

MIRKO SANTACATTARINA

TELERILEVAMENTO DA POSTAZIONE FISSA
APPLICATO ALLO STUDIO DELLA STABILITÀ
DI UNA PARETE IN ROCCIA:
IL CASO DELLA PARETE DI M. ALBANO
(MORI, TRENINO) (*)

ABSTRACT - SANTACATTARINA M., 2000 - Stationary position remote sensing applied to the study of the rock wall stability. The case of Monte Albano rock wall (Mori, Trentino).

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 250, 2000, ser. VII, vol. X, B: 397-414.

This contribution presents a series of techniques for stationary position and short-distance remote sensing which can be used to study the rock wall stability. The results of this research can be a valuable aid in planning new surveys only for the most critical areas, therefore sparing time and money. The first aim of this research was the classification of the detachment niches according to their relative age. For this purpose an analysis of the wall colour saturation and of the polarization of incident light was carried out. Then, using colour and polarization imaging, the wall fracturation field and its density were reconstructed. The research was completed with a study of the characteristics of the matter underlying the surveyed surface in terms of thermal capacity. The thermal capacity is obtained through the Fourier Newton equation with a comparison among thermographies taken during the cooling down phase.

KEYWORDS: Remote sensing, Stability, Detachment niches, Fractures, Thermal capacity.

RIASSUNTO - SANTACATTARINA M., 2000 - Telerilevamento da postazione fissa applicato allo studio della stabilità di una parete in roccia: il caso della parete di M. Albano (Mori, Trentino).

Viene presentato un compendio di tecniche di telerilevamento, da postazione fissa e a breve distanza, che possono essere utilizzate per lo studio della stabilità di una parete in roccia. I risultati di questo studio possono servire per progettare nuove ricerche solo per le aree più critiche, con conseguente risparmio di risorse economiche e di tempo. Primo obiettivo della presente ricerca è stato la classificazione delle nicchie di distacco in base alla loro età relativa. A tale scopo è stata fatta un'analisi

(*) Lavoro presentato dal Socio Accademico Dr. Franco Finotti.

della saturazione del colore della parete, e della polarizzazione della luce incidente. Quindi è stato ricostruito il campo di fratturazione della parete e la sua densità utilizzando immagini a colori reali e immagini della polarizzazione. Lo studio è stato completato con l'analisi delle caratteristiche, in termini di capacità termica, della massa sottostante le superfici rilevate. La capacità termica si ottiene in base all'equazione di *Newton - Fourier* dal confronto fra termografie acquisite durante la fase di raffreddamento degli oggetti.

PAROLE CHIAVE: telerilevamento, stabilità, nicchie di distacco, fratture, capacità termica

INTRODUZIONE

Studiare la stabilità di una parete in roccia attraverso l'applicazione di tecniche di telerilevamento, può rappresentare una delle fasi nelle quali si sviluppa la ricerca geologica. Si tratta di una fase intermedia che può permettere di progettare gli studi successivi, nei quali saranno utilizzati metodi di analisi più precisi ma anche più dispendiosi in termini di tempi e di costi. Tuttavia già dai risultati dell'interpretazione assistita di immagini riprese da postazione fissa si possono ricavare delle indicazioni precise sullo stato di stabilità di una parete in roccia.

L'acquisizione di immagini da postazione fissa è molto facile da attuarsi, molto veloce e poco costosa. Questa risulta essere una grande differenza rispetto al telerilevamento aerospaziale. Inoltre si può attuare una raccolta multitemporale dei dati con cadenze temporali precise e variabili e potendo scegliere i piani di polarizzazione (TONELLI, 1995).

In questo studio si è cercato principalmente di definire con quali tecniche si riescono ad identificare le aree della parete che sono state caratterizzate dai distacchi più recenti e le zone maggiormente fratturate, e se vi è una corrispondenza fra le prime e le seconde.

Le immagini utilizzate sono state ottenute con strumenti di acquisizione differenti: apparecchi fotografici, telecamere digitali, termografo. Mediante apparecchi fotografici e telecamere si può operare sia nel campo del visibile sia in quello dell'infrarosso prossimo. Per le macchine fotografiche esistono delle pellicole sensibili all'infrarosso, mentre per l'acquisizione con telecamera si utilizza un filtro che maschera la radianza riflessa dagli oggetti nel campo di lunghezze d'onda dell'ultravioletto e del visibile. In questo modo si riescono a fare delle acquisizioni nel solo campo dell'infrarosso prossimo. L'impiego di termografi è naturalmente abbastanza onerosa dal punto di vista economico. Tuttavia dalle termografie si riescono ad ottenere dei dati sulla capacità termica delle rocce che permettono di ottenere un'analisi più precisa e completa riguardo alla stabilità di una parete.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO DELL'AREA IN ESAME

La parete di M. Albano (fig. 1) si trova a Nord dell'abitato di Mori (Trentino meridionale). Il luogo è posto all'imbocco Est della Val di Loppio, valle che collega l'alta Val Lagarina al bacino del lago di Garda.

La parete si prolunga approssimativamente in direzione Nord Est-Sud Ovest, ed è costituita da rocce calcareo-dolomitiche, con una prevalenza delle *facies* dolomitiche. Lungo la scarpata passa il limite fra la formazione della Dolomia Principale e il membro inferiore dei Calcarì Grigi. La Dolomia Principale (Retico - Norico) è costituita da dolomie saccaroidi di colore variabile dal giallo rosato al bianco grigiastro (FINOTTI, 1981). Il membro inferiore dei Calcarì Grigi (Lias inferiore) è invece formato da calcari micritici di colore nocciola chiaro, che si trovano in strati di spessore decimetrico. Questi sedimenti giurassici subirono però un forte processo di dolomitizzazione ad opera di soluzioni magnesiache provenienti dalla sottostante Dolomia Principale che impregnarono i terreni sovrastanti seguendo il reticolo di faglie (CARRARO in FINOTTI, 1981).

La parete è limitata sia ad Est sia ad Ovest da due sovrascorrimenti di direzione giudicariense Nord Nord Est - Sud Sud Ovest, vergenti a Est Sud Est e caratterizzati da rigetti attorno al centinaio di metri.

La stratificazione immerge debolmente (5-10°) verso Nord. La parete di M. Albano costituisce la parte superiore di una piega a ginocchio di asse Est-Ovest. Di conseguenza se gli strati si prolungassero verso Sud essi si piegherebbero e la stratificazione immergerebbe verso Sud di 60-70°. Quindi alcune delle fratture che si osservano sulla parete possono essere geneticamente collegate alla formazione della piega a ginocchio.

La storia tensionale della parete è stata influenzata anche dal ghiacciaio würmiano dell'Adige. Quest'ultimo nell'area tra Rovereto e Mori raggiunse quote comprese fra i 1550 m e i 1600 m. Le pressioni esercitate sui versanti furono quindi molto elevate. Al ritiro del ghiacciaio le pareti lasciate scoperte subirono un forte detensionamento e conseguentemente una fitta fratturazione. Tutto ciò favorì l'azione dei processi di degradazione, in particolare del gelo e disgelo, che agirono su morfologie non più in equilibrio (BARTOLOMEI, 1974).

Alla base della parete è presente un ampio accumulo di frana di crollo che si estende per circa 0,5 km². Il deposito, che si è fermato sul ripiano dove si trova la chiesa di M. Albano interessando solo marginalmente il fondovalle, è molto accidentato ed è costituito in particolare da grossi blocchi spigolosi addossati gli uni agli altri. Non si conosce

l'età dell'evento di frana. Attualmente l'accumulo è ricoperto per lunghi tratti da bosco.

LE NICCHIE DI DISTACCO

Lo studio della stabilità di una parete in roccia può iniziare dalla ricerca delle aree dove le nicchie di distacco sono più fresche. I punti nei quali quest'ultime sono più frequenti devono essere indagati con maggiore attenzione poiché in essi la roccia si trova in una condizione di maggiore disequilibrio (roccia più fratturata e alterata).

Un primo metodo molto semplice e veloce per la ricerca delle nicchie di distacco recenti si basa sullo studio della saturazione di un'immagine a colori reali della parete. Infatti, una qualsiasi superficie fresca di una roccia sedimentaria tende nel campo del visibile ad ingrigire a causa dell'alterazione meteorica (*weathering*). Con il termine ingrigire s'intende che la risposta alla riflessione del materiale roccioso nelle tre diverse bande blu, verde e rossa, tende a parificarsi.

La saturazione di un'immagine a colori (reali o falsi) indica il grado di assenza di grigio e si esprime come (TONELLI, 1998):

$$S = 1 - 3m / B + V + R = 1 - 3m / I$$

con S,	saturazione dell'immagine;
m,	valore minimo di intensità di riflessione nei tre diversi canali blu, verde e rosso;
B, V, R,	intensità di riflessione delle bande inserite rispettivamente nel canale blu, verde e rosso;
I,	somma dell'intensità di riflessione delle tre diverse bande utilizzate per costruire l'immagine a colori.

Il significato della formula può essere facilmente compreso dalla fig. 2. Il grafico rappresenta l'ampiezza dell'energia riflessa dalla superficie di un oggetto in un punto generico nelle tre bande che sono state utilizzate per costruire l'immagine a colori. L'intensità dell'immagine, che è data dalla somma delle ampiezze di riflessione nelle tre bande, è indicata dall'area totale sottesa dal grafico, mentre tre volte il valore minimo di riflessione è dato dall'area tratteggiata. Il complemento ad uno del rapporto fra le due aree definisce la saturazione.

Sulle nicchie di distacco più fresche la saturazione raggiunge valori più alti rispetto ai punti dove la roccia ha subito un processo di alterazione temporalmente più lungo.



Fig. 1 - Immagine a colori reali della parete di M. Albano; l'immagine è stata ripresa nel mese di giugno utilizzando un apparecchio fotografico digitale.

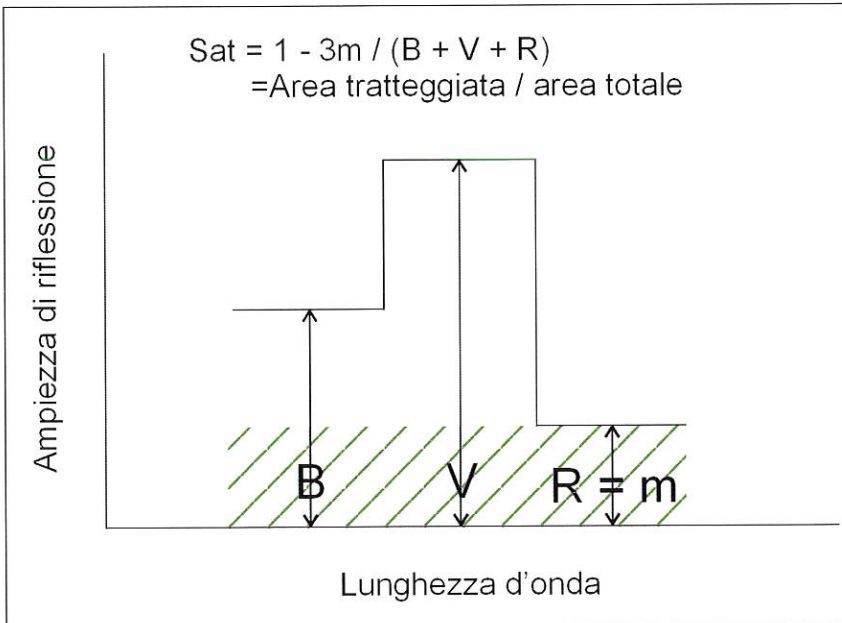


Fig. 2 - Grafico che mostra in quale modo viene calcolata la saturazione di un'immagine a colori (reali o falsi).

Un altro parametro che può essere utilizzato per caratterizzare le nicchie di distacco in base alla loro età relativa, è la polarizzazione. In genere qualsiasi superficie presente sulla parete rocciosa riflette la radianza con un piano di polarizzazione preferenziale. Questo però non avviene sulle superfici di distacco recenti poiché esse sono ricoperte per lo spessore di pochi millimetri da una polvere che si forma per la frantumazione della roccia durante le fasi di rottura. In realtà ogni piccola particella di polvere ha una direzione di massima riflessione della radianza che la colpisce. Tuttavia la somma degli effetti di polarizzazione di tutte le particelle rende nulla la capacità di polarizzare della nicchia fresca. Più quest'ultima invecchia, più da essa viene asportata la polvere di roccia e quindi nel tempo aumenta la capacità di polarizzare.

La capacità di polarizzazione della superficie di un oggetto si ottiene integrando su un intervallo di $\pi/2$ il rapporto fra le ampiezze della radianza riflessa raccolte secondo piani di polarizzazione ortogonali, per ogni valore angolare entro $\pi/2$. Quindi si può scrivere (TONELLI, 1998):

$$P = A_0 \int_0^{\pi/2} \{ \ln [R(x, y, \alpha) / R(x, y, \pi/2 + \alpha)] \}$$

con P, polarizzazione;
 A_0 , costante;
 $R(x, y, \alpha)$,
 $R(x, y, \pi/2 + \alpha)$, radianza riflessa secondo due piani ortogonali.

Nella pratica, la capacità di una superficie di polarizzare può essere evidenziata operando su un certo numero di immagini ottenute con un filtro polarizzante posto per ognuna in posizione diversa. Da queste poi si ricavano due ulteriori immagini che riportano per ogni *pixel* rispettivamente il valore massimo e quello minimo che quest'ultimo ha nell'intera serie di riprese che sono state eseguite. La polarizzazione si ottiene infine confrontando mediante rapporto l'immagine dei valori minimi con quella dei valori massimi. Quindi si può scrivere:

$$P = \arctg (\min / \max)$$

con P, polarizzazione;
 min, immagine che riporta per ogni *pixel* il valore minimo sull'intera serie di immagini;
 max, immagine che riporta per ogni *pixel* il valore massimo sull'intera serie di immagini.

Una superficie che non polarizza, sulle diverse immagini ottenute con filtro polarizzante in posizioni differenti, assume valori simili. Quindi il rapporto fra il valore minimo e quello massimo dà un risultato prossimo ad uno. Lavorando con un'immagine a toni di grigio e a 8 bit i valori saranno quindi alti e vicini a 255. Invece per superfici che polarizzano il rapporto dà dei quozienti bassi e l'immagine a toni di grigio appare scura.

Esiste inoltre anche un ulteriore metodo che permette di ricavare la polarizzazione che risulta essere il più veloce, ma che in ogni caso permette di ottenere dei risultati precisi. In questo caso si utilizzano solo tre immagini ottenute con filtro polarizzante posto in tre posizioni spaziate di 120° l'una dall'altra. Queste vanno unite in un'unica immagine a falsi colori e di questa va poi studiata la saturazione. L'immagine a falsi colori ha una saturazione maggiore dove l'intensità di riflessione acquisita nelle tre diverse direzioni è molto diversa e quindi per le superfici che polarizzano. Al contrario una bassa saturazione indica delle superfici che non polarizzano.

In fig. 3 sono state poste a confronto due immagini che riportano le aree della parete dalle quali si sono avuti i distacchi più recenti. L'immagine A è stata ottenuta con il metodo della saturazione di un'immagine della parete a colori reali. In questo caso la saturazione è stata riportata con una scala convenzionale a colori con valori crescenti dal nero al giallo. Le nicchie di distacco più fresche sono quindi indicate dal colore giallo. L'immagine B invece si basa sullo studio della polarizzazione. In questo caso è stato impiegato il metodo che utilizza solo tre diverse immagini. La polarizzazione è stata rappresentata con una scala convenzionale a colori per la quale la grandezza aumenta dal giallo al nero. In questo modo anche sulla figura 3B le nicchie di distacco fresche, che non polarizzano, appaiono in giallo.

Come si può osservare, i due metodi hanno dato dei risultati simili. Tuttavia, per questo caso, lo studio della saturazione ha dato delle distinzioni migliori. Infatti nell'immagine A le nicchie recenti appaiono di colore giallo e rosso su colori di fondo verdi e blu. Invece per l'immagine B il colore giallo permette una buona distinzione ma questo non vale per il rosso che risulta essere molto diffuso e quindi poco caratterizzante. È bene eseguire sempre i due metodi per poi scegliere per l'interpretazione l'immagine che dà i migliori risultati. Per la parete di M. Albano si può affermare che la parte alta è sicuramente più instabile dal momento che vi si trovano almeno quattro grandi zone di distacco (a, b, c, d). Nella parte bassa invece abbiamo un'unica grande area critica (e) con accanto delle altre più piccole (f). Anche le zone

lateralì, sia in alto sia in basso, sono praticamente stabili. Solo verso Nord - Est vi è un'area di distacco che non ha grandi dimensioni, ma che comunque si distingue nettamente (g).

LE FRATTURE

Il comportamento di un qualsiasi ammasso roccioso viene fortemente influenzato dalle caratteristiche delle sue fratture. Si deve infatti considerare che una frattura rappresenta comunque una direzione di debolezza lungo la quale la roccia non è più in grado di mobilitare le resistenze di picco. Inoltre affinché si possa realizzare un movimento franoso per crollo o ribaltamento, si deve realizzare la condizione che almeno tre discontinuità appartenenti a tre diverse famiglie di piani isolino un volume unitario di roccia.

Le fratture di una parete in roccia possono essere messe in evidenza su un'immagine a colori reali della parete come quella riportata in fig. 1. Su questa vanno segnate tutte le discontinuità che si possono osservare compresi anche gli spigoli della parete. In questa operazione ci si può aiutare anche con un'immagine della polarizzazione. Infatti qualsiasi discontinuità produce una polarizzazione della radianza incidente. Quindi nell'immagine B di fig. 3 le fratture appaiono con colori che variano dal verde al blu. Naturalmente per poterle osservare l'immagine deve essere vista con un ingrandimento maggiore rispetto a quello con il quale è stata riportata e questo è possibile con l'utilizzo di un computer.

Poiché sono state utilizzate delle immagini della parete riprese comunque da una certa distanza, dalla loro osservazione si possono evidenziare solo le fratture maggiori che hanno almeno una persistenza metrica. Si consideri che le fratture più corte che sono state segnate nella fig. 4 hanno una lunghezza compresa fra i 3 m e i 5 m. Sono comunque quest'ultime che a causa della loro lunghezza possono intercettare discontinuità di altre famiglie e quindi isolare blocchi di roccia di volume rilevante, i quali potranno poi staccarsi e cadere. Se servisse un'analisi di maggiore precisione si può comunque lavorare su immagini che riprendono in dettaglio solo una parte della parete e sulle quali sono rilevabili anche le fratture minori.

La fig. 4 presenta un'immagine in scala di grigi della parete di M. Albano sulla quale in nero sono state riportate le fratture. Ogni discontinuità è stata disegnata utilizzando un pennello largo due *pixels*.

Si può notare che i set principali delle fratture maggiori sono essen-

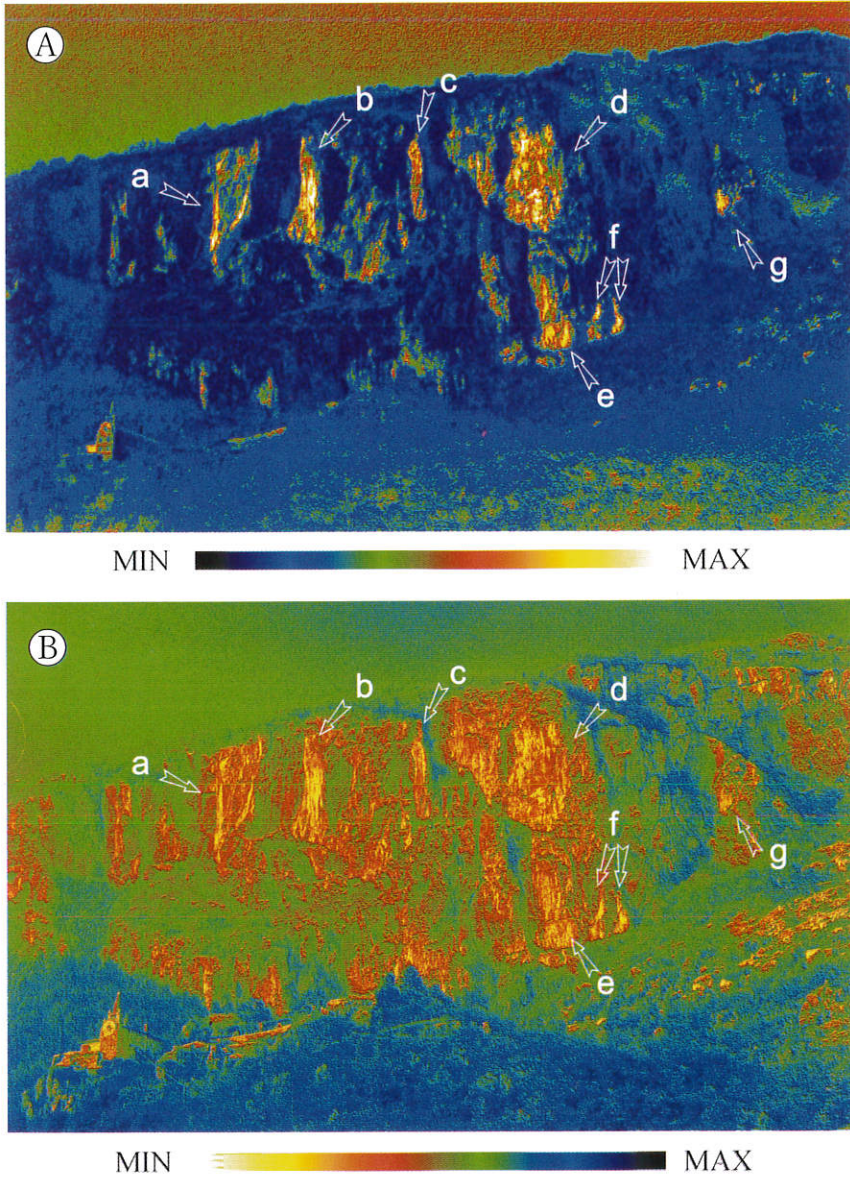


Fig. 3 - Classificazione delle nicchie di distacco in base alla loro età relativa, ottenuta attraverso la saturazione di un'immagine a colori reali (A) e la polarizzazione (B).



Fig. 4 - Fratture presenti sulla parete.

zialmente due. Uno di questi è legato alla stratificazione delle rocce calcareo dolomitiche e tende ad immergere debolmente verso SW. La stratificazione comunque risulta poco sviluppata, discontinua e molto spaziata. Questa è una caratteristica delle *facies* della Dolomia Principale che in genere si presentano massive e mal stratificate. Il secondo *set* è legato a fratture verticali o subverticali mediamente o molto persistenti. Si deve ricordare che l'inclinazione delle fratture che si ricava dall'immagine è quella reale solo se l'immersione delle discontinuità è parallela alla direzione lungo la quale si prolunga la parete (in questo caso Nord Est - Sud Ovest). In tutti gli altri casi l'angolo di immersione che si rileva è inferiore a quello reale.

In fig. 5A è stato riportato il campo di fratturazione della parete di M. Albano estrapolato dalla fig. 4. In questa immagine i *pixels* sono caratterizzati solo da due valori: 0 (nero) lungo le fratture, 255 (bianco) sulle restanti zone. A questo punto si può avere un'indicazione della distribuzione della densità di fratturazione facendo una media dei valori dell'immagine (0 o 255) su una matrice quadrata di lato uguale a 50 *pixels*. Il risultato di questa operazione è stato presentato in fig. 5B. Le zone caratterizzate da una fratturazione più fitta sono caratterizzate dai colori nero, blu e verde. In quest'ultima immagine sono state riportate anche le nicchie di distacco recenti ottenute con il metodo della polarizzazione. In realtà non si nota una chiara relazione fra le aree maggiormente fratturate e gli ultimi distacchi. Questo significa che i movimenti di instabilità attuali non vengono controllati ed influenzati dalle discontinuità maggiori. Vanno comunque segnalati almeno tre punti della parete evidenziati nella figura 5B dalle frecce. Queste aree sono caratterizzate da una fratturazione particolarmente fitta ed inoltre sono vicine a delle nicchie ancora fresche che indicano che vi sono stati dei crolli recenti. Ci si può aspettare che dalle zone molto fratturate possano avvenire ulteriori distacchi di roccia come conseguenza delle condizioni di particolare disequilibrio dovuto alla fitta fratturazione.

LA TERMOGRAFIA

Se per un corpo è trascurabile l'irradianza riflessa, allora una termografia fornisce informazioni sulla radianza irraggiata. Questa dipende dall'emissività e dalla temperatura assoluta di un oggetto.

Utilizzando termografie acquisite in tempi diversi si può ottenere uno studio della capacità termica dei materiali che costituiscono una parete in roccia. La capacità termica di un oggetto dipende dal prodot-

to fra il suo calore specifico e la sua massa. Poiché il calore specifico varia assai poco per i vari litotipi, una variazione di capacità termica lungo una parete in roccia è collegata ad una variazione di massa. Essendo la profondità di investigazione che si ottiene con una termografia costante su tutta la parete che viene ripresa, e pari a pochi decimetri di spessore, ed inoltre essendo praticamente costante su tutta un'immagine la dimensione di ogni singolo *pixel*, allora si può ammettere che ogni *pixel* riprende il comportamento di un volume di roccia costante. Quindi le variazioni di massa che si possono mettere in evidenza su una parete attraverso il comportamento della capacità termica, sono in realtà correlate linearmente ad una variazione della densità della roccia. Attraverso la capacità termica si riescono ad evidenziare in questo modo le aree di un ammasso roccioso dove la densità è minore a causa di un maggiore detensionamento, di una fratturazione più fitta e di un grado di alterazione maggiore.

Nella situazione in cui le superfici di un oggetto sono sottoposte a riscaldamento disomogeneo si preferisce descrivere la sua capacità termica studiando il comportamento termico durante una fase di raffreddamento naturale (transitorio di raffreddamento). In questo caso la variazione della temperatura nel tempo è definita dall'equazione di *Fourier - Newton* (TONELLI, 1998):

$$T(t) - T(t_3) = [T(t_1) - T(t_3)] e^{-hSt / cm}$$

con h,	coefficiente di adduzione termica che tiene conto del fenomeno di emissione e convezione;
S,	area unitaria considerata corrispondente all'area dell'elemento immagine di una termografia;
t,	tempo trascorso tra l'inizio della fase di raffreddamento e il momento di acquisizione della temperatura T(t);
cm,	capacità termica;
T(t),	temperatura al tempo t;
T(t1),	temperatura iniziale del transitorio di raffreddamento;
T(t2),	temperatura finale del transitorio di raffreddamento.

Il grafico di fig. 6C rappresenta l'abbassamento di temperatura nel transitorio di raffreddamento in base all'equazione di *Fourier - Newton* per corpi a diversa capacità termica. Si può osservare che per uno stesso intervallo di tempo i corpi ad alta capacità termica subiscono un

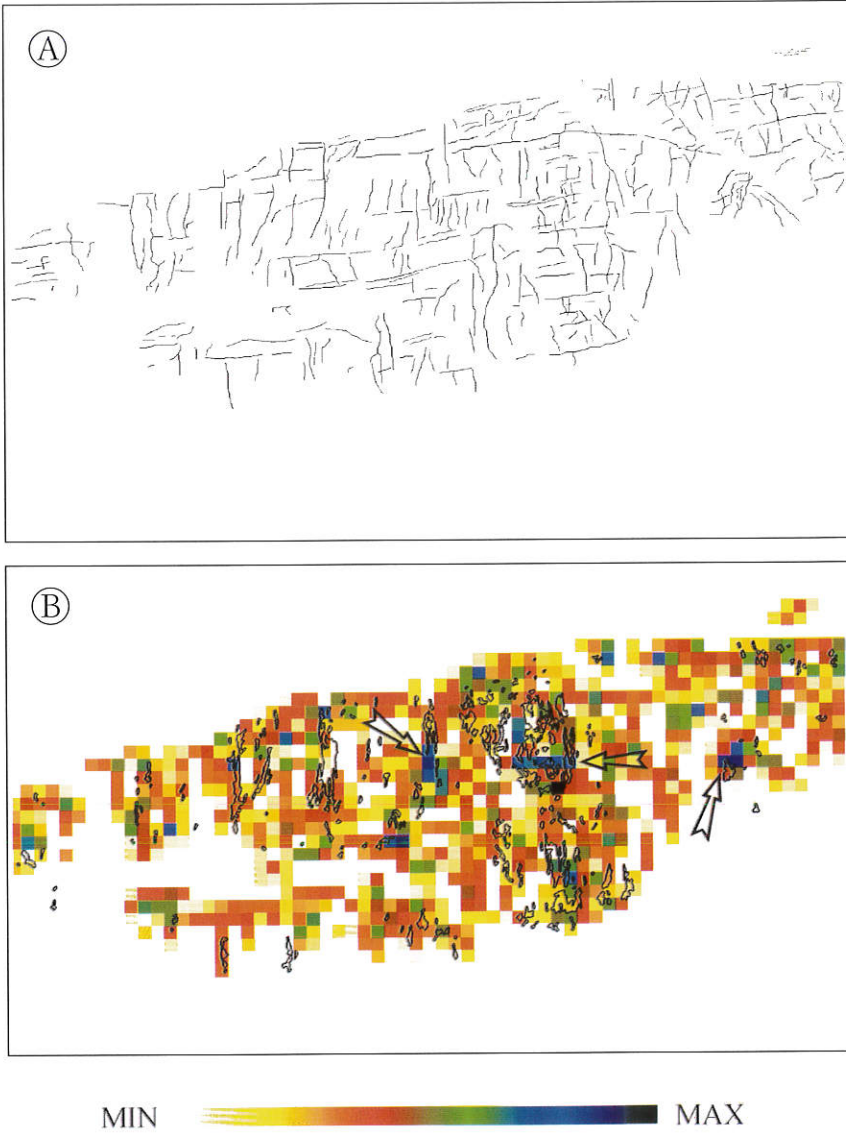


Fig. 5 - A) Campo di fratturazione della parete di M. Albano; B) Densità delle fratture confrontata con le nicchie di distacco.

minore abbassamento della temperatura. Quindi essi si raffreddano (e si riscaldano) più lentamente rispetto agli altri.

Esplicitando la formula secondo la capacità termica si ottiene:

$$cm = hSt / \ln \{ [T(t_1) - T(t_3)] / [T(t) - T(t_3)] \}$$

In genere il coefficiente di adduzione h varia poco sulla superficie studiata e quindi può essere assimilato ad una costante. Anche l'area S dell'elemento immagine è costante per una termografia e così pure il tempo t che diventa il tempo t_2 della seconda ripresa.

Quindi acquisendo tre diverse riprese termografiche la capacità termica può essere ottenuta dalla formula:

$$cm = A_0 / \ln \{ [T(t_1) - T(t_3)] / [T(t_2) - T(t_3)] \}$$

con cm , capacità termica;
 A_0 , costante;
 $T(t_1), T(t_2), T(t_3)$, temperatura delle tre diverse riprese termografiche ottenute durante la fase di raffreddamento.

La capacità termica si può ottenere anche utilizzando solo due termografie riprese in transitorio di raffreddamento e mettendole a confronto attraverso una differenza. Il risultato di questa operazione, come si può capire consultando il grafico di fig. 6C, dà dei valori più elevati per i corpi a bassa capacità termica.

In fig. 6A è riportata la distribuzione della capacità termica sulla parete di M. Albano con una scala convenzionale a colori per la quale la grandezza aumenta dal nero al giallo. Esiste una buona correlazione fra questa immagine e quella della saturazione di un'immagine a colori reali riportata in fig. 3A. La maggior parte delle aree ad elevata capacità termica coincide con le nicchie di distacco più fresche. Questo significa che i crolli hanno eliminato la parte superficiale della roccia più alterata e detensionata. Nelle nicchie di distacco recenti la roccia è invece più compatta e fresca. Si può quindi affermare che nella maggioranza dei casi i distacchi di roccia dalla parete riguardano solo la parte alterata di quest'ultima ed interessano solo degli spessori modesti di materiale. Le aree in blu sono quelle dalle quali è più facile aspettarsi in futuro dei distacchi con le modalità descritte sopra. Sopra la chiesa di M. Albano esiste un'area molto estesa, che si prolunga in orizzontale e che mostra dei bassi valori di capacità termica. Quest'area è in realtà un terrazzo in roccia debolmente inclinato verso l'esterno della parete. La superficie del terrazzo è probabilmente coperta da depositi di detrito

costituiti da elementi che si sono staccati dalla parte superiore della parete. La minore capacità termica di questa zona è probabilmente collegata alla presenza di questi depositi.

Da alcune termografie della parete di M. Albano riprese nel mese di marzo è stato notato che esistono due punti nei quali si registrano delle anomalie termiche (fig. 7A). In questi due punti la temperatura superiore ai 13° mentre i valori medi della roccia oscillano fra gli 8° e i 10°. È stato ipotizzato che esistano delle aperture nella parete collegate ad un reticolo carsico interno, e dalle quali esce dell'aria che nei mesi invernali ha una temperatura superiore a quella esterna dell'ambiente esterno. Questo fatto è stato confermato anche dallo studio della densità della vegetazione presente sulla parete. La vegetazione riflette la radianza incidente mediamente nel verde (intorno al 15%), poco nella regione del rosso (intorno al 6%) poiché l'energia viene assorbita per attuare il processo di fotosintesi, e moltissimo nell'infrarosso prossimo (anche oltre il 50%) (fig. 7C). Quindi costruendo un'immagine a falsi colori inserendo le bande verde, rosso e infrarosso rispettivamente nei canali blu, verde e rosso una maggiore densità della vegetazione è messa in evidenza da un colore rosso molto accentuato. Questa operazione è stata eseguita su delle immagini acquisite alla fine del mese di marzo, e quindi in piena ripresa vegetativa, con una telecamera digitale. La fig. 7B mostra chiaramente che nei punti nei quali vi sono le anomalie termiche la vegetazione alla fine del mese di marzo ha avuto uno sviluppo più rapido rispetto alle aree limitrofe, probabilmente a causa dei microclimi locali maggiormente favorevoli e caratterizzati da temperature maggiori e più stabili nel tempo.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo studio è stato quello di analizzare la stabilità di una parete in roccia utilizzando varie tecniche di telerilevamento, ponendo così mettere in evidenza alcune caratteristiche della roccia. Questo permette di ottenere una valutazione complessiva dello stato di equilibrio della parete e di mettere in evidenza i punti più critici.

La ricerca delle nicchie di distacco recenti è stata eseguita attraverso lo studio della saturazione di un'immagine a colori reali e della polarizzazione. I due metodi hanno dato risultati simili.

Le fratture sono state evidenziate utilizzando immagini della parete a colori reali e immagini della polarizzazione. In questo caso risulta essere importante la distanza dalla quale sono state fatte le riprese. Più

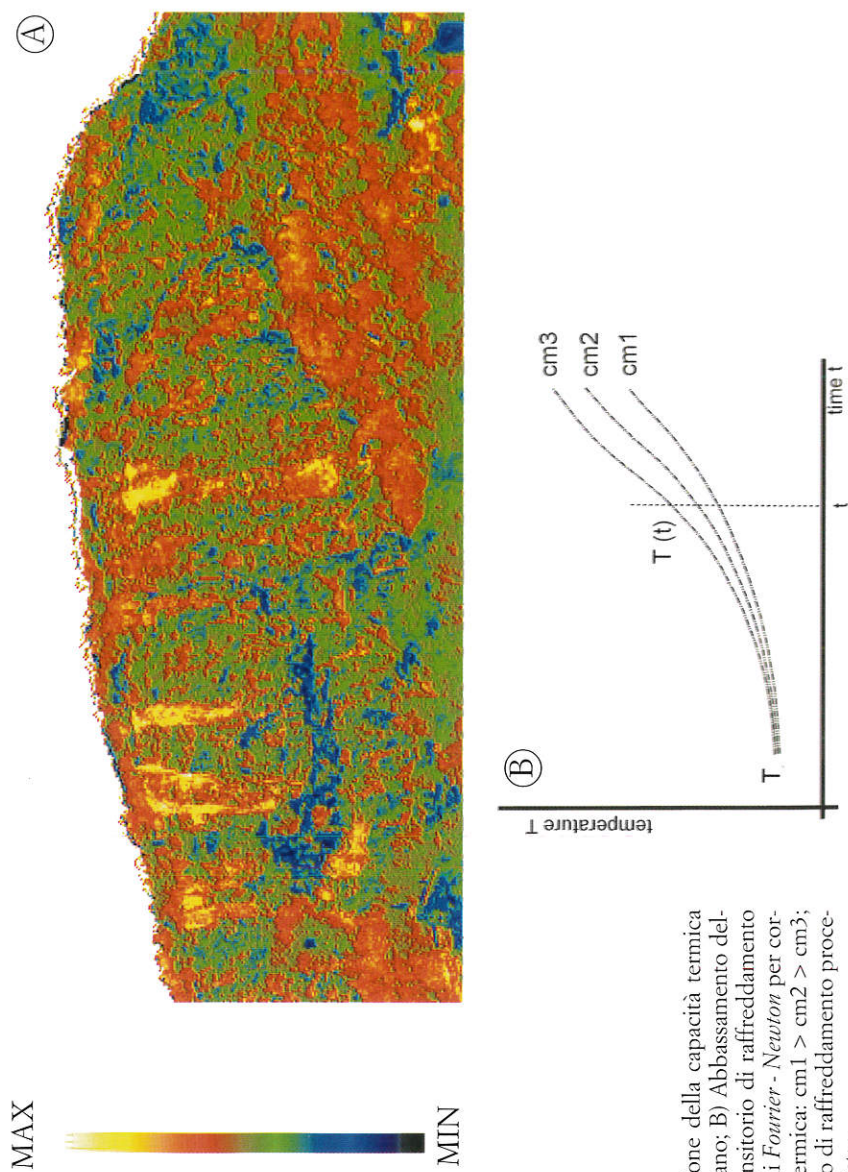


Fig. 6 - A) Distribuzione della capacità termica sulla parete di M. Albano; B) Abbassamento della temperatura nel transitorio di raffreddamento in base all'equazione di *Fourier - Newton* per corpi a diversa capacità termica: $cm1 > cm2 > cm3$; nel grafico il transitorio di raffreddamento procede da destra verso sinistra.

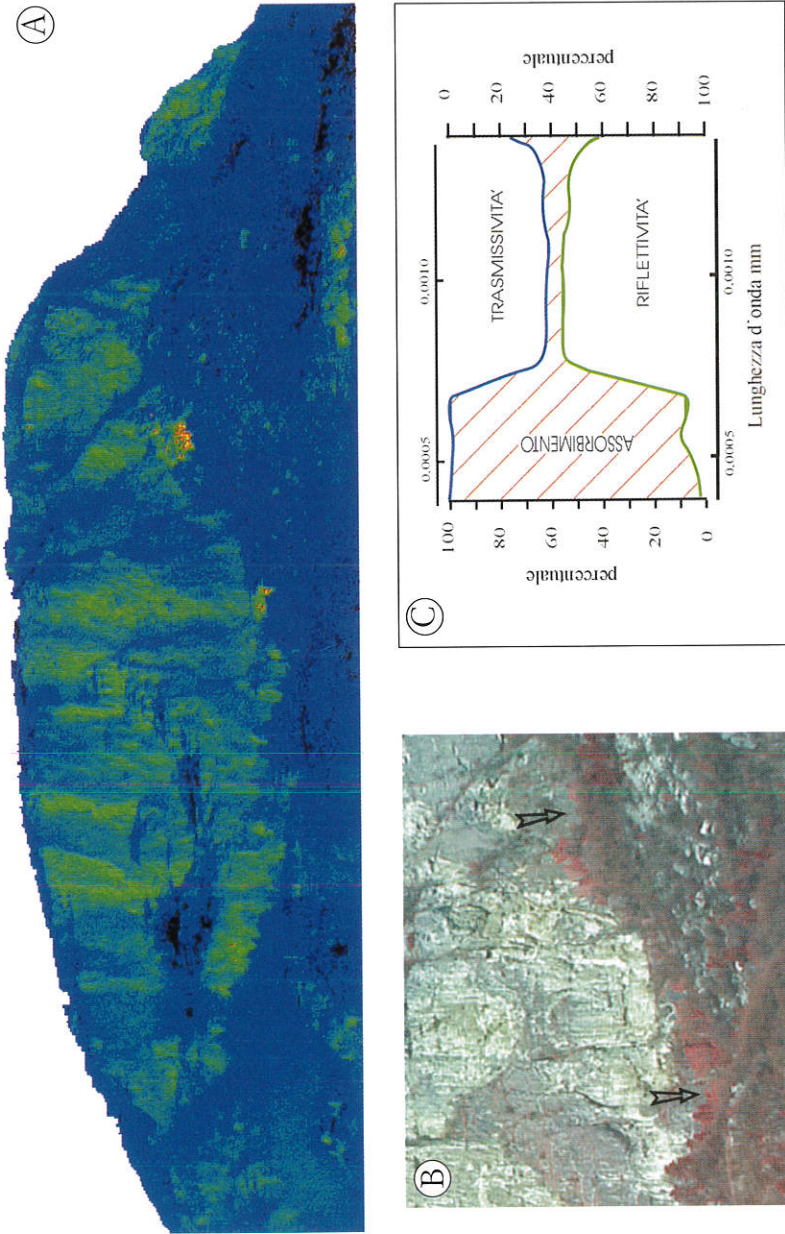


Fig. 7 - Fori carsici presenti alla base della parete, scoperti attraverso il confronto fra una termografia (A) e un'immagine a falsi colori (blu: banda del verde, verde: banda del rosso, rosso: banda dell'infrarosso prossimo (B); C) comportamento della vegetazione rispetto alla riflessione nel campo del visibile e dell'infrarosso.

queste sono elevate più la ricostruzione del sistema di fratturazione della parete comprende solo le discontinuità maggiori e persistenti.

Infine lo studio della capacità termica ha permesso di localizzare i punti dove la roccia risulta essere maggiormente fratturata e detensionata.

Per quanto riguarda la stabilità della parete di M. Albano, vista la presenza di nicchie di distacco fresche, è chiaro che anche attualmente si registrano dei distacchi. Questi però interessano perlopiù solo la parte superficiale e alterata della roccia. Quindi ci si deve aspettare che il volume degli elementi che si possono staccare non sia elevato.

Esistono comunque tre punti critici che sono stati segnati sulla figura 5B e che riguardano delle aree molto fratturate e in prossimità delle quali vi è l'evidenza di crolli recenti. Per questi punti la quantità di materiale potenzialmente instabile potrebbe essere rilevante, ed inoltre i volumi dei singoli blocchi potrebbero essere superiori al metro cubo.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare Arnaldo Tonelli, che considero il mio maestro nel campo del telerilevamento, per il grande contributo che ha dato alla stesura di questo articolo e alla fase di ricerca che lo ha preceduto. Un sentito ringraziamento va al Dott. Franco Finotti che ha reso possibile la pubblicazione di questo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- BARTOLOMEI G. (1974) - I talus detritici e la stabilizzazione del versante destro della valle dell'Adige nella zona di Trento, *Studi trentini di Sc. Nat.*, N.S., 51, a, pp. 213-228, fig. 13, Trento.
- FINOTTI F. (1981), Note illustrative della carta geologica del Monte Baldo settentrionale, *Pubblicazione della Società Museo Civico di Rovereto*, fig. 6, tav. 8, 1 carta geologica (scala 1: 25.000), 1 carta profili.
- TONELLI A. M. (1998), Complementi di telerilevamento, *Luni editrice*, Milano.
- TONELLI A. M. (1995), Metodi di telerilevamento da postazione fissa nella caratterizzazione di superfici e del primo spessore della massa, *Riv. It. Telerilevamento*, 5, pp. 13-22, fig. 11.

Indirizzo dell'autore:

Dr. Mirko Santacattarina, Via Benacense, 46/C - I-38068 Rovereto (TN), Italia
