

## **Contributo della tecnologia laser scanner e termografia IR nella caratterizzazione geomeccanica di un costone roccioso**

Vincenzo Adorno (\*\*), Linda Barnobi (\*\*\*), Filadelfo La Rosa (\*), Angelo Leotta (\*),  
Mario Paratore (\*)

(\*) Geovertical s.r.l., Via V. Brancati, 2, 95128 Catania, tel./fax 095 449048, [www.geovertical.it](http://www.geovertical.it),  
[info@geovertical.it](mailto:info@geovertical.it)

(\*\*) Naturaltech, Via A. Doria, 55, 95123 Catania, tel. 095 506018, [vincenzo.adorno@naturaltech.it](mailto:vincenzo.adorno@naturaltech.it)

(\*\*\*) Università degli Studi di Catania, Facoltà di Ingegneria, DAU, Via A. Doria, 6, 95125 Catania,  
[lbarnobi@dau.unict.it](mailto:lbarnobi@dau.unict.it)

### **Abstract**

È stato realizzato un studio multidisciplinare riguardante un costone roccioso in Provincia di Enna, che è consistito in: rilievo laser scanner, con successive elaborazioni e modellazione 3D; rilievo geostrutturale, con geologi rocciatori, per identificare le principali famiglie di discontinuità ed i dissesti più consistenti, ai fini di una progettazione definitiva del consolidamento; rilievo termografico a infrarossi, per riconoscere le discontinuità in base alle differenze termiche evidenziabili. Il confronto tra le varie tipologie di acquisizione ha fornito risultati positivi, in quanto molte discontinuità, oggetto principale dell'indagine, sono risultate evidenti e leggibili sia nell'immagine digitale e restituita in 3D, sia nell'immagine termografica. A conferma di quanto rilevato ci si è basati sul rilievo geomeccanico delle discontinuità, e sulla evidenziazione in campagna dei principali massi instabili e loro volumi. Si è potuto inoltre rilevare, con l'ausilio delle immagini termografiche, la presenza di acque reflue più o meno superficiali.

*It has been realized a multidisciplinary study regarding a rock slope in Province of Enna, constituting in: laser scanner survey, with elaborations and 3D modeling; geological survey, by rock-climber geologists, in order to identify the main discontinuities' families and the more consisting fractures, for a definitive planning of the consolidation; termographic infrared survey, in order to recognize the discontinuities based on the evident thermal differences. The comparison between the several tipologies of acquisition has supplied positive results, as many discontinuities, main surveying object, has turned out evident and reading both in the digital image and 3D model and in the termographic image. The geomechanic discontinuities survey and the recognition in situ of the main unstable masses and their volumes confirmed what have been found with others technologies. It has been able moreover to find, with the aid of the termographic images, the more or less superficial water presence.*

### **Premessa**

L'analisi e lo studio di un costone roccioso, finalizzato ad un progetto di consolidamento, presenta diverse problematiche legate sia alla geometria del corpo stesso da indagare, e conseguentemente alle difficoltà logistiche, sia ai rapporti tra le varie porzioni in gioco, e la loro reciproca interferenza. Nella primavera 2009, Geovertical srl di Catania ha svolto per conto del Comune di Calascibetta (EN) indagini riguardanti un costone roccioso, preventive al progetto di consolidamento dello stesso: l'indagine multidisciplinare dell'ammasso roccioso ha portato ad una rappresentazione dei circa 9.000 mq di parete verticale, con le sue caratteristiche geologiche, geomeccaniche,

geometriche e termografiche, mediante rilievo geostrutturale eseguito in parete con tecniche alpinistiche, coniugato con l'applicazione di *laser scanner* e termocamera IR.

La prima fase è stata la bonifica del costone (scerbatura e disgaggio), che ha avuto il duplice scopo di rendere visibili ai geologi rocciatori tutte le discontinuità e le peculiarità della roccia e consentire una dettagliata scansione del costone con il *laser scanner* e la termocamera.

Al rilievo geostrutturale si è subito affiancata la scansione *laser*: sono stati posizionati sulla roccia degli appositi *targets* per consentire l'immediato riconoscimento di alcuni specifici punti, che individuavano principali discontinuità o blocchi disarticolati.

La cospicua mole di dati raccolti ha portato ad una analisi strutturata all'insegna della multidisciplinarietà. L'osservazione meramente geologica eseguita in parete per l'individuazione delle discontinuità ha dato modo al *laser scanner* di rilevare con mirato dettaglio i punti fondamentali per una rappresentazione schematica, ma fedele, delle problematiche geomeccaniche; inoltre, ha permesso un confronto oculato con il dato termico, prendendo in considerazione solo quelle anomalie che trovavano reale riscontro in parete.



Figura 1 – Strumento in situ

### Il rilievo laser scanner (L.B.)

L'applicazione del laser scanner per problematiche geologico-strutturali è di recente sperimentazione, ma sta avendo un importante sviluppo, in quanto i risultati ottenuti sono stati generalmente validi ed utili, ai fini delle applicazioni pratiche.

Le caratteristiche che hanno fatto di questa tecnologia una nuova frontiera nel settore dei rilievi geostrutturali sono: la capacità del laser di prelevare una grandissima quantità di dati, in tempi relativamente brevi; la possibilità di acquisire misurazioni uniformemente distribuite, a prescindere dalle condizioni di stabilità ed accessibilità dei luoghi.

La scansione laser produce un modello numerico tridimensionale (*points cloud*) che è in grado di documentare le principali caratteristiche geometriche e geomorfologiche degli ammassi rocciosi.

I limiti di tali applicazioni sussistono, invece, nell'impossibilità di operare in presenza di vegetazione sulla parete rocciosa, nella riduzione dell'accuratezza delle misure, all'aumentare della distanza dall'oggetto dell'acquisizione, nell'impossibilità del raggio laser di accedere in profondità all'interno delle discontinuità, specie da punti di stazione collocati a distanza elevata.

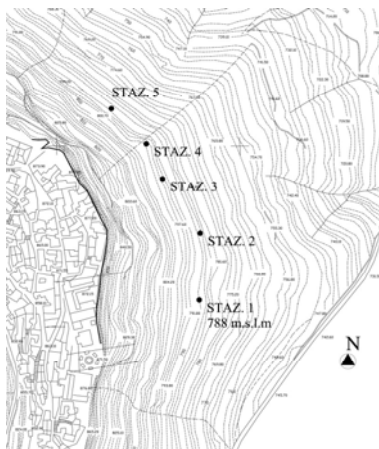


Figura 2 – Punti stazione per le scansioni

L'estensione della parete rocciosa, la notevole varietà di caratteristiche da documentare e la possibilità di confrontare i risultati ottenuti mediante la tecnologia laser con quelli prelevati con i metodi tradizionali, nonché l'integrazione con gli stessi, ha reso l'applicazione del rilievo HDS alla parete rocciosa al di sotto del paese di Calascibetta un ottimo campo di sperimentazione e verifica delle metodologie acquisite in esperienze precedenti.

A seguito di un primo sopralluogo, indispensabile per verificare lo stato dei luoghi e le caratteristiche geometrico-spaziali dell'oggetto, constatata la relativa regolarità (sia nello sviluppo planimetrico che in senso verticale) della parete rocciosa, con la presenza di macrofratture di grande entità, si è ritenuto che fosse sufficiente effettuare le scansioni con una maglia di punti misurati con passo non inferiore ai 3 cm sulla parete. Sulla scarpata sottostante la parete, è stata individuata

la zona di miglior visuale, ai fini della scansione *laser*, in una fascia che corre pressoché parallela alla parete, ad una distanza dalla stessa variabile tra gli 80 ed i 130 m.

Per la realizzazione di scansioni che descrivessero compiutamente la morfologia del soggetto, e tra le quali sussistesse la necessaria sovrapposizione, il progetto di rilievo ha previsto 5 punti stazione, collocati all'interno della suddetta fascia. Sulla parete rocciosa sono stati collocati 32 *targets* riflettenti, disposti in modo da essere distribuiti uniformemente, visibili contemporaneamente da più punti stazione ed individuare le principali discontinuità.

Le operazioni *in situ* si sono svolte in due giornate ed hanno consistito nella realizzazione delle scansioni previste, effettuate con una precisione variabile tra 3 e 5 cm, sovrapposte alle quali sono stati effettuati i raffittimenti necessari per l'esatta individuazione e riconoscimento dei *targets*, con una maglia di scansione con passo pari ad 1 cm.

Complessivamente, sono stati misurati circa 22 mln di punti. L'unione, la registrazione e la georeferenziazione delle scansioni ha prodotto un DTM dell'oggetto, che ha presentato un errore variabile tra di 1,1 e 1,4 cm.

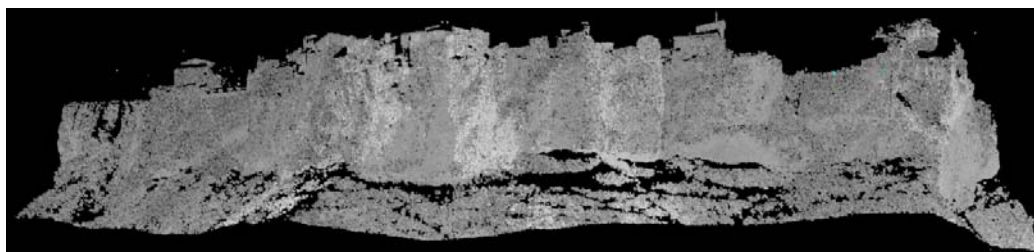


Figura 3 – Viste del modello numerico complessivo

Durante il *post-processing*, la nuvola è stata sfoltita a circa 50 mila punti, con risoluzione di 6 punti al m<sup>2</sup>, e vi è stata realizzata una *mesh* triangolare (modello geometrico) ed è stata misurata a superficie geometrica di parete, risultata pari a 8900 m<sup>2</sup>.

È stato inoltre effettuato un dettagliato rilievo fotografico, con punti di presa corrispondenti ai punti stazione, le cui immagini sono state proiettate sulla *points cloud*, generando un modello complessivo tridimensionale fotorealistico, che ha facilitato l'esatto riconoscimento e collocazione sia delle aree di parete misurate sulle verticali di calata, che l'individuazione dei massi in posizione precaria.

Sul modello geometrico, sono stati individuati:

- piani di sezione orizzontali, a differenza di quota (equidistanza) pari a 50 m, per l'individuazione delle isoipse (curva di livello);
- piani di sezione verticali, con un passo di circa 20 m, approssimativamente paralleli alla normale alla parete, per il tracciamento dei profili di parete;
- massi in posizione precaria 7.

#### **Calcolo della volumetria dei blocchi (F. L.)**

Il calcolo dei volumi è stato realizzato mediante un procedimento del tutto innovativo, possibile grazie al connubio tra tecnologia *laser scanner* e rilievo geostrutturale su parete.

Nel corso della modellazione tridimensionale digitale sul modello discreto (nuvola di punti) del costone roccioso, sono stati individuati sulla parete 7 massi di notevoli dimensioni il cui equilibrio, in prima analisi, risulta sembrare alquanto instabile. Il confronto congiunto con le misure rilevate in parete mediante tecniche alpinistiche ha evidenziato la necessità di procedere con un'analisi di dettaglio di tali massi, per determinare, con l'adeguata accuratezza, il volume generato da un possibile distacco.

Sulla nuvola discreta sono state individuate le aree interessate dai possibili distacchi (blocchi); per

ciascuna di esse, si è realizzato uno sfoltimento della nuvola originale (22 mln di punti - 2400 pt/m<sup>2</sup>) in modo da ottenere, per ogni area, una densità di punti compresa tra 200 e 300 punti/m<sup>2</sup>. Esportati i singoli modelli discreti in ambiente *Cad*, si è proceduti così alla realizzazione dei modelli di dettaglio delle singole aree, distinguendo, per ciascuna di esse, la superficie della parete da quella afferente il masso. È stato quindi realizzato il modello DTM dell'area mediante *mesh* appartenenti a due differenti *Layer*, in modo da individuare con precisione la linea di separazione tra masso e parete.

Il modello così realizzato è stato orientato rispetto al nord, in modo da poter realizzare la sovrapposizione tra i dati rilevati in parete e quelli ottenuti mediante la scansione *laser*. In seguito, sono stati individuati e tracciati in maniera fedele, mediante i dati rilevati in parete, i piani di scivolamento (ove presenti) di ciascun masso e le famiglie di discontinuità in cui far rientrare il blocco.

Nel calcolo volumetrico, ciascun piano di scivolamento e gli eventuali altri piani di rottura sono

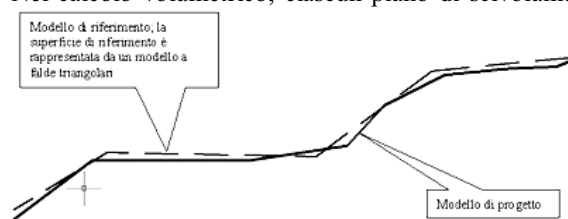


Figura 4 – Schema di calcolo dei volumi

stati modellati come “Superfici di riferimento”, mediante realizzazione di *mesh* triangolari, mentre il DTM di dettaglio relativo al singolo blocco è stato modellato come “Superficie di progetto”. Si è proceduto quindi, per ciascun masso, al calcolo del volume compreso tra la superficie visibile del masso e la sua proiezione sulla superficie di scivolamento individuata.

#### Rilievo geostrutturale (F. L., A. L., M. P.)

Le discontinuità in un ammasso roccioso condizionano, in modo più o meno evidente, il comportamento meccanico dell'ammasso stesso e del modello geotecnico alla base di qualsiasi calcolo; è quindi importante, al fine di una corretta valutazione delle condizioni di stabilità, una precisa descrizione della struttura della massa e delle discontinuità sia in termini qualitativi che quantitativi. Per la determinazione del modello geotecnico dell'ammasso è necessario, quindi, analizzare sia le condizioni geosturali (spaziatura, apertura, persistenza) sia le condizioni idrauliche e di resistenza delle discontinuità (scabrezza, resistenza delle pareti, grado di alterazione, materiali di riempimento). Le discontinuità e le masse rocciose sono state definite da 10 parametri (descritti nelle raccomandazioni ISRM, tradotte in italiano da O. Del Greco nella Rivista Italiana di Geotecnica - R.I.G. 2/93) e ottenuti dall'analisi statistica dei dati di campagna prelevati direttamente in parete ed integrati, ove possibile, dal modello DTM del terreno.



Figura 5 – Rocciatore in fase di raccolta dati

La raccolta dei dati utili ai fini dell'esecuzione dell'indagine geostrutturale, relativa alle porzioni rocciose del costone zona nord, sul quale è posto parte dell'abitato di Calascibetta, è avvenuta mediante la realizzazione di assi preferenziali di indagine verticali (ogni asse individua una porzione di parete attigua alla successiva). Sono state rilevate circa 130 superfici di discontinuità, talvolta con collocazione diretta della bussola su una delle due superfici, talvolta facendo ricorso all'inserimento di un piano rigido in materiale plastico che consentisse di appoggiare il piano di rilievo della bussola su una estensione non fluttuante della discontinuità in rilevazione.

### Orientazione.

I dati sono stati prelevati con una bussola di *Clar* per rilievo strutturale e consistono nel valore d'immersione della discontinuità ( $\alpha$ ) e nella corrispondente inclinazione ( $\beta$ ) della linea di massima pendenza; successivamente i dati sono stati analizzati con un software che consente il calcolo automatico dei poli delle superfici di discontinuità fornendo infine la proiezione stereografica in diagrammi di *Schmidt* (emisfero inferiore). Da un esame complessivo si riconoscono 4 famiglie principali di discontinuità:

| Famiglie | $\alpha$ | $\beta$ |
|----------|----------|---------|
| F1       | 260      | 27      |
| F2       | 354      | 80      |
| F3       | 95       | 60      |
| F4       | 45       | 88      |

Figura 6 – Quadro riassuntivo delle principali famiglie di discontinuità.

Le discontinuità appartenenti alle famiglie 2 e 4 sono coniugate tra loro. L'intersezione di tali famiglie determina porzioni di roccia cuneiformi disarticolate in cui le discontinuità appartenenti alla famiglia 3 rappresentano i relativi piani di appoggio. Le discontinuità appartenenti alla famiglia 1, contraddistinte da aperture prossime allo 0, rappresentano piani di strato disposti a reggipoggio rispetto alla direzione del fronte lungo la sua intera estensione.

### Analisi blocchi.

Nel corso dell'indagine sono state individuate sul costone 7 porzioni rocciose presentanti particolari condizioni di instabilità. Queste porzioni rocciose sono state oggetto di particolare attenzione. Per ciascun blocco è stata valutata: l'ubicazione e le coordinate sul modello DTM, la descrizione grafica con le dimensioni medie misurate sui luoghi, la volumetria, l'individuazione del piano di appoggio, il cinematismo possibile che può subire (*test di Markland*), l'energia lungo la sezione di riferimento, il calcolo traiettografico lungo la sezione di riferimento. I blocchi risultano essere disarticolati dall'intersezione dei piani di discontinuità riconducibili alle quattro famiglie rilevate nel corso dell'indagine geostrutturale.

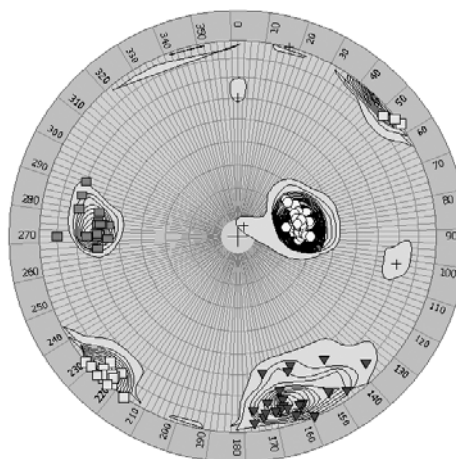


Figura 7 - Diagramma di Schmidt emisfero inferiore

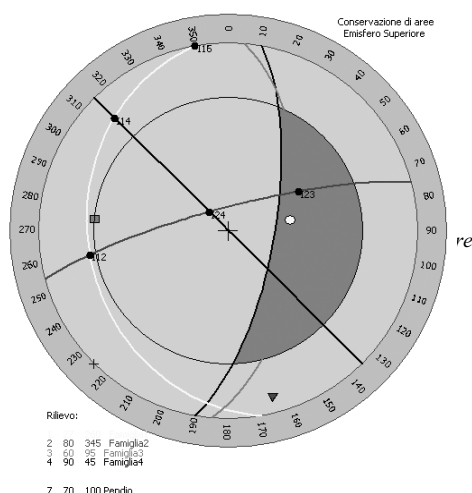


Figura 8 - Diagramma di Wulff, Test di Markland emisfero inferiore

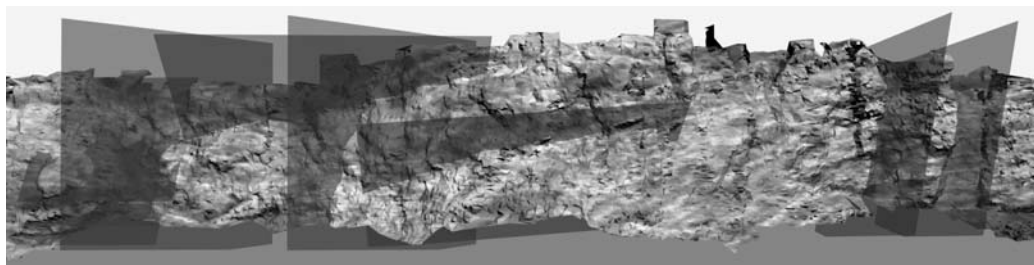


Figura 9 – Visione globale della parete con individuazione dei piani di discontinuità

Nello specifico i piani di frattura riconducibili alle famiglie 2 e 4 costituiscono rispettivamente la superficie laterale sinistra e laterale destra del masso generato, il piano 1 rappresenta il tetto ed il letto del blocco mentre il piano tre ne rappresenta il piano di appoggio. Quest'ultimo costituisce il potenziale piano di scivolamento lungo cui il test di *Markland* ha verificato l'esistenza di possibili rotture.

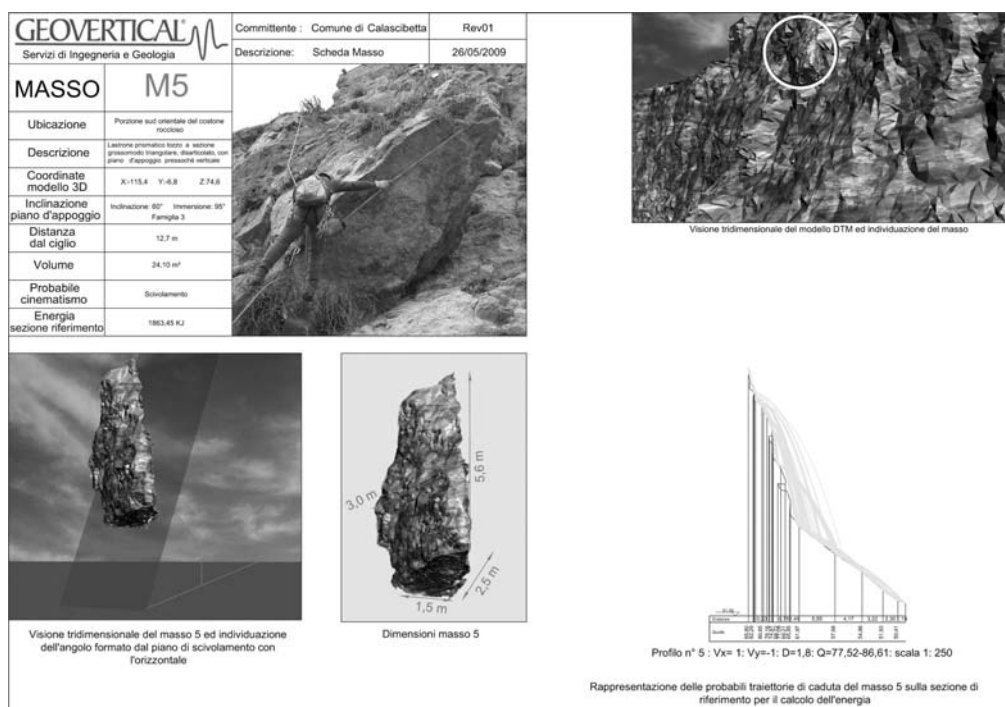


Figura 10 – Scheda massa tipo

### Analisi termografica (V. A.)

Lo scopo principale della termografia IR è quello di monitorare anomalie termiche dovute a differenze di temperatura  $\Delta T$  (°C) riscontrate sulle superfici, indicative, in alcuni casi, di alterazioni di ciò che si trova all'interno del materiale che si sta investigando.

Nel caso del versante roccioso esso è stato monitorato in condizioni multitemporali, cioè in primavera e in estate nello stesso anno solare (2009).

La multitemporalità si è resa necessaria per evidenziare le differenze nel comportamento termico delle superfici nelle due stagioni e per l'eventuale presenza d'acqua di percolazione all'interno della

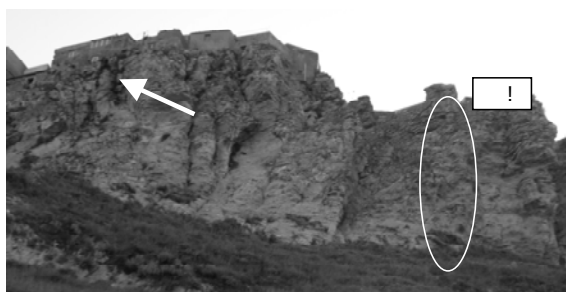


Figura 11 – Immagine fotografica (VIS) del settore nord del costone roccioso

parete rocciosa. La pulitura della parete dalla vegetazione di tipo a macchia mediterranea distribuita in modo irregolare, ha facilitato il rilievo termografico, altrimenti impossibile da effettuare. Quindi il rilievo si è limitato solo agli affioramenti completamente privi di vegetazione.

Dopo il rilievo è stata eseguita l'elaborazione e l'interpretazione delle immagini. In questa fase è stata effettuata prima la mosaicatura delle immagini IR e fotografiche (VIS) ed in seguito l'elaborazione delle immagini IR e VIS in

modo da avere un raffronto tra ciò che si vede ad occhio nudo è ciò che osserva la termocamera, facendo risaltare le differenze di temperatura  $\Delta T$  (°C).

I risultati hanno evidenziato che nel periodo primaverile, con presenza di piogge abbondanti, il costone roccioso presenta diverse aree dove la circolazione d'acqua di percolazione è persistente (vedi figura 12). In particolare si è riscontrata la presenza di un'area con una marcata anomalia termica negativa (area Ar2, figura 12) che denota la presenza di un'intensa canalizzazione dell'acqua, totalmente invisibile ad occhio nudo (area Ar1, figura 11).

Il raffronto con l'immagine IR relativa alla stagione estiva (figura 13) mostra la totale assenza di gran parte dell'acqua di percolazione dovuta, quindi, all'assenza di piogge. L'unica eccezione è data dal persistere della presenza dell'anomalia termica negativa nella porzione in alto a sinistra della porzione di costone (area Ar3, foto 12, e area Ar4, foto 13) che denota la natura di acqua di scarico. Inoltre si può evidenziare che l'acqua di percolazione relativamente all'area Ar2 indica un carico idraulico che potrebbe portare alla disarticolazione di una porzione dell'ammasso roccioso.

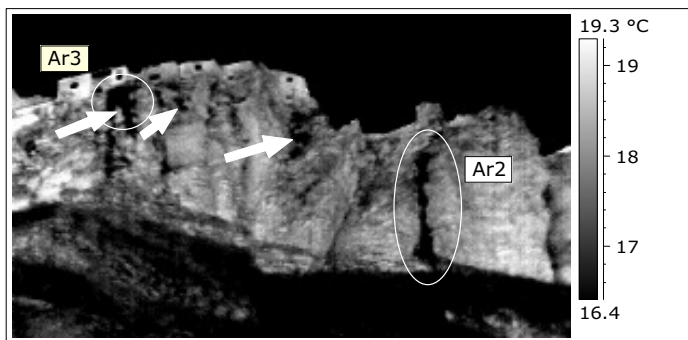


Figura 12 – Immagine termografica (TIR) del settore nord del costone roccioso eseguita nel periodo primaverile.

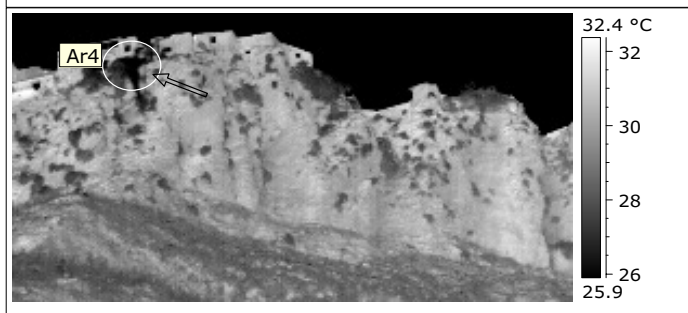


Figura 13 – Immagine termografica (TIR) del settore nord del costone roccioso eseguita nel periodo estivo.

## Conclusioni

L'integrazione delle diverse tecniche di rilevamento, ancora in fase sperimentale, ha consentito di valutare l'apporto di ciascuna di esse, nell'economia globale della definizione delle problematiche geostutturali del costone roccioso.

In particolare, l'esperienza ha dato modo di verificare quale contributo possa dare la scansione *laser* tridimensionale, al rilievo effettuato con tecniche tradizionali. La nuova tecnologia, grazie alla enorme quantità di dati metrici che mette a disposizione, dà la possibilità di estrarre, misurare, valutare ed elaborare, anche in diverse fasi, tutte le caratteristiche geometriche e morfologiche dell'oggetto, in maniera uniformemente distribuita sull'oggetto; il modello geometrico tridimensionale fotorealistico diventa ottimo strumento di comunicazione, fornendo al contempo un'ottima base di supporto per l'inserimento dei dati di dettaglio, per i quali, invece, si ritiene che le misurazioni in parete siano fondamentali. Difatti, il *laser*, prelevando dati sempre da punti stazione posti a distanza notevole, non ha assolutamente alcuna possibilità di leggere quanto avviene immediatamente al di sotto della superficie, nelle immediate profondità delle discontinuità, laddove, invece, non essendo presenti i notevoli fenomeni di erosione delle parti più esterne, è possibile individuare in maniera più precisa e fedele la giacitura delle discontinuità ed i piani di scivolamento. L'unione tra lo studio geologico, mirato a definire la geometria definita *in situ* dagli stress agenti sul costone, ed il rilievo ad alta definizione tramite scansione *laser*, che si "impadronisce" dei dati rilevati dai geologi rocciatori, per renderli immagine fedele alla realtà, in quanto acquisiti con grande dettaglio, risulta quindi fondamentale per avere una visione quanto più completa possibile delle problematiche geostutturali. È stato così possibile, tra l'altro, l'individuazione delle principali famiglie di discontinuità, sia come dato statistico, che come dato geometrico; l'individuazione dei blocchi parzialmente disarticolati, del loro ipotetico piano di scollamento, ed il calcolo dei volumi degli stessi. Infine, è stata predisposta una modellazione del cinemismo generale, individuato dalla rappresentazione sulla *mesh* di riferimento dei piani di discontinuità delle principali famiglie: questa applicazione consente una lettura del test di *Markland* più immediata e facilmente applicabile a qualsiasi zona del costone.

Da parte sua, l'analisi termografica ha aggiunto informazioni utili per evidenziare la presenza d'acqua di percolazione all'interno dell'ammasso roccioso (se la circolazione idrica si sviluppa negli strati subsuperficiali), che potrebbe portare ad un carico idraulico favorendo fenomeni di destabilizzazione del costone.

## Bibliografia

- Clerici A., Sfratato F. (2004) *Sperimentazione in sito ed analisi del fenomeno di caduta massi*. GEAM, n. 1-2, Torino, pp. 39-47.
- Grasselli G., Egger P., (2003) *Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters*, International journal on Rock Mechanics and Mining Sciences, 27
- E. Hoek, Bray J.W. (1981) *Rock Slope Engineering*, Published for the Institution of Mining and Metallurgy (Paperback)
- Slob S., Hack R., Turner A. K. (2002) *An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques*, ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions – Eurock 2002, Funchal, Portogallo.
- Andreas Marbs (2002) *Experiences With Laser Scanning at i3mainz*; CIPA, Heritage Documentation International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording; Corfu, Greece.
- Sequeira V., Ng K., Wolfart E., Gonçalves J.G.M., Hogg D.C. (1999) *Automated Reconstruction of 3D Models from Real Environments*; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (Elsevier), vol. 54, pp. 1-22.
- N. Nocilla, D. Viviano, S. Aversa (1999), *Applicazione della fotogrammetria al rilievo strutturale di costoni rocciosi*, XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma.
- Hudson J.A., Priest S.D., (1979), *Discontinuity and rock mass geometry*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences