14, rilevate nell'intorno dell'affioramento e di cui è stata misurata solo la giacitura (Strike e Dip). Il riconoscimento dei principali sistemi di discontinuità è stato ottenuto con la proiezione dei dati di giacitura in emisfero inferiore equiareale, utilizzando la versione 6.0 del programma "Dips" di Rocscience ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)). I poli di tutti i piani sono stati raggruppati in insiemi con orientamento medio comune al fine di definire l'orientazione delle famiglie principali (o set) delle discontinuità rilevate e tramite una procedura semiautomatica, la distribuzione dei poli di ogni set è stata rappresentata sotto forma di isodense percentuale di poli, in cui il punto centrale di isodensa a maggiore valore può essere assunto come polo rappresentativo dell'orientazione media di una determinata famiglia di discontinuità (Tab.1 a-b). Dal raggruppamento dei poli è stato possibile determinare numero e giacitura delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, espressa con una giacitura media rappresentativa di ogni famiglia; nello stereodiagramma è stato inoltre inserito il piano del versante come ciclografica (Fig. 6).

N°	Strike (°)	Dip (°)	Famiglia	N°	Strike (°)	Dip (°)	Famiglia
1	270	85	1	24	140	65	3
2	265	70	1	25	145	50	3
3	85	80	1	26	150	45	3
4	85	80	1	27	140	50	3
5	265	85	1	28	140	65	3
6	265	85	1	29	145	55	3
7	265	85	1	30	140	55	3
8	265	80	1	31	145	60	3
9	225	60	2	32	145	60	3
10	45	90	2	33	145	45	3
11	225	90	2	34	280	25	4
12	215	82	2	35	250	20	4
13	50	80	2	36	260	25	4
14	220	85	2	37	210	20	4
15	225	65	2	38	235	12	4
16	50	85	2	39	250	25	4
17	210	75	2	40	210	20	4
18	55	65	2	41	265	8	4
19	55	65	2	42	63	8	5
20	210	90	2	43	100	5	5
21	60	50	2	44	75	25	5
22	60	50	2	45	80	25	5
23	50	85	2	46	75	20	5
				47	70	15	5
				48	85	15	5

a)

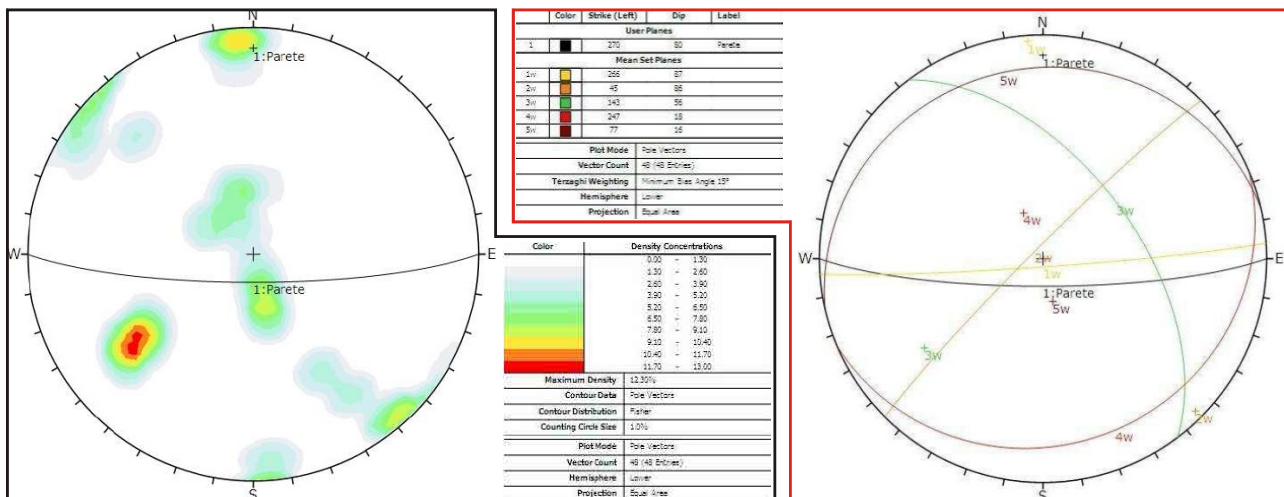
N° Famiglia	Strike Medio (°)	Dip Medio (°)	Colore
Versante	270	80	
J1	266	87	
J2	45	86	
J3	143	56	
J4	247	18	
J5	77	16	

b)

**Tabella 1.** a) Giacitura delle discontinuità per famiglia di appartenenza; b) famiglie di discontinuità riconosciute con "Dips" con relative indicazioni di strike, dip e colori.

Dal confronto tra i profili tipo proposti da Barton & Choubey [1977] e quelli realizzati sui piani di discontinuità rilevati in parete, è stato assegnato ad ognuno un coefficiente di rugosità JRC e calcolato successivamente il valore medio. I valori di scabrezza ottenuti sono compresi tra 10 e 12 e indicano delle superfici ondulate con curvatura elevata a grande scala, con rugosità importante.

In merito alla resistenza ogni serie di misure consiste in 10 prove sclerometriche sulla superficie di discontinuità naturale (r) e in 10 prove su superficie levigata (R) manualmente per mezzo di una apposita pietra abrasiva. Per ogni gruppo di 10 determinazioni sono quindi scartati i 5 valori più bassi e la media viene effettuata sui restanti 5 valori di rimbalzo. In seguito alle normali procedure di calibrazione e verifica [Barton & Choubey, 1977] si sono ottenuti, per ogni serie di 10 misure, un valore di JCS rappresentativo di quella discontinuità che assieme a quelle appartenenti ad una stessa famiglia ne restituiranno un valore medio rappresentativo JCS (r) e JCS (R) rispettivamente per superfici naturali e levigate (Tab. 2) ed in riferimento al valore di JCS (r) medio ottenuto per il giunto naturale, si può ottenere la classe e la descrizione del tipo di roccia (tabella del “Manual index test”, [ISRM, 1978]) che nel caso specifico è una “roccia mediamente resistente” (R3: “Non può essere ne scalfita ne graffiata dal coltello. Un campione può fratturarsi con un singolo colpo di martello”).



**Figura 6.** Elaborati “Dips”: a) stereo diagramma rappresentazione equiareale delle isodense rappresentative dei poli relativi ai piani di discontinuità e ciclografica rappresentativa della parete; b) stereogramma proiezione equiareale dei grandi cerchi relativi alle giaciture delle 5 famiglie di discontinuità riconosciute: la stratificazione (in rosso) e il versante (in nero).

Famiglia	Giacitura (°)/(°)	JCS (r)	JCS (R)
J1	266/87	27	31
J2	45/86	24	29
J3	143/56	24	26
J4	247/18	24	28
J5	77/16	27	30
Valori medi		25	29

**Tabella 2.** Valori medi Di JCS (r) e JCS (R) relativi alle 5 famiglie di discontinuità.

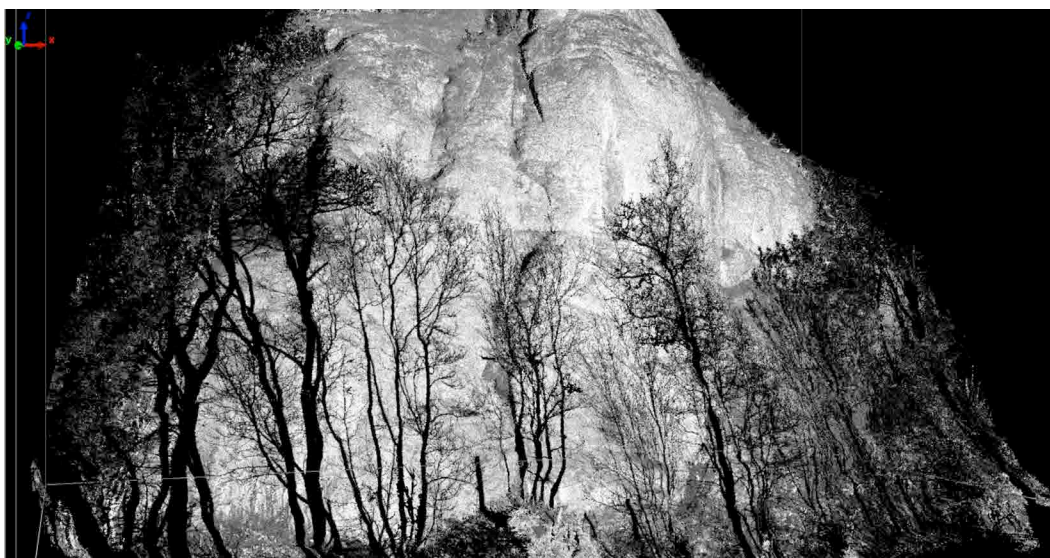
### 3. Il rilievo laser scanning e l'analisi dati

Le misure TLS sono state realizzate mediante lo strumento ILRIS ER (Optech) dopo un sopralluogo per valutare le condizioni ambientali e geometriche che caratterizzano l'area di rilievo: si è preso atto della presenza di una fitta vegetazione nella parte bassa della parete da misurare. Si è quindi deciso di effettuare tre scansioni da punti di vista differenti al fine di minimizzare il rumore e soprattutto le "ombre" (data loss) causate da alberi e arbusti interposti tra il target e lo strumento. Si è scelto di effettuare il rilevamento durante la stagione invernale per permettere alla vegetazione di diradarsi, nel nostro caso, agli alberi di perdere tutto il fogliame che, nella stagione primaverile e estiva, avrebbe ostacolato totalmente il rilevamento (Fig. 7).

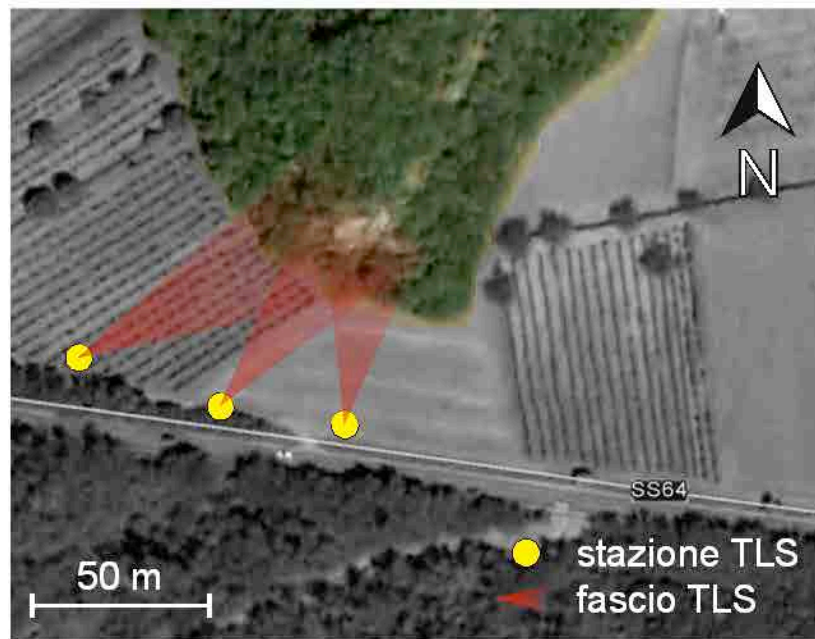
Anche in condizioni invernali con un contributo più rado di vegetazione gli ostacoli della stessa risultano nelle scansioni come veri e propri effetti ombra e cioè aree di dato mancante. Nella nuvola di punti rappresentata in figura 8 si nota come la presenza degli alberi crei dei vuoti dalle forme allungate e snelle che richiamano fusti, rami e fogliame. Per questo motivo, al fine di ricostruire l'intera parete d'interesse nel modo più completo possibile cercando di riempire ogni buco di informazione e lavorare poi, successivamente, su un modello realistico in tutte le sue parti, è stata pianificata una campagna di misura basata su 3 scansioni da 3 punti differenti nell'intorno della parete ad una distanza utile per garantire un buon risultato (Fig. 9).



**Figura 7.** La vegetazione in prossimità della parete rocciosa in estate ed in inverno. Si osservano, nel secondo caso, condizioni migliori per la misura.

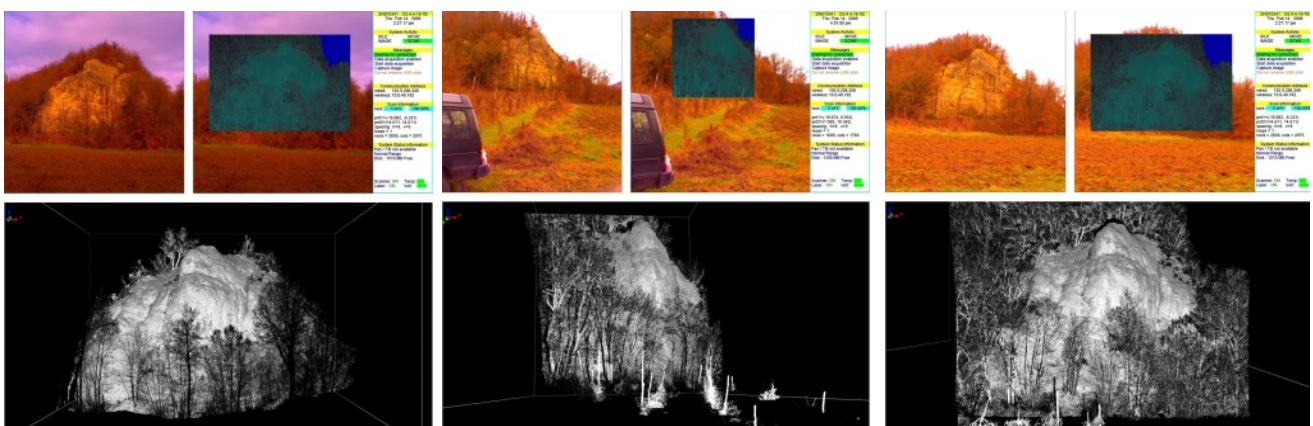


**Figura 8.** Nuvola di punti della parete acquisita in presenza di una, seppure rada, vegetazione sottostante.



**Figura 9.** Vista aerea dell'area di interesse e dei 3 punti di stazione TLS. In rosso la zona spazzata dal fascio laser (ROI).

Le tre scansioni sono state effettuate da una distanza compresa tra 50 m e 100 m rispetto alle parti più alte e lontane della parete rocciosa ed è stato scelto un passo di campionamento di circa 1.8 cm a 100 m in accordo con le informazioni tecniche riportate nelle tabelle fornite dai costruttori che indicano in maniera esaustiva le dimensioni (diametro) dello spot ovvero dell'impronta a terra del fascio laser ad una determinata distanza (range) ed il passo di campionamento (minimo) raggiungibile e che può essere sottocampionato direttamente tramite l'interfaccia strumento utente [Optech, 2006]. La scelta di non infittire eccessivamente le misure nasce dal fatto che, secondo quanto programmato, la nuvola di punti finale e complessiva derivata dall'unione delle 3 sarebbe potuta risultare inutilmente sovra campionata con un contenuto inutile di informazione da rimuovere poi nelle fasi di post-processing. Nella figura 10 sono mostrate le 3 scansioni sia in termini di nuvole di punti delle coordinate misurate che in termini operativi mostrando l'area rilevata e la ROI (Rate Of Interest) selezionata mediante l'interfaccia scanner-utente al momento dell'avvio della misura.



**Figura 10.** Le tre scansioni effettuate secondo lo schema in figura 9.

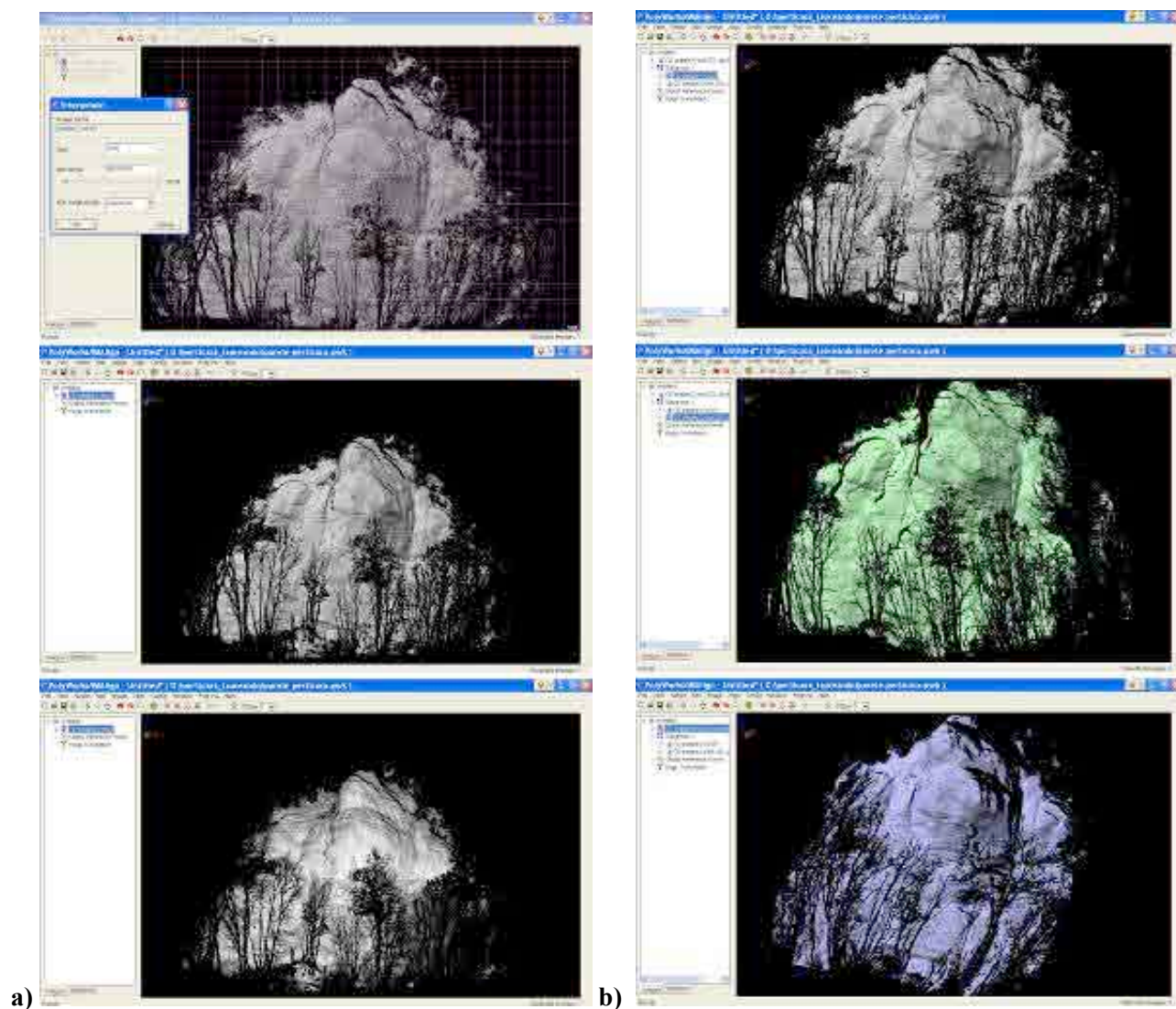
Per ottenere informazioni utili dalla grande quantità di dati derivanti da una sessione di rilievo TLS è necessaria un'adeguata metodologia di processamento che consiste in diverse fasi, che possiamo suddividere,

per semplificare al massimo, in tre passi fondamentali [Remondino, 2003]: preprocessamento; allineamento delle nuvole di punti e generazione del modello digitale; analisi e ispezione dei dati. Nel prosieguo si mostreranno i risultati ottenuti con l'utilizzo del software Polyworks di Innovmetrics [2012].

Il preprocessamento consiste principalmente nella pulizia e filtraggio dei dati e nella loro registrazione, anche detto editing. La pulizia e filtraggio dei dati è spesso un'operazione necessaria per rimuovere gli ostacoli presenti al momento del rilievo quali vegetazione, veicoli, persone, in modo tale che il rumore del rilievo dipenda esclusivamente dalle caratteristiche tecniche dello strumento. Si tratta di un'operazione eseguita in maniera semiautomatica, selezionando con un apposito strumento gli elementi della nuvola di punti che non sono utili ai fini del progetto. Nel nostro caso si è proceduto all'eliminazione della vegetazione sulle 3 nuvole di punti ottenute dalle tre scansioni andando a riconoscere gli elementi da eliminare sia per la forma che per l'intensità.

Le tre nuvole di punti, pulite, sono state importate in un modulo di allineamento (IMALIGN di Polyworks) mediante il quale è possibile creare un DTM (Digital Terrain Model), andando a definire il passo della griglia opportuno per le operazioni successive necessarie ad operare l'allineamento dei dati, e cioè a definire i parametri delle matrici di rototraslazione per il cambio dei sistemi di riferimento relativi e la creazione di una unica e completa nuvola di punti [Bergevin et al., 1996].

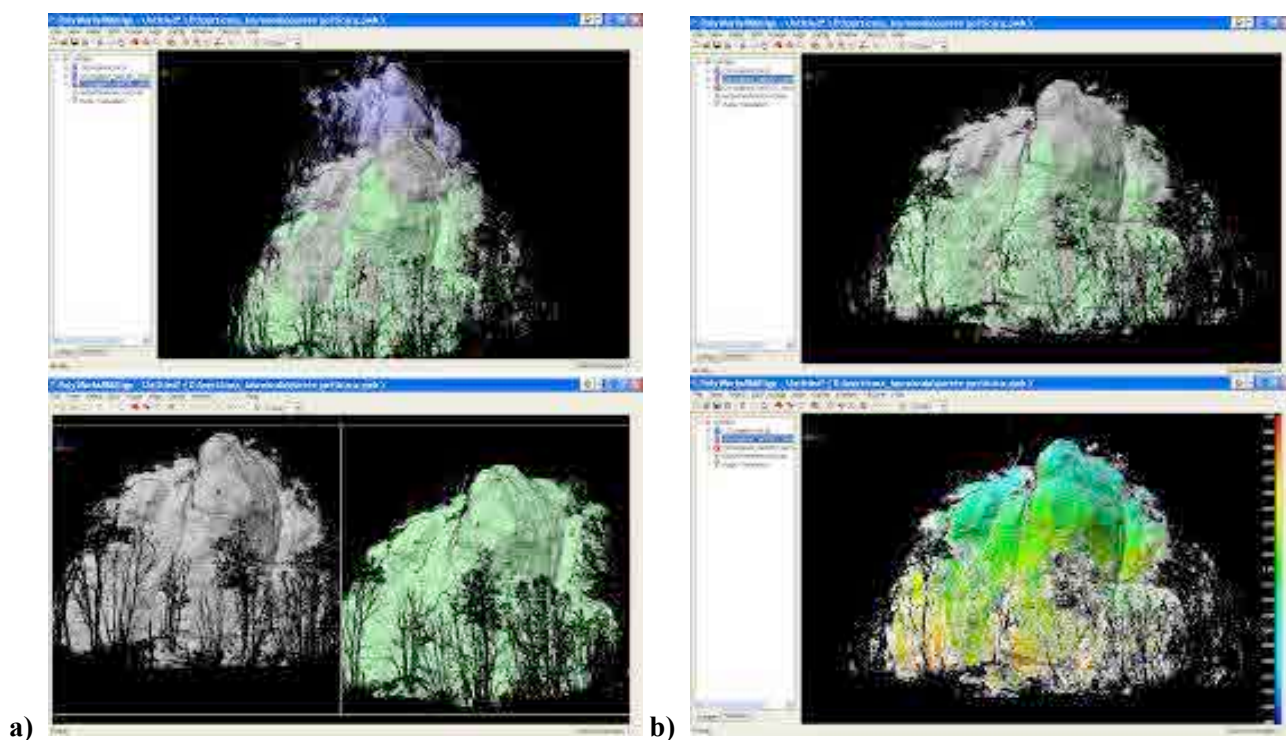
Nel caso mostrato in figura 11 è stato creato un DTM relativo alla scansione 1 con un passo della griglia di 2 cm. Ripetendo l'operazione per le tre nuvole di punti, otterremo i corrispondenti 3 modelli digitali del terreno (DTM) in 3 sistemi di coordinate diverse e che chiameremo per comodità DTM1 (grigio), DTM2 (verde), DTM3 (violetto).



**Figura 11.** a) La creazione di un modello digitale (DTM) mediante il modulo IMALIGN di Polyworks; b) I modelli digitali (DTM) delle tre scansioni.

I DTM 1, 2 e 3, si riferiscono a 3 scansioni acquisite in maniera indipendente e da tre punti di stazione differenti. Ricordando che ogni scansione viene rappresentata come un insieme di coordinate (x,y,z) in un sistema relativo di riferimento, quando importate risultano accavallate le une alle altre e la loro unione diretta darebbe vita ad un modello irreali e distorto che per nulla restituisce le reali geometrie della parete rocciosa rilevata. Per questo, successivamente alla creazione dei DTM si procede con una prima operazione di allineamento che utilizza punti comuni ai modelli scelti a coppie detti punti omologhi. Di fatto questo si traduce in una procedura ai minimi quadrati che vada a minimizzare le differenze tra le coordinate dei punti permettendo di ottenere i migliori parametri per la matrice di roto-traslazione utilizzata per “spostare” il DTM 2 sul DTM 1. questa operazione, ovviamente, implica la trasformazione del sistema di riferimento 2 nel sistema di riferimento 1.

A livello pratico, il modulo IMAlign permette, mettendo a confronto il DTM1 e il DTM2 in una interfaccia comoda ed intuitiva, di scegliere alcuni punti omologhi tra i due modelli che il software poi utilizzerà per la rototraslazione. A prescindere da una scelta più o meno oculata dei punti (quantità e distribuzione sulle aree in comune alle scansioni) il tipo di allineamento che ne deriva viene considerato grezzo ed approssimativo. Una rapida occhiata alla figura 12 permette già in partenza di notare la prevalenza del colore di una scansione sull'altra (grigio e verde) mentre, nel caso di allineamento ben riuscito ci si aspetterebbe una sorta di “macchia di leopardo” a sottolineare la buona unione e le differenze casuali tra i due modelli.



**Figura 12.** a) I tre modelli (DTM) prima dell'allineamento: sovrapposti poiché relativi a 3 differenti sistemi di riferimento; b) i due modelli allineati con il metodo dei punti omologhi per ottenere i parametri di rototraslazione e relativa mappa delle differenze.

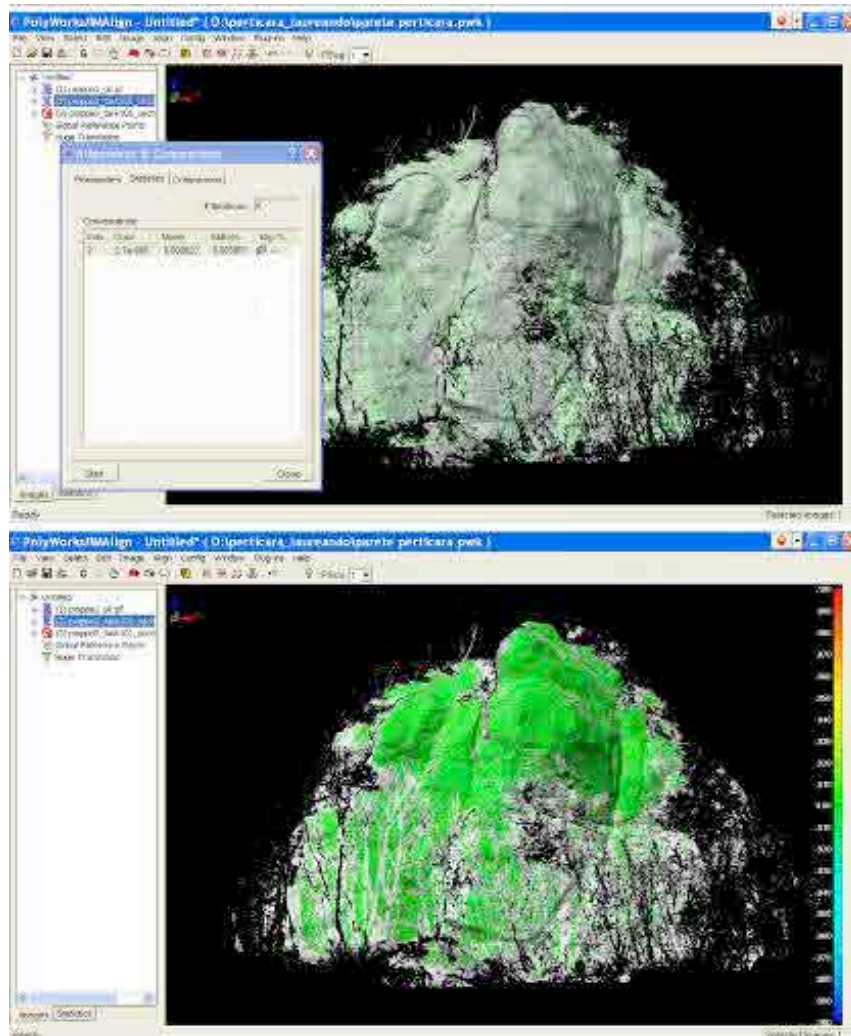
È interessante notare la mappa delle differenze (figura 13b) che mette in evidenza i sistematismi presenti con una colorazione progressiva procedendo dal basso verso l'alto del prospetto ad indicare che una scansione è leggermente “tiltata” rispetto all'altra (complessivamente 10 cm).

Al fine di ottenere un buon allineamento, si procede con l'applicazione di algoritmi, integrati nel modulo IMAlign di Polyworks, di surface matching. Si tratta cioè di algoritmi ICP (Iterative Closest Point) che utilizzano l'intera informazione geometrica delle parti comuni ai due modelli e, mediate operazioni successive, vanno a “spalmare” un modello sull'altro tenendo in considerazione la curvatura delle superfici quindi andando a cercare i migliori parametri di roto-traslazione che adattano al meglio le normali degli elementi di superficie oltre alla distanza tra i punti. Il risultato sarà un modello allineato “a macchie di leopardo” cioè in cui i colori



dei 2 modelli presi in considerazione sono perfettamente allineati e la mappa delle differenze sarà priva di sistematismi e concentrata su piccoli valori [Bergevin, 1996; Innovmetric, 2012].

L'allineamento è la fase più importante dell'elaborazione dati TLS in quanto è la sola procedura possibile per unire tutte le informazioni geometriche del rilievo senza degradare il risultato. In un lavoro di questo tipo in cui lo scopo finale è quello di utilizzare il modello digitale come parete virtuale su quale fare le misure geotecniche è fondamentale avere un dato denso, completo e privo di "distorsioni" cioè la cui geometria è corretta per fornire una rappresentazione accurata e realistica della parete reale.

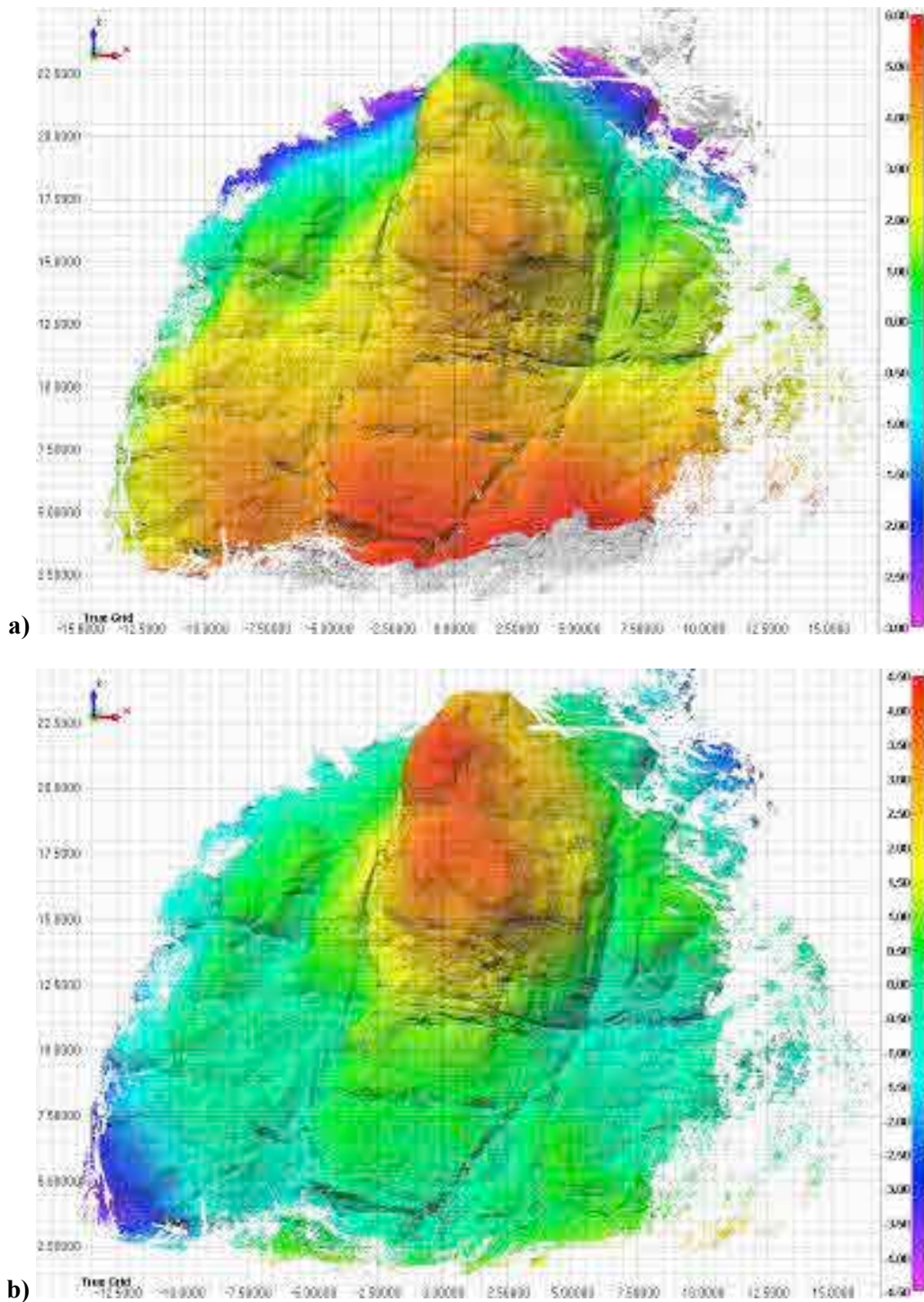


**Figura 13.** Modelli allineati con ICP: a) colorazione dell'oggetto e b) mappa delle differenze tra i due modelli.

#### **4. Ispezione del modello TLS ed estrazione dati: famiglie e giaciture**

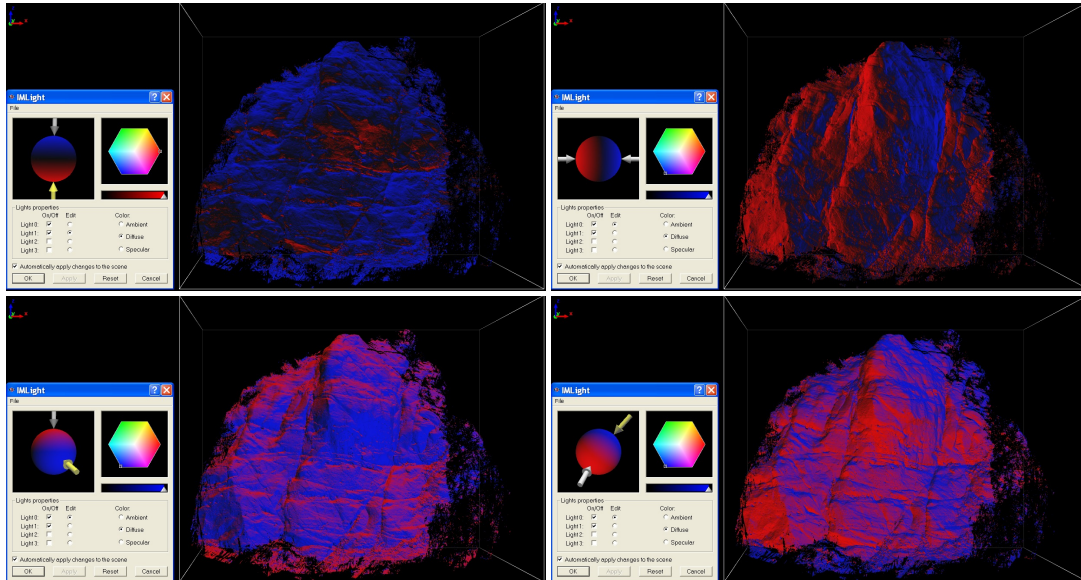
Complessivamente la parete può essere studiata mediante l'osservazione delle mappa delle differenze punto-piano che corrispondono alla distanza dei punti del prospetto roccioso con un piano di riferimento. In figura 14a è visibile la morfologia della parete rocciosa rispetto ad un piano immaginario che taglia in senso verticale l'intero affioramento roccioso (scala -3/+6): in rosso sono evidenziate le zone che più si distanziano in senso positivo, mentre in fuxia quelle più interne all'affioramento. La morfologia della parete affiorante mostra chiaramente i segni di distacchi pregressi, testimoniati dalla sporgenza centrale, tra le due discontinuità sub verticali, le più importanti presenti lungo l'affioramento.

La mappa in figura 14b è ottenuta invece calcolando le differenze rispetto ad un piano di fit creato utilizzando tutti i punti del prospetto ad eccezione di quelli relativi alla sporgenza. In questo caso, quindi, si mette in evidenza la conformazione della parete più che la sua distribuzione nello spazio. Ciò permette di valutare in maniera diretta e più incisiva quelle che sono le caratteristiche della stessa e, nel complesso, permette di affermare che la parete di Casalino è caratterizzata da un aspetto massivo, da elevata erodibilità e dalla presenza di vuoti dovuti all'erosione dei cogoli.



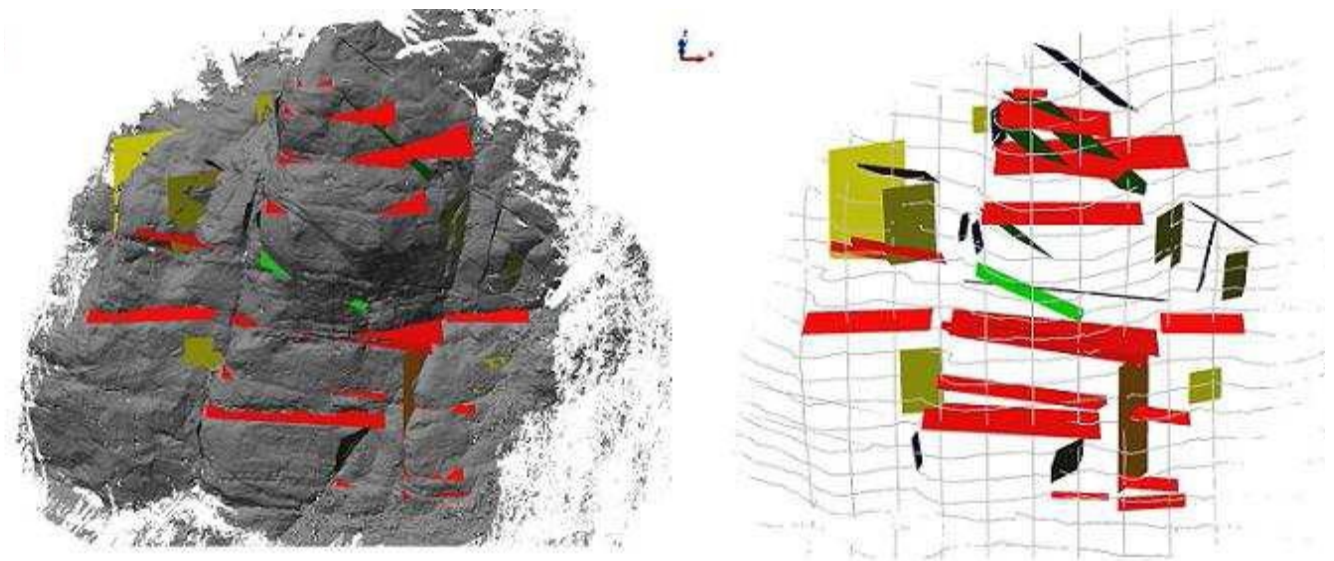
**Figura 14.** Mappe delle differenze punto piano: a) assetto della parete rispetto al piano verticale passante per la sua sommità; b) caratterizzazione della parete rispetto al piano che ne rappresenta mediamente l'andamento esclusa la sporgenza interna (piano di fit).

Avendo a disposizione un modello di riferimento completo e ad alta risoluzione è anche possibile evidenziare in modo veloce e quasi immediato, tutte le discontinuità della parete. Ciò permette di focalizzare l'attenzione in maniera diretta sulle zone da ispezionare per estrarre informazioni sulla spaziatura e persistenza delle discontinuità nell'ammasso roccioso. Nella figura, per esempio, sono identificate le fattezze della superficie mediante giochi di illuminazione del modello che, in falsi colori, ne esalta le discontinuità.

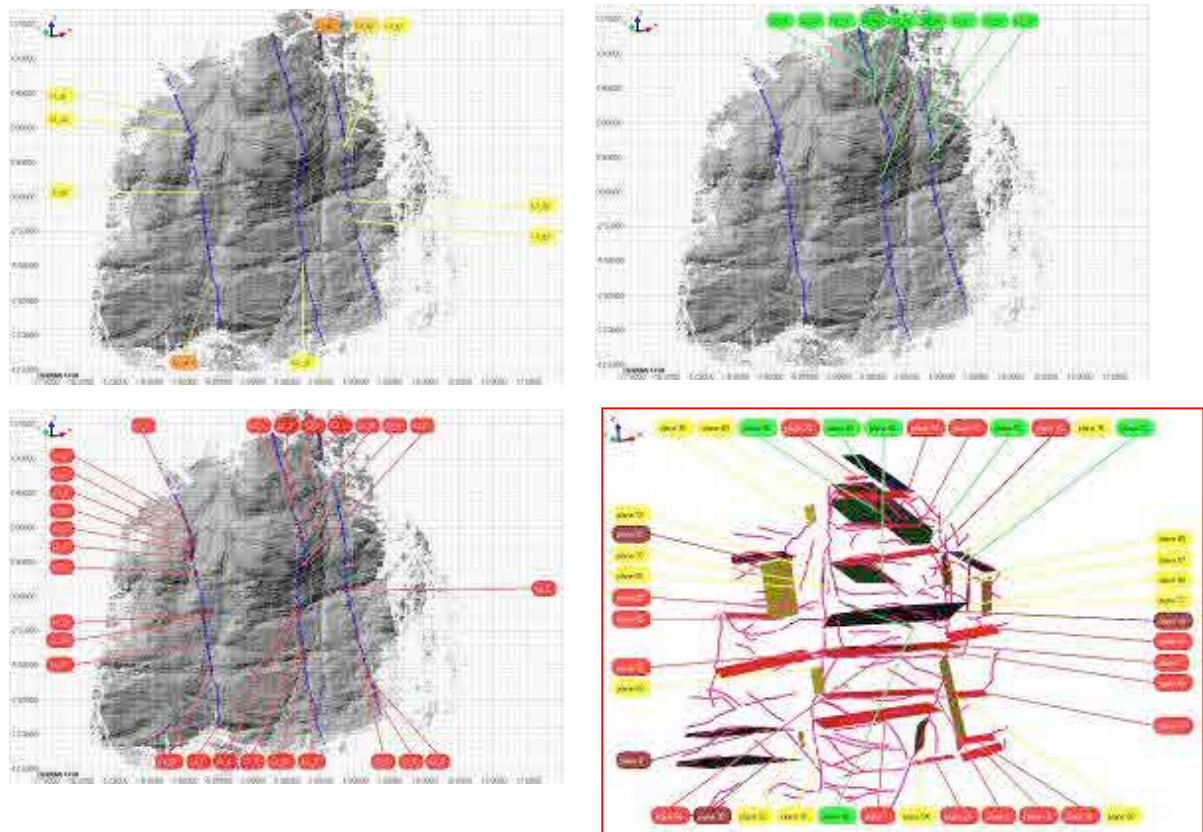


**Figura 15.** Illuminazione del modello TLS per l'identificazione delle principali discontinuità.

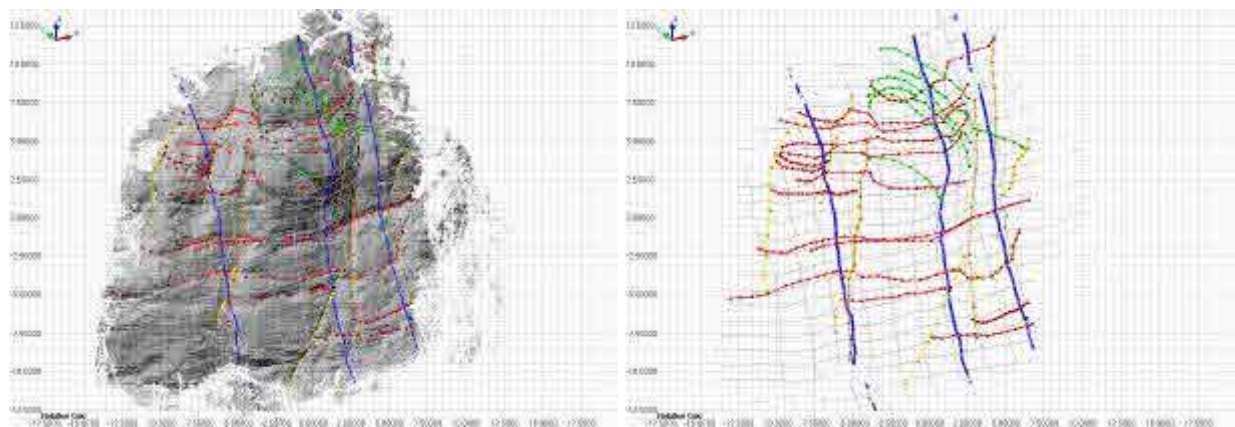
A causa delle oggettive difficoltà di rilevamento su parete verticale e per la ridotta quantità di discontinuità presenti lungo lo stendimento utilizzato dagli operatori in campagna, le spaziature medie per ogni famiglia di discontinuità sono state misurate direttamente dal modello 3D fornito dal TLS. Esse sono state estratte dal modello mediante una procedura semiautomatica e semiquantitativa, senza il supporto di strumenti di calcolo automatici, ma semplicemente ricorrendo ad un'analisi visiva accurata del modello stesso: si è proceduto inizialmente con il riconoscimento delle principali famiglie di discontinuità per poi passare al riconoscimento e alla generazione semiautomatica dei piani di discontinuità passanti per gli stendimenti, fedelmente riprodotti sul modello, da cui si è potuti procedere al riconoscimento delle persistenze e delle spaziature per l'intera parete telerilevata (Fig. 16, 17 e 18).



**Figura 16.** Piani di discontinuità rilevati da modello DTM.



**Figura 17.** Misure estratte dall'ispezione del modello TLS lungo le verticali (in blu) ad indicare le discese reali effettuate in parete. Linee di discontinuità, persistenze e spaziature.



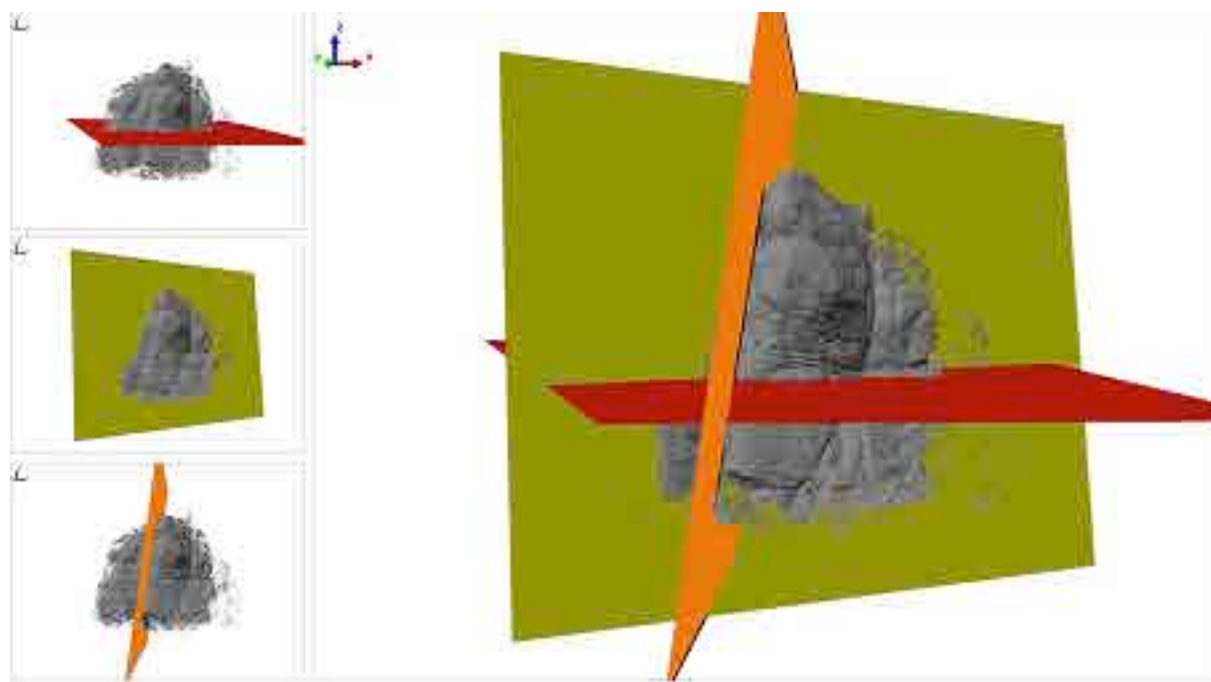
**Figura 18.** Linee di discesa e discontinuità misurate dalla nuvola di punti. Elaborazione e riconoscimento sul modello DTM delle persistenze relative alle discontinuità.

Famiglia	Giacitura (°)/(°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)
J1	266/87	2.9 +/- 1.6	7.1 +/- 3.5
J2	45/86	5.2 +/- 1.3	13.6 +/- 2.8
J3	143/56	1.7 +/- 1.5	8.6 +/- 3.5
J4	247/18	1.4 +/- 1.0	12.6 +/- 6.1
J5	77/16	2.0 +/- 1.2	11.0 +/- 5.2

**Tabella 3.** Valori di giacitura, spaziatura e persistenza per le famiglie rilevate.

## 5. Cinematismo e verifica di stabilità

La verifica di stabilità dei pendii in roccia viene usualmente svolta esaminando le condizioni di equilibrio di solidi di roccia esposti sulle superfici libere delle pareti di pendii naturali che hanno la possibilità di ribaltare o di scivolare su piani di frattura preesistenti. L'analisi cinematica è lo studio delle condizioni che possono determinare il movimento di blocchi, delimitati da discontinuità piane ed infinitamente persistenti, senza riferimento alle forze che lo producono. Il tipo di movimento è stato determinato con metodi grafici analizzando l'orientazione dei sistemi di discontinuità rilevate nella massa rocciosa dalle misure classiche e TLS. I tipi di instabilità che possono essere riconosciuti mediante le analisi cinematiche sono (i) lo scivolamento (planare e "a cuneo") e (ii) il ribaltamento (diretto e flessurale). La valutazione del grado di stabilità del pendio comporta la valutazione della resistenza al taglio delle varie famiglie di discontinuità: i test effettuati per mezzo del software "Dips" hanno permesso di indicare i cinematismi possibili in due condizioni: utilizzando l'angolo d'attrito di picco corretto alle dimensioni reali del blocco ( $42^\circ$ ) e l'angolo d'attrito residuo ( $32^\circ$ ). I risultati per tutte le valutazioni eseguite sui possibili cinematismi e probabilità di accadimento per scivolamento planare, scivolamento a cuneo, ribaltamento diretto e ribaltamento flessurale hanno permesso di ottenere valori percentuali bassi per ogni caso, compresi tra il 4% e 5%, eccezion fatta per il caso di ribaltamento diretto che interessa le famiglie J1 e J4 (stratificazione) con una probabilità del 11%, (Fig. 19).

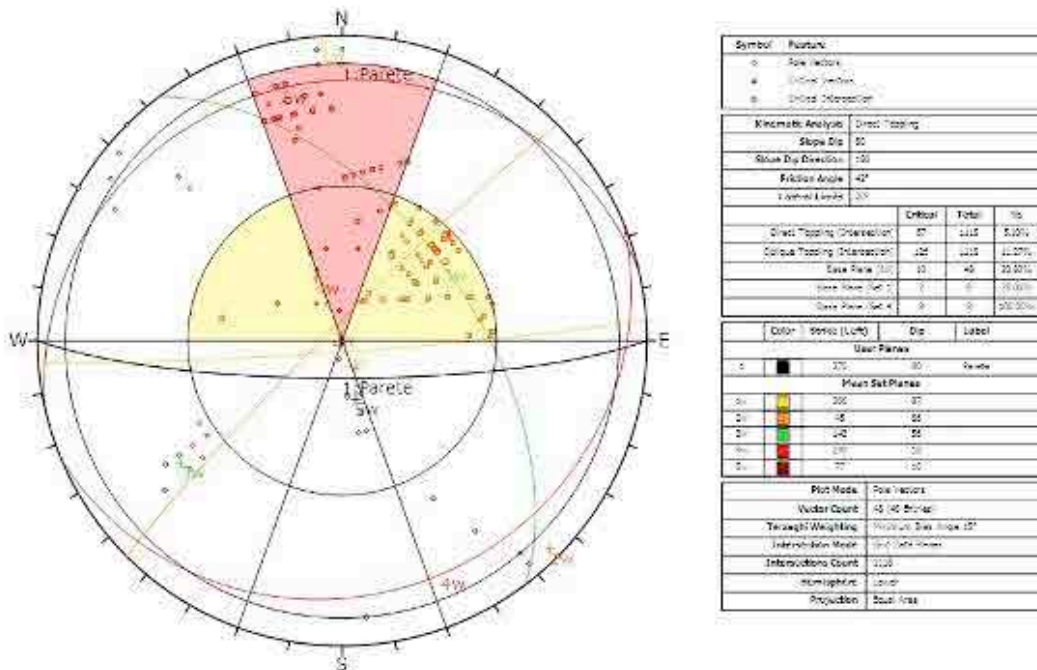


**Figura 19.** Cinematismo di ribaltamento diretto dato dai set J1 (giallo) e J4 (rosso) più il contributo di J2 (arancione) elaborati con il modello DTM.

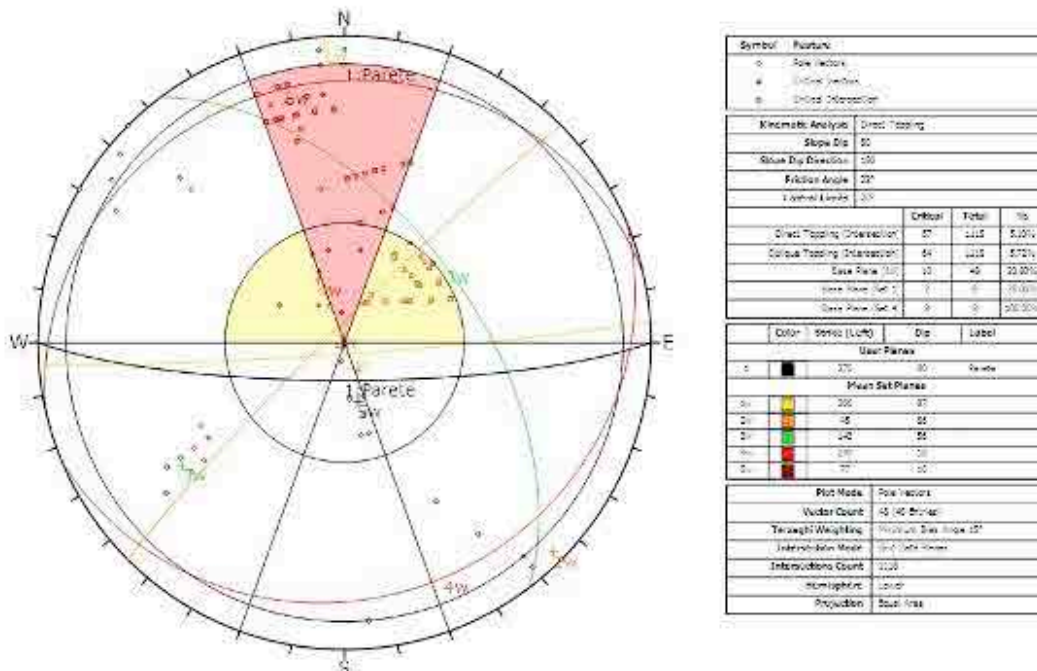
Il ribaltamento a blocchi (o ribaltamento diretto) avviene quando singole colonne o lastre di roccia sono separate da giunti ortogonali ai piani che le separano. La spaziatura delle discontinuità ad alto angolo che immergono all'interno del pendio deve essere minore o uguale a quella delle discontinuità suborizzontali affinché i blocchi esercitino una spinta diretta verso valle. Le condizioni che dovranno essere soddisfatte perché sia cinematicamente possibile l'instabilità per ribaltamento diretto sono principalmente geometriche: 1) Devono esistere almeno due famiglie di discontinuità piane le cui intersezioni immergano verso l'interno del versante (reggipoggio). In questo modo si verificano le condizioni per la formazione delle facce dei blocchi eventualmente coinvolti nel movimento; 2) Deve esistere una famiglia di discontinuità piana che costituisca la base dei blocchi ribaltanti. Insieme al criterio precedente completa la geometria dei blocchi. Condizione favorevole, ma non strettamente necessaria al movimento è l'immersione a franapoggio di questa famiglia rispetto al versante. Si fa notare che se l'inclinazione di tale famiglia, che costituisce il piano basale,

è maggiore dell'angolo d' attrito, allora lo scivolamento piano potrà essere il cinematismo principale; 3) Affinché le singole colonne o blocchi esercitino un momento destabilizzante l'altezza della lastra o blocco di roccia deve essere almeno 4 volte superiore al suo spessore (base del blocco). Questa condizione non viene però evidenziata dallo stereodiagramma e deve essere valutata in base ai valori di spaziatura rilevati; 4) la direzione di immersione (Dip direction) dei piani è variabile di  $\pm 20^\circ$  rispetto all'immersione del pendio.

L'area critica sulla proiezione stereografica (evidenziata in rosa) è rappresentata da un campo di variabilità delimitato lateralmente da due linee radiali di  $\pm 20^\circ$  rispetto alla direzione d'immersione del pendio che racchiudono la proiezione del polo rappresentante il piano basale e l'intersezione dei piani a reggipoggio con lo svincolo verticale.



**Figura 20.** Proiezione stereografica con angolo d'attrito di picco corretto ( $42^\circ$ ) sulla quale effettuare l'analisi per l'instabilità al ribaltamento diretto.



**Figura 21.** Proiezione stereografica con angolo d'attrito residuo ( $32^\circ$ ) sulla quale effettuare l'analisi per l'instabilità al ribaltamento diretto.

Il ribaltamento diretto rivela una probabilità di accadimento, nel caso di angolo d'attrito di picco ( $42^\circ$ ), pari al 5,10%, con 57 intersezioni critiche, e ribaltamento obliquo pari all' 11,27%, con 126 intersezioni critiche; nel caso dell'angolo d'attrito residuo le probabilità di cinematismo sono pari al 5,10%, con 57 intersezioni critiche, per il ribaltamento diretto, e al 5,72% di quello obliquo, con 64 intersezioni critiche (Fig. 20 e 21). Le famiglie interessate sono il set 1 e il set 4 (J1 e J4). Dall'analisi è evidente che per il ribaltamento diretto, in questo caso, cambiando l'angolo d'attrito le percentuali di probabilità di cinematismo sono identiche.

## 6. Conclusioni

Il presente lavoro ha come obiettivo la caratterizzazione geomeccanica e la valutazione del rischio geomorfologico di una parete naturale in roccia arenacea sulla quale è previsto l'allestimento di una "palestra di roccia" per la pratica del paraclimbing. La caratterizzazione dell'ammasso roccioso è stata eseguita tramite l'utilizzo di due metodologie di rilevamento: TLS e rilevamento geomeccanico in corda. La roccia di cui è costituita la parete può essere classificata come "moderatamente resistente" [ISRM, 1978], nell'ammasso roccioso sono state riconosciute 5 famiglie di discontinuità principali le cui superfici sono caratterizzate da un angolo d'attrito di picco di  $51^\circ$ , ridotto a  $42^\circ$  se valutato alla scala del blocco naturale. Le analisi cinematiche hanno indicato i possibili cinematismi che possono aver luogo per mutua intersezione in relazione all'orientazione della parete. Tra i cinematismi possibili, il più probabile, in termini percentuali e valutato per le condizioni attrittive più cautelative, risulta il ribaltamento diretto obliquo che interessa le famiglie J1 e J4 (stratificazione) con una probabilità del 11%. In generale, comunque, le probabilità di accadimento di tutti i cinematismi possibili risultano sempre estremamente ridotte ( $\approx 5\%$ ).

L'utilizzo della tecnica TLS ha fornito ottimi risultati, soprattutto in termini di restituzione delle geometrie e morfologia della parete, consentendo una analisi dettagliata e completa su tutta l'area di interesse con tempi e costi estremamente contenuti e permettendo di lavorare su una notevole quantità di dati rispetto alle misure generalmente possibili nel rilievo manuale in parete. Il modello digitale del terreno (DTM) ha restituito una qualità dell'immagine estremamente alta che ha permesso, in fase preliminare, l'osservazione accurata dell'affioramento, in fase operativa l'analisi delle geometrie, delle giaciture e della morfologia della parete rocciosa e, in fase finale, ha consentito la comparazione, la validazione e l'integrazione dei dati raccolti con il rilevamento geomeccanico.

La possibilità di osservare ed analizzare superfici fisiche mediante i modelli digitali ottenuti con tecniche di telerilevamento quali TLS è potenzialmente di grande utilità anche nell'ottica della creazione di un protocollo di intervento durante emergenze naturali quali i terremoti, le eruzioni vulcaniche, eventi franosi, ecc. Le esperienze maturate presso la Sezione INGV di Bologna nel periodo interessato dal terremoto dell'Emilia Romagna 2012, per esempio, hanno consentito di fornire in tempi estremamente brevi informazioni fondamentali per comprendere lo stato deformativo degli edifici colpiti dal sisma [Pesci et al., 2013ab; Teza et al., 2014]. Nel caso di interventi in condizioni di allarme e pericolo tali misurazioni permettono non solo di operare in piena sicurezza ma anche di contribuire alla rapida comprensione di eventuali stati di pericolo per rendere più performanti e diretti gli interventi di consolidamento e messa in sicurezza [Pesci et al., 2012]. Resta inteso che nessuna tecnica di rilievo, tradizionale o moderna, a distanza o in situ, è sufficiente a fornire un quadro conoscitivo completo ma certamente le misure TLS possono garantire un contributo solido e soprattutto realistico dello stato delle cose.

Un'ultima nota riguarda la peculiarità degli strumenti di tipo TLS oggi disponibili ed utilizzabili che, per fornire informazioni dettagliate, credibili e soprattutto utilizzabili, richiedono una intensa e mirata sperimentazione. In particolare, è essenziale capire quali siano le reali risoluzioni delle scansioni, quali siano gli effetti "anomali" che si possono verificare se le condizioni di rilievo non sono ottimali e soprattutto quali siano le effettive ripetibilità delle misure [Pesci et al., 2011, 2008ab].

## Ringraziamenti

Un grazie a Monica Ghirotti e Matteo Simoni per la disponibilità ed il concreto aiuto nella raccolta e analisi dati. Grazie a Francesca Quareni per la disponibilità dimostrata nel portare avanti una interessante collaborazione tra INGV e Ateneo di Bologna. Grazie a Giordano Teza per il supporto dato nelle attività di

campagna e per i rilievi termografici che saranno oggetto di un prossimo lavoro. Infine, un ringraziamento a Riccardo Civico per le preziose indicazioni fornite e la cura nella revisione del nostro lavoro.

## Bibliografia

- Bally, A.W., Catalano, R., Oldow, J. (1985). *Elementi di tettonica regionale*. Pitagora Editrice Bologna.
- Barton, N.R., Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech. 10(1-2), pp. 1-54.
- Bergevin, R., Souci, M., Gagnon, H., Laurendeau, D. (1996). *Towards a general multi-view registration technique*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18 (5), 540-547.
- Innovmetric (2012). *PolyWorks Surveyor datasheet site*. www.innovmetric.com/polyworks (accessed 07.01.13).
- ISRM - International Society of Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 15. n. 6. pp. 319-368.
- Motta, M., Panizza, V., Pecci, M. (2009). *Geomorphological hazard assessment on natural rock wall for free climbing practice*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXXVII (2009), pp. 109-122.
- OPTECH ILRIS-3D Operation Manual (2006). Optech Incorporated Industrial & 3D Imaging Division, 0040170/Rev A, 1-147.
- Pesci, A., Teza, G. (2008a). *Terrestrial laser scanner and retro-reflective targets: an experiment for anomalous effects investigation*. International Journal of Remote Sensing, vol. 29, pp. 5749-5765, ISSN: 0143-1161, doi: 10.1080/01431160802108489.
- Pesci, A., Teza, G. (2008b). *Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach*. Annals of Geophysics, vol. 51, pp. 839-848, ISSN: 1593-5213.
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E. (2011). *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*. Remote Sensing, ISSN: 2072-4292, doi:10.3390/rs3010167.
- Pesci, A., Bonali, E., Casula, G., Teza, G. (2012). *Metodo basato sulla tecnologia laser scanning per la misura delle deformazioni indotte negli edifici dai sismi o altri eventi distruttivi – La geofisica al servizio della Protezione Civile – IX Workshop di Geofisica – Museo Civico di Rovereto, 14 Dicembre 2012*.
- Pesci, A., Teza, G., Casula, G., Fabris, M., Bonforte, A. (2013a). *Remote sensing and geodetic measurements for volcanic slopes monitoring: surface variations measured at northern flank of La Fossa cone (Vulcano Island, Italy)*. Remote Sensing 2013, 5(5), 2238-2256; doi:10.3390/rs5052238.
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., Casula, G., Boschi, E. (2013b). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79 (2013), pp. 185-198 doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.02.021.
- Remondino, F. (2003). *From point cloud to surface: the modelling and visualization problem*. In: A. Gruen, Sh. Murai, J. Niederoest and F. Remondino (curatori), Proceedings of ISPRS International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, 24-28 February 2003, Tarasp-Vulpera, Switzerland. IAPRS, XXXIV-5/W10. (Proceedings su CD-Rom).
- Rinaudo, F. (2003). *La tecnica del laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche*. Pubblicato nel volume F. Crosilla, R. Galetto. La Tecnica laser scanning. Teoria e applicazioni, pp. 157-172. ISBN: 88-85137-27-X. UDINE: CISM (ITALY).
- Sgrenzaroli, M., Vassena, G. (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Starrylink Editrice - 2007, Brescia, ISBN 978-88-89720-73-8.
- Teza, G., Pesci, A., Trevisani, S. (2014). *Multisensor surveys of tall historical buildings in high seismic hazard areas before and during a seismic sequence*. In press. Journal of Cultural Heritage (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.008>.



**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**