

Studio, mitigazione e monitoraggio della frana di crollo coinvolgente la strada comunale “Tagliole-Lago Santo” (Comune di Pievepelago, Appennino modenese)

Enrico Leuratti *, Claudio Corrado Lucente *, Elena Medda *, Alessandro Corsini**,
Annalisa Borghi*, Lisa Borgatti**

* Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacini Enza, Panaro e Secchia, Sede di Modena, Via Fonteraso, 15 41100 Modena, E-mail: Eleuratti@regione.emilia-romagna.it; Clucente@regione.emilia-romagna.it; Emedda@regione.emilia-romagna.it; ABorghi@regione.emilia-romagna.it

**Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio Emilia, Largo S. Eufemia, 19 41100 Modena, E-mail: alessandro.corsini@unimore.it; lisa.borgatti@unimore.it

Study, mitigation and monitoring of a rock fall affecting a local road near Pievepelago (Modena Apennines, Italy)

ABSTRACT. The Groppe delle Tagliole arenaceous ridge, located in the Modena Apennines, Italy, has been affected by several rock falls which have made the passage along the Tagliole-Lago Santo local road hazardous. The complexity of this mass wasting process has required a specific study before any remedial measure could be implemented. Therefore, geomechanical investigations were carried out on the rocky slope and simulations of rock falls were set up, in order to obtain the necessary information for choosing the most effective interventions. Eventually, the option fell on high energy absorption rock fall protective barriers with rock catch nets, which were fixed after preliminary works of rock removal and trimming were completed on all the unstable slope. After the completion of works, a monitoring system was set up for the control of some high-risk cracks. So far, the interventions carried out by the Basin Technical Service of Modena have been effective, although constant monitoring of this rock slope is still necessary.

Key terms: Modena Apennines, Rock fall, Geomechanical analysis, Protective barriers, Monitoring

Termini chiave: Appennino modenese, Frane di crollo, Analisi geomeccanica, Barriera paramassi, Monitoraggio

Riassunto

Il versante roccioso *Groppe delle Tagliole* collocato nell'alto Appennino modenese, comune di Pievepelago è stato interessato da diversi episodi di crollo di massi che hanno reso altamente rischioso il transito lungo la strada Tagliole-Lago Santo.

Trattandosi di una tipologia di dissesto particolarmente pericolosa, essendo le frane di crollo praticamente istantanee ed imprevedibili, è stato necessario intervenire con estrema sollecitudine. Tuttavia, la complessità del fenomeno ha richiesto uno studio specialistico propedeutico a qualsiasi intervento. Pertanto, è stato avviato uno studio geomeccanico dell'ammasso roccioso ed una serie di simulazioni di caduta massi per ottenere le necessarie indicazioni per scelte progettuali più idonee alla risoluzione del problema.

Tenuto conto dei dati emersi durante la fase di studio e considerate le condizioni generali del versante si è optato principalmente per l'impiego di barriere paramassi ad elevato assorbimento energetico completando i lavori di messa in sicurezza in alcuni punti critici mediante l'impiego di pannelli di rete ad alta resistenza previa pulizia e disaggio eseguiti su tutta l'area dissestata. A conclusione

degli interventi è stato installato un sistema di monitoraggio per il controllo di alcune fratture ritenute particolarmente a rischio.

Ad oggi, gli interventi eseguiti dal Servizio Tecnico di Bacino, sede di Modena, si sono rivelati efficaci, sottolineando, tuttavia, la necessità di continuare a monitorare il versante roccioso in tutta la sua estensione.

Introduzione

Negli ultimi anni i fenomeni di crollo, sia pure meno comuni di altre tipologie di frane in Appennino, si sono manifestati con una certa frequenza in tutto il territorio regionale in stretta relazione con le correnti condizioni meteorologiche e climatiche.

Fra le frane di crollo registrate di recente nell'Appennino modenese si segnala il fenomeno che ha interessato in più episodi fra il 1997 e il 2002 la strada comunale Tagliole-Lago Santo in comune di Pievepelago (Fig. 1), più volte interrotta al traffico per la presenza, sulla carreggiata, di massi anche di dimensioni ragguardevoli. Trattasi di un'importante via di comunicazione piuttosto frequentata sia nel periodo estivo che invernale.

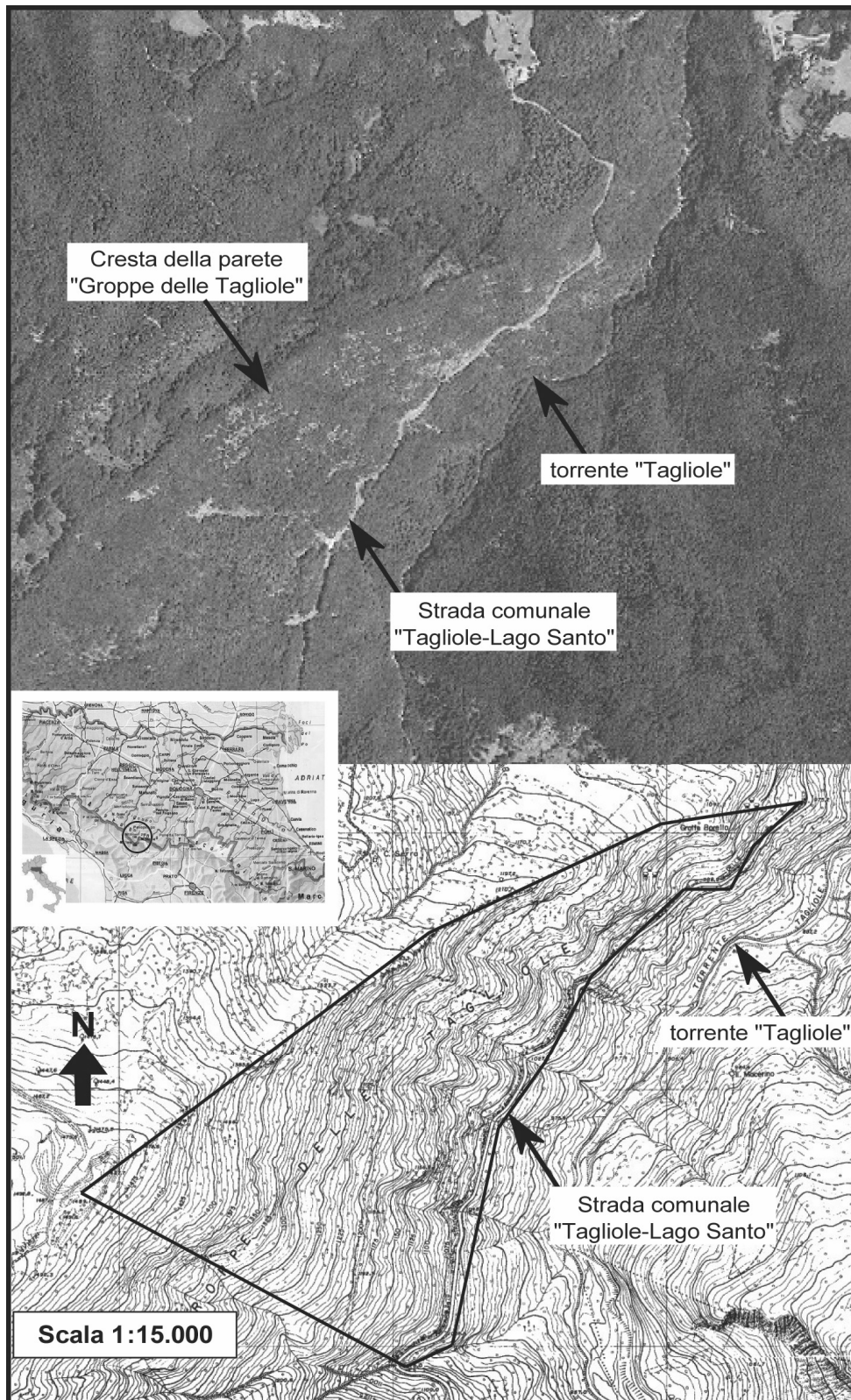


Fig. 1 – Ubicazione del versante roccioso che insiste sulla strada comunale Tagliole-Lago Santo, in comune di Pievpelago, Appennino modenese

Fig. 1 – Location of the rock slope overlooking the Tagliole-Lago Santo road (Modena Apennines)

Il dissesto interessa un'ampia porzione del versante denominato "Groppe delle Tagliole" (quota massima 1300 m s.l.m.) in fregio alla succitata strada comunale per un fronte di 1500 m. L'area si trova all'interno della valle del Torrente Tagliole, affluente di destra del Torrente Scoltenna (bacino Fiume Panaro), collocata sul versante nord-orientale dell'Appennino tosco-emiliano, a ridosso della linea di crinale.

Il fenomeno classificabile in generale come frana di crollo (Cruden & Varnes, 1996), comporta una serie di cinematismi che vanno dallo scorrimento o ribaltamento, nelle fasi iniziali di svincolo dei blocchi rocciosi, alla caduta libera, impatto, rimbalzo, rotolamento e scivolamento fino all'arresto (Merlini *et al.*, 2004). L'elevato grado di alterazione e fratturazione della roccia e la disposizione delle fratture sono le condizioni predisponenti, mentre le cause dirette sono imputabili a fenomeni crioclastici e allo sviluppo di elevate pressioni interstiziali nelle discontinuità. Eventuali scosse sismiche possono favorire i fenomeni di crollo.

Il presente lavoro intende illustrare gli interventi che sono stati eseguiti per consentire il transito in sicurezza della citata strada comunale. A tale fine, tenuto conto della vastità dell'area e considerata la necessità di eseguire delle indagini conoscitive, è stata scelta una strategia di intervento articolata in tre stralci funzionali per un importo complessivo di € 1.720.500,00.

I Per la fase conoscitiva sono stati realizzati un rilievo geomorfologico di dettaglio dell'area interessata dal dissesto ed una analisi geomeccanica dell'ammasso roccioso.

Inoltre, sono state condotte delle simulazioni di caduta massi lungo sezioni del versante ritenute più a rischio, per ricavare opportune indicazioni sulla tipologia, sul dimensionamento e sulla ubicazione di opere di difesa.

A fine lavori è stato installato un sistema di monitoraggio dotato di stazione di raccolta dati e di una rete di fessurimetri posati in parete per il controllo di alcune fratture a rischio di evoluzione.

Inquadramento geologico e geomorfologico

La parete rocciosa delle "Groppe delle Tagliole" è costituita da un'unica formazione, nota come *Arenarie di Monte Modino* (Fig. 2); *flysch* di età aquitaniana considerato da alcuni autori come il termine stratigrafico più alto della Falda Toscana (Abbate & Bortolotti, 1961; Nardi & Tongiorgi, 1962). Secondo questa interpretazione la successione torbiditica delle Arenarie di M. Modino sarebbe in continuità stratigrafica con la sottostante successione del Macigno attraverso un'unità caotica di provenienza prevalentemente "ligure" (Perilli, 1994; De Libero, 1998; Pini et al., 2004), la cui messa in posto è attribuita a processi sedimentari (olistostroma di Modino, complesso caotico di Modino: Abbate et al., 1970, 1981; Sagri, 1975; Lucente et al., 2006).

Secondo altri invece le Arenarie di M. Modino sarebbero parte di un'unità tettonica separata dalla Falda Toscana, denominata Unità *Modino-Cervarola* (Reutter,

1969; Plesi, 1975; Martini & Plesi, 1988; Bettelli et al., 1989) e più recentemente Unità Modino, sottounità Modino-Pievepelago (Chicchi & Plesi, 1990; Plesi et al., 2000). In questo caso l'unità caotica intercalata fra il Macigno e le Arenarie del M. Modino sarebbe la parte basale dell'unità tettonica (*mélange* di Modino).

Senza entrare in merito alle diverse interpretazioni, le Arenarie di M. Modino sono comunque parte del cosiddetto Dominio Toscano che assieme al Dominio Umbromarchigiano caratterizzava il paleomargine della placca africana in contrapposizione al Dominio Ligure, che, invece, si sviluppava nel bacino oceanico ligure-piemontese separante la placca africana da quella europea. Gli attuali rapporti strutturali, con le unità liguri al di sopra delle unità del Dominio Toscano a loro volta sovrascorse sulle unità del Dominio Umbromarchigiano, sono il risultato dello scontro delle due citate placche e dei successivi raccorciamenti e traslazioni subite durante l'orogenesi appenninica.

Dal punto di vista litologico, le Arenarie di M. Modino sono un'alternanza di strati torbiditici arenaceo-pelitici che nell'area di studio hanno un rapporto arenaria/pelite ≥ 1 , in strati da sottili a molto spessi con una porzione arenacea di colore grigio, a granulometria da fine a molto grossolana (nei banconi più spessi) passante a sottili intervalli argilloso-marnosi grigio-scuri. La successione che si sviluppa nella valle del torrente Tagliole raggiunge lo spessore di alcune centinaia di metri ed è organizzata in pacchi metrici di strati medi e sottili alternati a pacchi decametrici di strati medi e molto spessi, quest'ultimi a formare pareti sub-verticali (Fig. 2).



Fig. 2 – Panoramica della parete rocciosa nel tratto ritenuto più a rischio per il crollo di elementi lapidei dove si sviluppano pareti sub-verticali aggettanti sulla strada comunale Tagliole-Lago Santo (foto Rambaldi, 2004)

Fig. 2 – Panoramic view of the rock face along the Tagliole-Lago Santo road where rock falls have frequently occurred: overhanging sandstone layers can be observed all along the slope (photo by Rambaldi, 2004)

Nella zona sono presenti forme riconducibili a controlli strutturali ed all'azione dell'acqua superficiale e alla gravità, che hanno modellato un versante caratterizzato da un'elevata acclività per la prevalenza di litologie arenacee.

Particolarmente sensibile all'assetto del substrato e alla presenza di lineamenti tettonici (morfostrutture in Panizza, 1995) risulta l'andamento dei corsi d'acqua minori, incanalati in strette e ripide vallecicole con la tipica sezione a "V".

I processi più rilevanti nell'area sono quelli dovuti all'azione combinata della forza di gravità e delle condizioni climatiche. Nella zona si riscontrano forti escursioni termiche dell'ordine dei 30-40 °C annuali che, associate agli alti valori di intensità e frequenza delle piogge (ca. 1475 mm/anno a 900 m s.l.m. con punte di 3370 mm/anno a 2000 m s.l.m.) ed alla presenza di precipitazioni nevose (la neve al suolo è pressoché continua durante tutto il periodo invernale oltre i 1000 m di quota), induce a diffusi processi di degradazione superficiale. Tale degradazione interessa tutta l'area in esame, producendo un'ampia copertura detritica alla base del versante legata a fenomeni di crollo per distacco di porzioni di roccia.

Studio geomeccanico dell'ammasso roccioso

A seguito dei rilievi sul terreno sono stati distinti due litotipi o litofacies principali: a) marne e marne argillose fogliettate, in strati decimetrici, alternate a strati arenacei quarzoso-micacei e b) banconi compatti di arenarie quarzoso-micacee in banchi di potenza plurimetrica (5-15 m). I banconi formano pareti sub-verticali alte 30-40 m interrotti, e quindi rientranti in corrispondenza della litofacies a) più erodibile, a formare gradoni piuttosto continui anche lateralmente (Fig. 2).

Non essendovi significative zone di diaclasi e tenuto conto che la fratturazione riscontrata nel versante roccioso è omogenea, le due litofacies sopra descritte si possono ritenere rappresentative delle diverse condizioni dell'ammasso roccioso. Sono state pertanto predisposte una stazione di misura sulla litofacies a) e due stazioni di misura sulla litofacies b) (Fig. 3).

Sono state effettuate tre stazioni di misura su affioramenti rocciosi ritenuti rappresentativi delle diverse condizioni dell'ammasso roccioso seguendo la seguente metodologia:

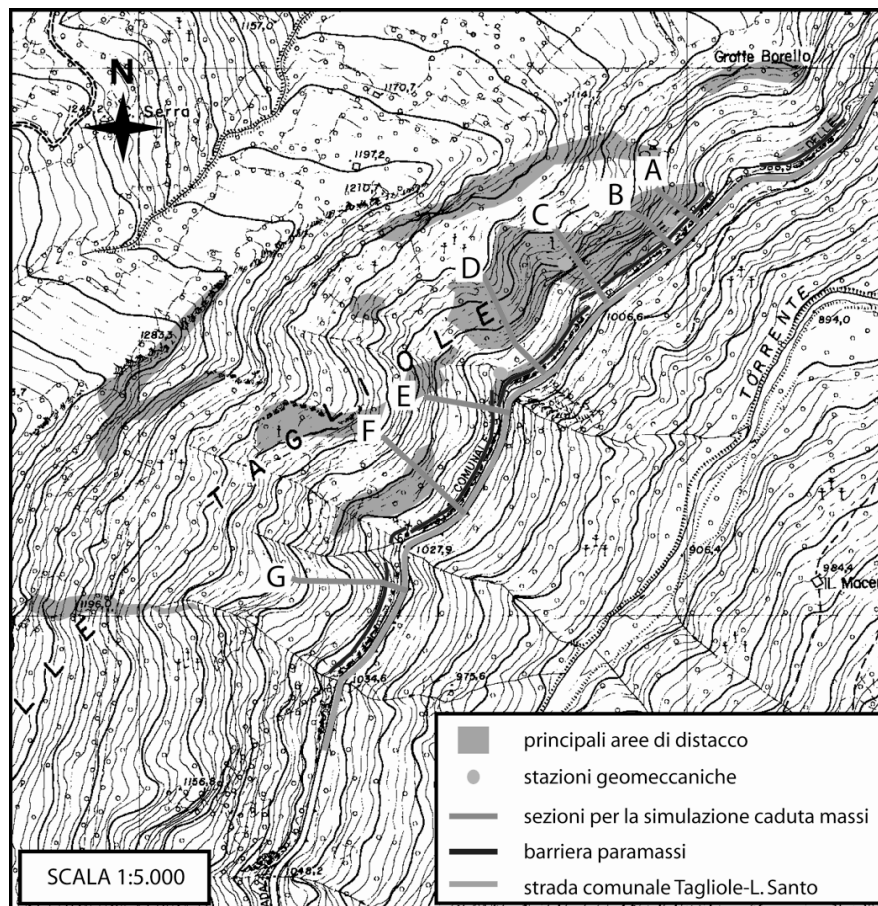


Fig. 3 – Ubicazione delle stazioni geomeccaniche e delle sezioni per la simulazione caduta massi in relazione alle principali zone di distacco e sulla base dell'ipotesi di ubicazione di barriere paramassi

Fig. 3 – Location of geomechanical stations and sections for simulation of rock falls from the main detachment zones with the hypothetical presence of rock fall protective barriers

1. rilievo sistematico della giacitura delle discontinuità con misurazione dei parametri caratteristici dei giunti;
2. elaborazione statistica dei dati e determinazione delle principali caratteristiche di discontinuità;
3. classificazione dell'ammasso roccioso.

Analisi delle discontinuità

Per la verifica dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso è stato eseguito il rilievo delle principali discontinuità riconoscibili in parete procedendo alla raccolta delle giaciture campionate e rappresentandole in diagrammi stereografici equiangolari (reticolo di Schmidt) come inclinazione/immersione azimutale. A titolo di esempio vengono rappresentati i dati relativi alla stazione di misura n. 3 (Fig. 4); in ogni stazione geomeccanica sono stati individuati 3 sistemi principali di discontinuità (D1, D2 e D3). Rimane comunque l'incognita non trascurabile di quanto si spingono in profondità tali fratture ovvero della loro reale persistenza. Questa è certamente elevata per la famiglia D3, che rappresenta la stratificazione. Le famiglie D1 e D2 sono invece sistemi di fratture persistenti alla scala dell'affioramento, che possono originare cunei nei pressi della parete rocciosa. La linea di intersezione di tali discontinuità immerge in direzione prossima ($\pm 20^\circ$) a quella di immersione del versante ed ha un'inclinazione considerevole, superiore all'angolo di attrito di base dei litotipi arenacei, stimabile in circa $35\div 40^\circ$, ed inferiore a quella del versante. Ciò fa sussistere le condizioni per lo sviluppo di scivolamenti di cunei lungo tali sistemi di discontinuità.

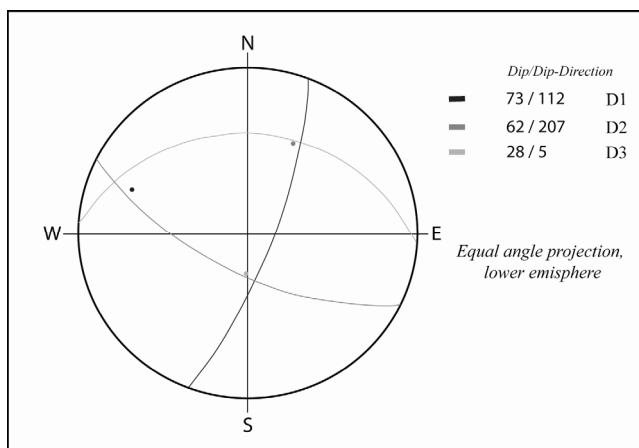


Fig. 4 - Stereogramma polare equiangolare mostrante l'orientazione nello spazio dei principali sistemi di discontinuità per la stazione di misura n. 3

Fig. 4 - Polar equiangular stereogram showing the space orientation of the main discontinuity systems in measurement station no. 3

Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso

Esistono diversi metodi per ricavare i parametri geomeccanici degli ammassi rocciosi; nel caso specifico sono stati adottati il metodo "RMR Rock Mass Rating" (Bieniawski, 1989) ed il metodo "Q Classification System"

(Barton *et al.*, 1974).

Quella di Bieniawski (1989) è una delle classificazioni più usate in geomeccanica perché piuttosto adattabile a diverse situazioni quali gallerie, fondazioni e pendii. Nel caso del metodo RMR le qualità dell'ammasso roccioso sono espresse mediante un indice che a sua volta è la sommatoria di altri cinque parametri:

1. UCS (*Uniaxial Compressive Strength*), resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
2. RQD (*Rock Quality Designation Index*) funzione della frequenza delle discontinuità;
3. spaziatura media totale per ogni famiglia di discontinuità;
4. apertura delle discontinuità e presenza di riempimenti;
5. condizioni idrauliche.

Tali parametri sono stati elaborati a partire da dati di rilievi eseguiti su linee di scansione orizzontali e verticali. In particolare, il valore medio di UCS è stato ottenuto mediando i valori ottenuti da più prove con sclerometro (martello di Schmidt), mentre il valore di RQD è stato stimato dal numero di discontinuità per metro lineare attraverso la relazione di Priest & Hudson (1976).

Nel metodo di Barton *et al.* (1974) l'ammasso roccioso viene valutato attraverso l'indice Q che si ottiene dalla seguente relazione:

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF) \text{ dove}$$

J_n (*Joint Set Number*) è correlato al numero di discontinuità, J_r (*Joint Roughness Number*) tiene conto della scabrezza dei giunti e del loro andamento, J_a (*Joint Alteration Number*) considera il grado di alterazione delle fratture e la presenza di riempimenti, J_w (*Joint Water Reduction Factor*) dipende dalle condizioni idrauliche e SRF (*Stress Reduction Factor*).

Va comunque precisato che tali classificazioni sono nate per applicazioni in sotterraneo (gallerie) e che non danno risposte affidabili negli ammassi rocciosi spiccatamente anisotropi come nel caso della litofacies a) e pertanto i valori qualitativi vanno maneggiati con cautela.

Da un punto di vista operativo la qualità dell'ammasso roccioso è stata determinata considerando solo le discontinuità dominanti e maggiormente "penalizzanti" in ciascuna delle due litofacies e perciò per la litofacies a) sono stati esaminati i giunti di strato, mentre per la litofacies b) le discontinuità sub-verticali con andamento normale alla parete.

Per completezza vengono rappresentate le tabelle (Tabb. 1, 2, 3 e 4) relative ad entrambi i metodi per due distinte stazioni di misura, onde apprezzare le differenze fra le due litofacies descritte.

Sulla base delle osservazioni compiute si possono distinguere due classi di ammasso roccioso rispecchiando le condizioni di partenza e cioè:

a) *ammasso roccioso di qualità scadente*, costituito da arenarie e marne sottilmente stratificate, molto alterabili e facilmente erodibili - i settori di versante dove affiora prevalentemente questa classe di roccia presentano

Tab. 1 – Valutazione dell'ammasso roccioso secondo Bieniawski (1989) relativamente alla stazione di misura n. 3.

Tab. 1 – *Rock mass assessment according to Bieniawski (1989) at measurement station no. 3.*

Stazione 3 - litofacies a					
Indice	Parametro	Valore d'ingresso	Valore		Punteggio
1	Resistenza del litotipo intatto	Point Load Test	0	Is	0
		Compressione uniass.	15 - 30	Mpa	4
2	RQD		30	%	6.06
3	Condizione dei giunti	3-A) Lunghezza (persistenza)	>20	m	0
		3-B) Separazione (apertura)	0 - 0.1	mm	5
		3-C) Rugosità	3 - 5		1
		3-D) Riempimento	si		2
		3-E) Alterazione	debole		3
4	Condizione idraulica	Afflusso in 10 metri di galleria			
		Rapporto Press. Acqua/Stress principale			
		Condizioni generali			15
RMRbasic (1+2+3+4)				RMRbasic	36.6
RMR (1+2+3+4)				RMR	36.6
RCR (Singh & Goel 1996) Rock condition rating (2+3+4)				RCM	32.6
GSI (Hoek, Kaiser e Bawden, 1995) Geological Strength Index				GSI	31.6

Tab. 2 – Valutazione dell'ammasso roccioso secondo Barton *et al.* (1974) relativamente alla stazione di misura n. 3Tab. 2 – *Rock mass assessment according to Barton et al. (1974) at measurement station no. 3*

Stazione 3 - litofacies a					
Indice	Parametro	Valore d'ingresso	Valore	Variabile	Punteggio
1	Rock Quality Designation RQD		30	RQD	30
2	Numero di famiglie di Giunti		3 + vari	Jn	10
3	Rugosità dei giunti	3-A) Giunti con superfici in contatto		Jr	0.75
		3-B) Sup. in contatto con disloc. Inf. A 10cm			
		3-C) Assenza di contatto a seguito di disloc.			
4	Alterazione dei giunti	3-A) Giunti con superfici in contatto		Ja	1.5
		3-B) Sup. in contatto con disloc. Inf. A 10cm			
		3-C) Assenza di contatto a seguito di disloc.			
5	Condizione idraulica dei giunti	Pressione idraulica dei giunti		Jw	1
6	Condizioni di Stress (SRF)	6-A) Zone di debolezza attraverso scavo		SRF	2.5
		6-B) Rocce competenti, problemi di stress			
		6-C) Rocce spingenti			
		6-D) Rocce Rigonfiabili	σ_c/σ_1		
		6-E) Rapporto di stress σ_c/σ_1	58		
Q (1 / 2) + (3 / 4) + (5 / 6)				Q	0.60
σ_c	45	Mpa			
Q (Q1 / Q2) + (Q3 / Q4) + (Q5 / Q6) * $\sigma_c/100$ - per $\sigma_c < 100$ Mpa (Barton, 1993)				Q*	0.68
N (Sing & Goel 1999) Rock condition rating (2+3+4)				N	1.50

Tab. 3 – Valutazione dell'ammasso roccioso secondo Bieniawski (1989) relativamente alla stazione di misura n. 1
 Tab. 3 – *Rock mass assessment according to Bieniawski (1989) at measurement station no. 1*

Stazione 1 - litofacies b					
Indice	Parametro	Valore d'ingresso	Valore		Punteggio
1	Resistenza del litotipo intatto	Point Load Test	0	Is	0
		Compressione uniass.	80	Mpa	8
2	RQD		80	%	16
3	Condizione dei giunti	3-A) Lunghezza (persistenza)	1 - 8	m	3
		3-B) Separazione (apertura)	0.1-1.0	mm	4
		3-C) Rugosità	2 - 4		1
		3-D) Riempimento	no		6
		3-E) Alterazione	no		6
4	Condizione idraulica	Afflusso in 10 metri di galleria			
		Rapporto Press. Acqua/Stress principale			
		Condizioni generali			15
RMRbasic (1+2+3+4)				RMRbasic	59
RMR (1+2+3+4)				RMR	59
RCR (Singh & Goel 1996) Rock condition rating (2+3+4)				RCM	51
GSI (Hoek, Kaiser e Bawden, 1995) Geological Strength Index				GSI	54

Tab. 4 – Valutazione dell'ammasso roccioso secondo Barton *et al.* (1974) relativamente alla stazione di misura n. 1
 Tab. 4 – *Rock mass assessment according to Barton et al. (1974) at measurement station no. 1*

Stazione 1 - litofacies b					
Indice	Parametro	Valore d'ingresso	Valore	Variabile	Punteggio
1	Rock Quality Designation RQD		80	RQD	80
2	Numero di famiglie di Giunti		3 + vari	Jn	10
3	Rugosità dei giunti	3-A) Giunti con superfici in contatto	f	Jr	1.5
		3-B) Sup. in contatto con disloc. Inf. A 10cm			
		3-C) Assenza di contatto a seguito di disloc.			
4	Alterazione dei giunti	3-A) Giunti con superfici in contatto	b - c	Ja	0.9
		3-B) Sup. in contatto con disloc. Inf. A 10cm			
		3-C) Assenza di contatto a seguito di disloc.			
5	Condizione idraulica dei giunti	Pressione idraulica dei giunti	a	Jw	1
6	Condizioni di Stress (SRF)	6-A) Zone di debolezza attraverso scavo	σc/σ1	SRF	2.5
		6-B) Rocce competenti, problemi di stress			
		6-C) Rocce spingenti			
		6-D) Rocce Rigonfiabili			
		6-E) Rapporto di stress σ_c/σ_1			
Q (1 / 2) + (3 / 4) + (5 / 6)				Q	5.33
σc	45	Mpa			
Q (Q1 / Q2) + (Q3 / Q4) + (Q5 / Q6) * σc/100 - per σc < 100 Mpa (Barton, 1993)				Q*	2.40
N (Sing & Goel 1999) Rock condition rating (2+3+4)				N	13.33

un'acclività media moderata:

b) *ammasso roccioso di buona o discreta qualità*, costituito da arenarie massicce e relativamente poco degradabili - tali porzioni di parete assumono una notevole acclività media con tratti verticali e aggettanti. un'acclività media moderata:

Simulazione caduta massi

Per l'ubicazione e il corretto dimensionamento delle barriere paramassi sono state verificate le caratteristiche dinamiche della caduta massi, eseguendo sette simulazioni numeriche di caduta (Fig. 3).

L'analisi caduta massi è stata eseguita con un programma che consente di analizzare in modo probabilistico le traiettorie e le energie prodotte dai massi durante la caduta a valle, tenendo presente l'elevata complessità che si riscontra nella realtà. E' infatti difficile, se non impossibile, prevedere il percorso di un blocco di roccia di cui non sono noti a priori dimensione e forma e che rotola lungo un pendio non riproducibile in maniera dettagliata e continuamente in evoluzione. Quello che si può valutare è "il comportamento medio determinato attraverso la simulazione di un grande numero di scendimenti, ciascun

dei quali possa fornire l'informazione relativa ad un percorso medio e più probabile tra tutti quelli fisicamente ammissibili, rinunciando così ad effettuare previsioni di tipo deterministico" (Merlini et al., 2004).

Il programma utilizzato adotta un metodo di calcolo ibrido dove la massa viene trattata come puntiforme (*lumped mass*) nelle equazioni di moto e come dotata di dimensione nel calcolo delle energie e dei coefficienti di restituzione lungo il pendio. I parametri di calcolo vengono trattati in modo probabilistico facendoli oscillare con il metodo di Montecarlo in un intervallo prestabilito.

Le barriere paramassi sono state inserite nei profili alla quota esatta dove dovevano essere realizzate (Fig. 3: esse sono rappresentate da una linea trasversale di altezza pari a 4,5 m alla quale sono stati attribuiti un comportamento perfettamente plastico ed una capacità di dissipazione di energia pari a 1700 kJ). Tutte le traiettorie di caduta dotate di altezza o energia superiore a quelle ammesse dalle barriere proseguono la loro corsa lungo il pendio.

I parametri di calcolo presi in considerazione sono: la topografia, i coefficienti di restituzione, il volume del blocco roccioso e la quantità di simulazioni eseguite.

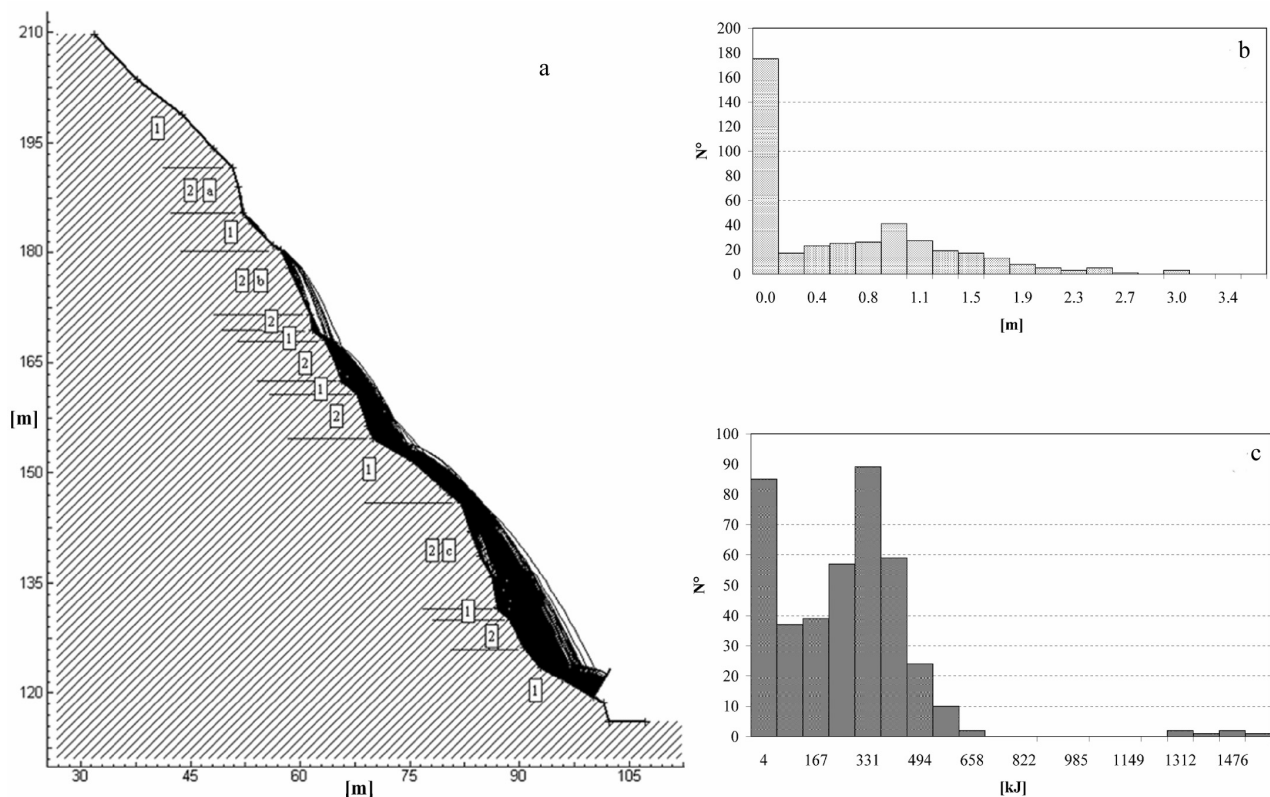


Fig. 5 – Simulazione di caduta massi tramite software Rocfall® sul profilo B3: (a) traiettorie di 500 lanci, con dimensione del masso di 1,5 m³ e barriera dimensionata a 1700 kJ; 1) substrato roccioso subaffiorante; 2) arenaria affiorante; a, b, c – segmenti da cui si distaccano i massi; (b) numero dei massi e altezza di impatto sulla barriera; (c) numero dei massi ed energia cinetica totale degli impatti

Fig. 5 – Simulation of rock falls by means of software Rocfall® on section B3: (a) trajectories of 500 falls, with rock block volume of 1.5 m³ and protective barrier set up at 1700 kJ; 1) bedrock close to surface; 2) cropping out sandstone; a, b, c – rock-block detaching zones; (b) number of blocks and barrier impact height; (c) number of blocks and total kinetic energy of impacts

Per quanto concerne il parametro topografia sono state adottate delle sezioni tracciate in settori rappresentativi delle situazioni geomorfologiche riscontrate sul versante in oggetto, in corrispondenza delle principali aree di distacco individuate da appositi rilievi ed in corrispondenza delle barriere (Fig. 3). La base topografica adottata deriva dalla carta tecnica regionale opportunamente integrata da rilievi sul terreno.

Sono stati valutati i coefficienti di restituzione (coefficiente di restituzione normale, tangenziale e angolo d'attrito) riconoscendo due principali tipi di terreni: arenarie affioranti e substrato sub-affiorante boscato.

In base ai risultati delle ispezioni e tenuto conto delle testimonianze dirette di crolli avvenuti, in tutte le simulazioni è stato adottato un Volume Roccioso Unitario (Paronuzzi, 1989) di $1,5 \text{ m}^3$ equivalente ad una massa di 3750 kg. La massa è stata fatta oscillare in un intervallo di ± 375 kg. Il valore adottato è comunque cautelativo e comprende una casistica molto estesa.

Perché le simulazioni siano statisticamente rilevanti, in

ciascun profilo sono stati contemplati 500 lanci i cui punti di distacco sono stati distribuiti in fasce ubicate nei settori di maggiore pendenza del profilo.

Rammentando che le analisi effettuate sono di tipo probabilistico e che quindi, per definizione, coprono un campione molto significativo degli eventi ma non la totalità, sono stati ottenuti i seguenti risultati.

1. Le barriere intercettano e arrestano sempre le traiettorie di caduta (Fig. 5).

2. Le altezze di impatto sulle barriere sono prevalentemente modeste; solo nel settore delle barriere A, B e C dove il pendio è maggiormente acclive le traiettorie interessano le barriere per buona parte della loro altezza; nelle altre sezioni di caduta, dove il pendio è molto più regolare, le traiettorie tendono ad essere radenti al suolo e solo sporadicamente si elevano in modo apprezzabile.

3. Le energie di caduta sono sempre inferiori alla soglia di 1700 kJ imposta alla barriera paramassi perciò nessuna barriera risulta collassata a seguito di urti (Fig. 5).

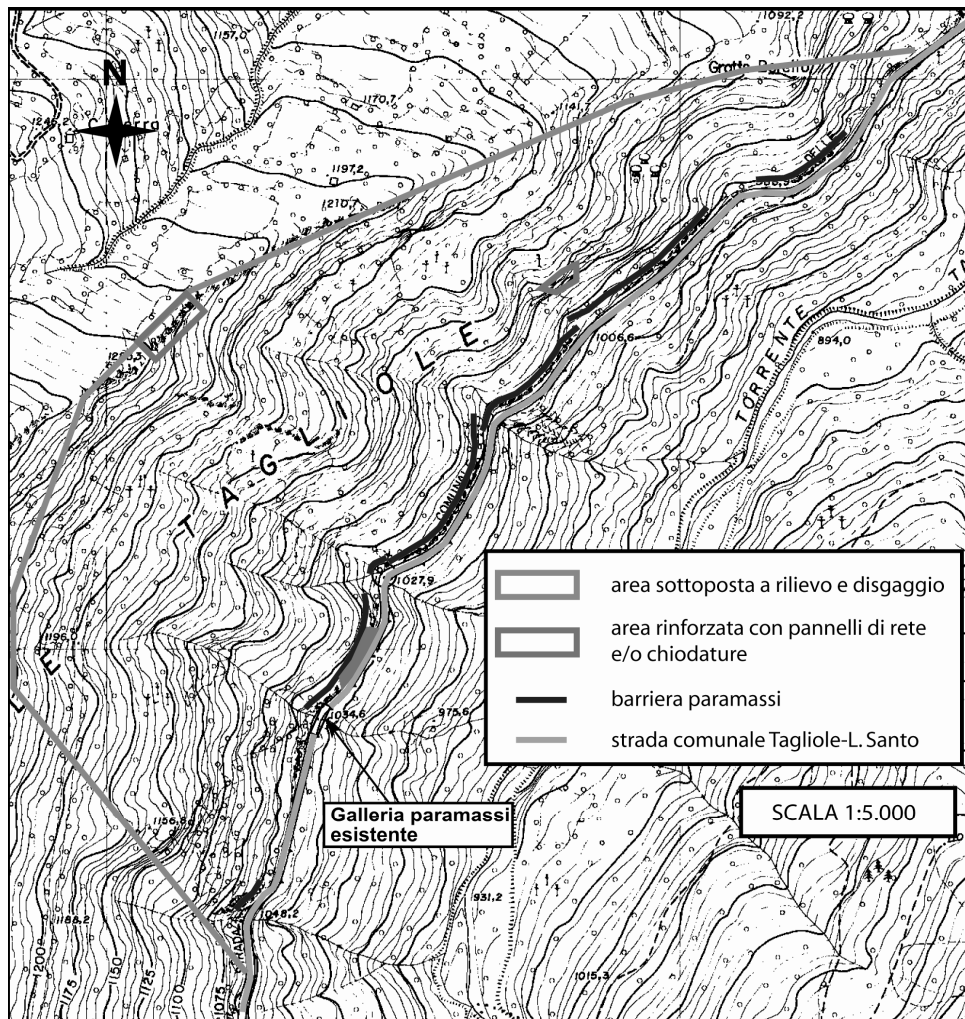


Fig. 6 – Carta degli interventi
Fig. 6 – Map of interventions

Le maggiori energie si sviluppano a valle dei salti di roccia subverticali dove i massi in caduta compiono traiettorie con lunghi salti. Per tale motivo le energie di caduta sono generalmente maggiori in corrispondenza delle barriere A, B e C.

Pertanto, da quanto sopra esposto, risulta che le barriere paramassi, così come dimensionate ed ubicate, determinano un netto miglioramento delle condizioni di sicurezza.

Intervento: bonifica della parete rocciosa e messa in sicurezza della strada comunale Tagliole-Lago Santo

La prima fase degli interventi è consistita nella accurata ispezione della parete rocciosa con lo scopo di determinare le aree potenzialmente a maggiore rischio di distacchi di masse rocciose che, una volta individuate, sono state oggetto di operazioni di pulizia e disaggio per un totale di 32.570 m² (Figg. 6 e 7).

Tenuto conto delle caratteristiche generali del versante, le indicazioni derivanti dallo studio geomeccanico e dall'analisi caduta massi hanno facilitato la strategia di intervento in termini di tipologia, dimensionamento e ubicazione di opere funzionali alla messa in sicurezza della strada comunale Tagliole-Lago Santo. L'intervento si è basato principalmente sulla realizzazione di strutture cosiddette passive quali barriere paramassi a dissipazione di

energia a struttura deformabile schematicamente rappresentata in Fig. 8. Nel caso specifico sono stati posati 824 m di barriere paramassi ad elementi di 8 m ciascuno per un'altezza di 4,5 m (misura adottata nelle simulazioni, vedi sopra) collocate al tetto delle grosse bancate di arenaria. Le barriere utilizzate sono in grado di assorbire urti pari a 2000 kJ (Figg. 6 e 9) a fronte dei 1700 kJ contemplati per le simulazioni per garantire ulteriori margini di sicurezza.

La deformazione avviene per stadi successivi di vari elementi, in grado di subire deformazioni reversibili in campo elastico fino ad un massimo di 1200 kJ senza subire danni. All'inizio dell'impatto del masso è il pannello di rete che dissipa l'energia d'urto per scorrimento di 5 m verso valle impegnando i dissipatori multipli mediante i quali viene assorbita una quota di energia pari a circa il 45% di quella totale assorbibile e cioè 800÷850 kJ. Ulteriore assorbimento è garantito dall'attrito sul terreno per trascinarsi (5%) e dal dissipatore di controvento di monte (10%) per un totale di 350÷400 kJ. Superata la soglia dei 1200 kJ le deformazioni sono irreversibili ma in grado di assorbire ancora 800 kJ (restante 40%) prima di giungere a rotture gravi.

Le barriere paramassi ad elevato assorbimento energetico presentano parecchi vantaggi rispetto alla tradizionali barriere paramassi rigide; qui di seguito ne elenchiamo i principali:



Fig. 7 – Roccatori impegnanti nelle operazioni di pulizia e disaggio di massi pericolanti
 Fig. 7 – High scalers suspended on rope and belt while removing loose rock

1. maggiore capacità di assorbimento energetico, essendo pertanto più resistenti;
2. capacità di deformarsi a stadi nei singoli elementi che le compongono;
3. possibilità di realizzare fondazioni profonde evitando la presenza di plinti e strutture di fondazione in calcestruzzo;
4. capacità di adattamento alla morfologia del terreno;
5. assenza di rilevanti lavori di scavo, sbancamento e movimento terra;
6. ridotto impatto ambientale;
7. condizioni di impiego anche in luoghi disagiati per la

facilità di trasporto;

8. modularità delle singole tratte di barriera che consente di realizzare linee paramassi di dimensioni notevoli senza limiti teorici al numero delle campate;
9. semplicità e modularità degli elementi che permettono di eseguire manutenzioni e riparazioni.

Per alcune aree della parete rocciosa è stato adottato un intervento di tipo attivo, consistente nella posa di pannelli di rete in acciaio ad elevata resistenza fissati tramite chiodature (Fig. 6 e 10).

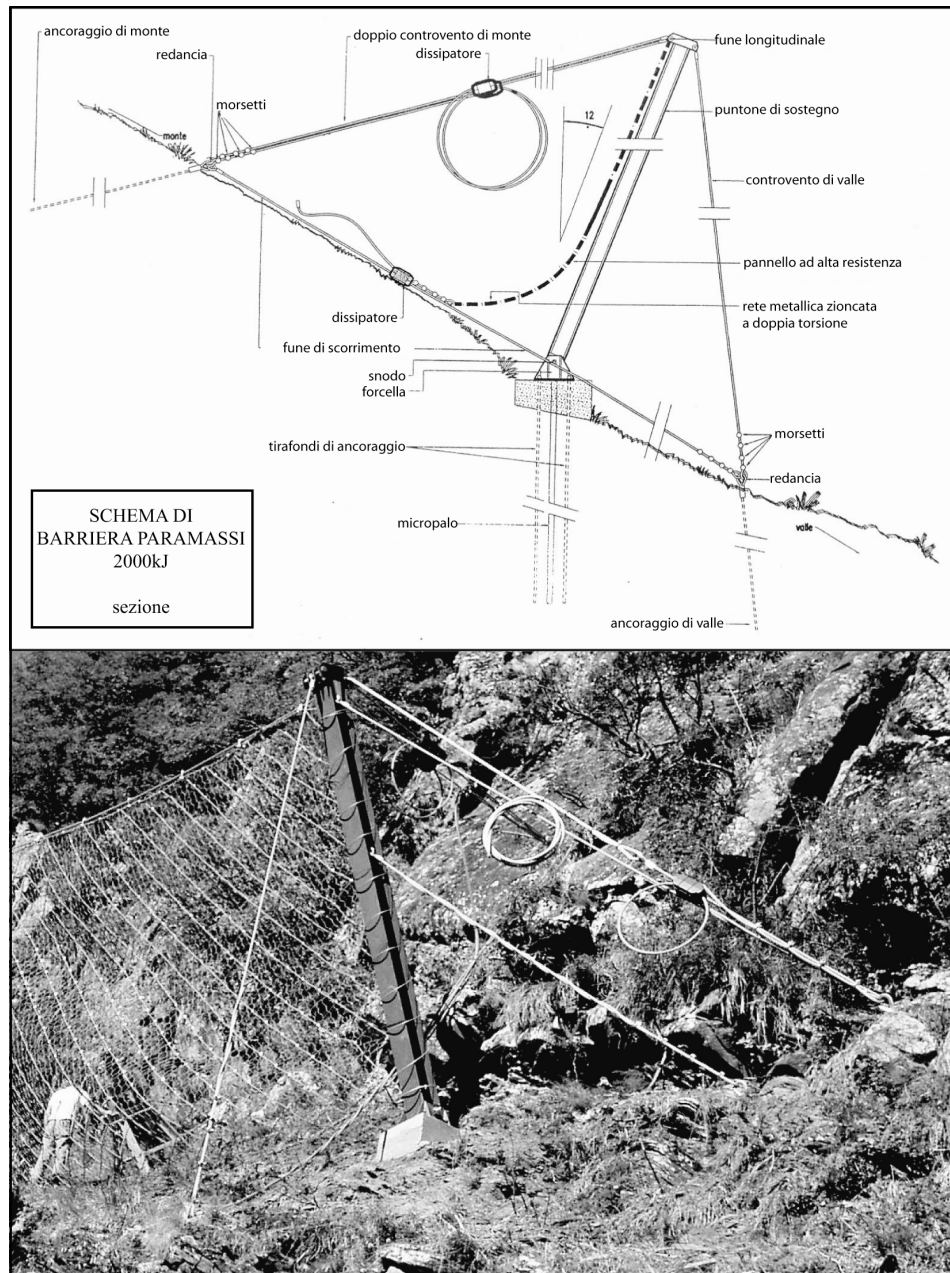


Fig. 8 – Schema e foto di barriera paramassi ad alto assorbimento energetico utilizzata nell'intervento di messa in sicurezza della strada comunale Tagliole-Lago Santo

Fig. 8 – Sketch and photo of high energy absorption rock fall barrier set up for the protection of the Tagliole-Lago Santo road



Fig. 9 – Panoramica di una linea di barriera paramassi ad elementi impostata lungo un gradino morfologico della parete rocciosa
Fig. 9 – Panoramic view of a rock fall barrier line set up on a morphological step of the rock slope



Fig. 10 – Pannelli di rete ad elevata resistenza in una porzione del versante posta lungo la linea di crinale (si veda l'ubicazione in Fig. 7). Vistose fratture sub-verticali caratterizzano tale porzione. Il riquadro costituisce una visione ravvicinata della parete rocciosa bonificata e consolidata. I cerchi indicano lo stesso punto per un confronto fra le due diverse inquadrature

Fig. 10 – High-resistance net panels set up along the crest line of the ridge (see location in Fig. 7). Large sub-vertical cracks characterise this area. Box shows close-up picture of the upgraded and consolidated rock face. Circles show the same point for comparison purpose

La posa di pannelli di rete si è resa necessaria in alcuni punti a valle delle barriere ed in corrispondenza di un settore lungo la linea di crinale del Groppo delle Tagliole, caratterizzato da estese fratture sub-verticali separanti enormi blocchi colonnari aggettanti che, se mobilizzati, arriverebbero in corrispondenza delle barriere con un'energia cinetica ampiamente oltre la soglia di resistenza delle barriere utilizzate.

Monitoraggio

È stato approntato un sistema per il controllo delle discontinuità di una porzione di parete rocciosa sub-verticale ed a tratti aggettante ritenuta particolarmente a rischio, anche per la posizione prossima alla strada comunale Tagliole-Lago Santo (Fig. 11), pur essendo quest'ultima protetta da una barriera paramassi.

Il sistema di monitoraggio consiste di una centralina di acquisizione dati (*datalogger*) alimentata da un pannello solare e da una batteria in assenza di luce (Fig. 12); ad essa fanno capo, tramite cavi elettrici, una sonda di temperatura e dieci fessurimetri elettromeccanici in barra di titanio protetti da apposito tettuccio (Fig. 11).

È piuttosto significativo il confronto fra i dati rilevati da due diversi fessurimetri illustrati in Fig. 12: nel grafico relativo al fessurimetro n. 8 la curva della temperatura in °C e quella dell'apertura della frattura in mm hanno un andamento quasi speculare: ad un generale aumento dei

valori della temperatura si registra un progressivo avvicinamento dei due lembi della frattura per un valore di poco meno di 1 cm nell'arco di tre mesi (da aprile a giugno). Questo sta ad indicare che, con ogni probabilità, il restringimento della frattura è dovuto all'escursione termica: ad un aumento della temperatura corrisponde una naturale dilatazione della roccia. Nello stesso intervallo di tempo il grafico relativo al fessurimetro n. 5 mostra un comportamento diverso in cui ad un aumento della temperatura corrisponde un allontanamento dei lembi della frattura; questo sta a significare che la frattura evolve e pertanto il fessurimetro n. 5 va tenuto sotto stretta osservazione.

Conclusioni

In ragione della morfologia del versante e delle sue caratteristiche lito-stratigrafiche, il pericolo di caduta massi risulta grave e diffuso su tutto il versante oggetto di intervento. Da quanto osservato i cinematismi dei dissesti sono riconducibili principalmente a fenomeni di ribaltamento per erosione e scalzamento al piede e fenomeni di crollo lungo le brevi pareti sub-verticali. La pericolosità del versante è amplificata dall'intensità dei processi di degrado che, a causa dell'aggressione degli agenti meteorici, si sviluppano rapidamente e determinano la continua formazione di volumi rocciosi instabili.

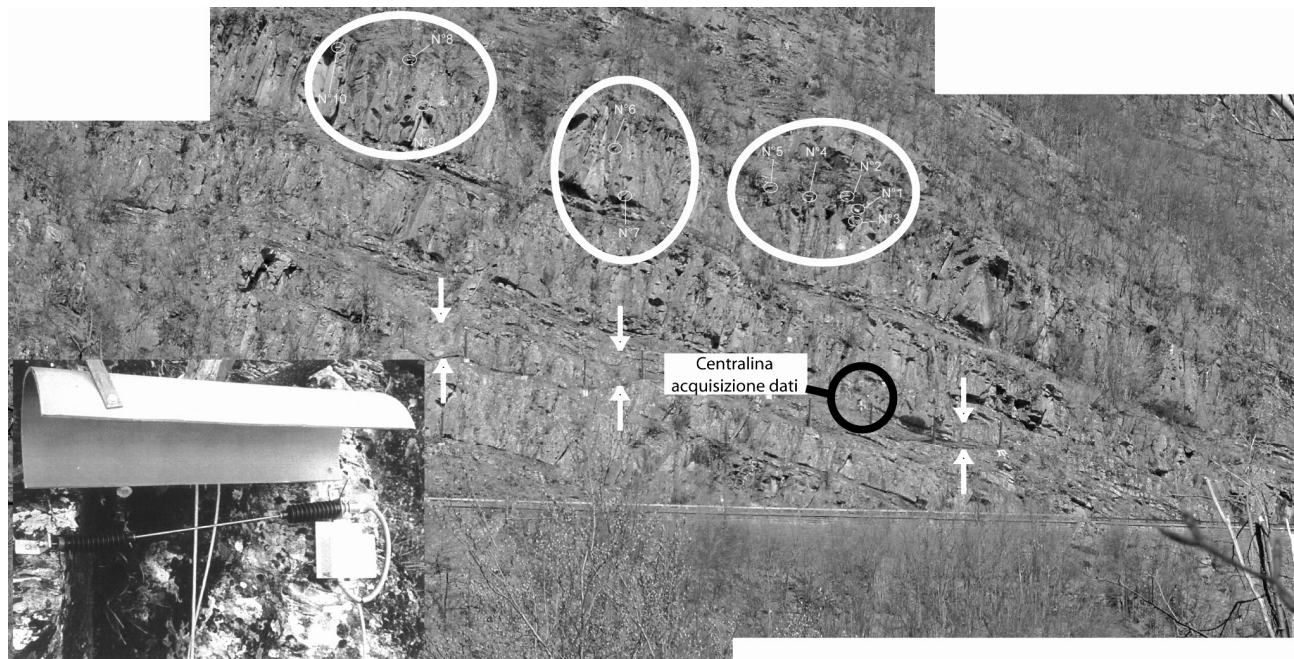


Fig. 11 – Porzione di parete monitorata da fessurimetri elettromeccanici. Nel riquadro si può apprezzare il tipo di fessurimetro adottato. Sono evidenziati tre gruppi di fessurimetri per un totale di 10 unità; le frecce indicano l'andamento della barriera paramassi (modificata da Rambaldi, 2004)

Fig. 11 – Portion of rock face equipped with electro-mechanical rock crack monitoring devices. Three groups of rock crack monitoring devices are shown for a total of 10 units; arrows show the arrangement of the rock fall protective barrier (modified after Rambaldi, 2004)

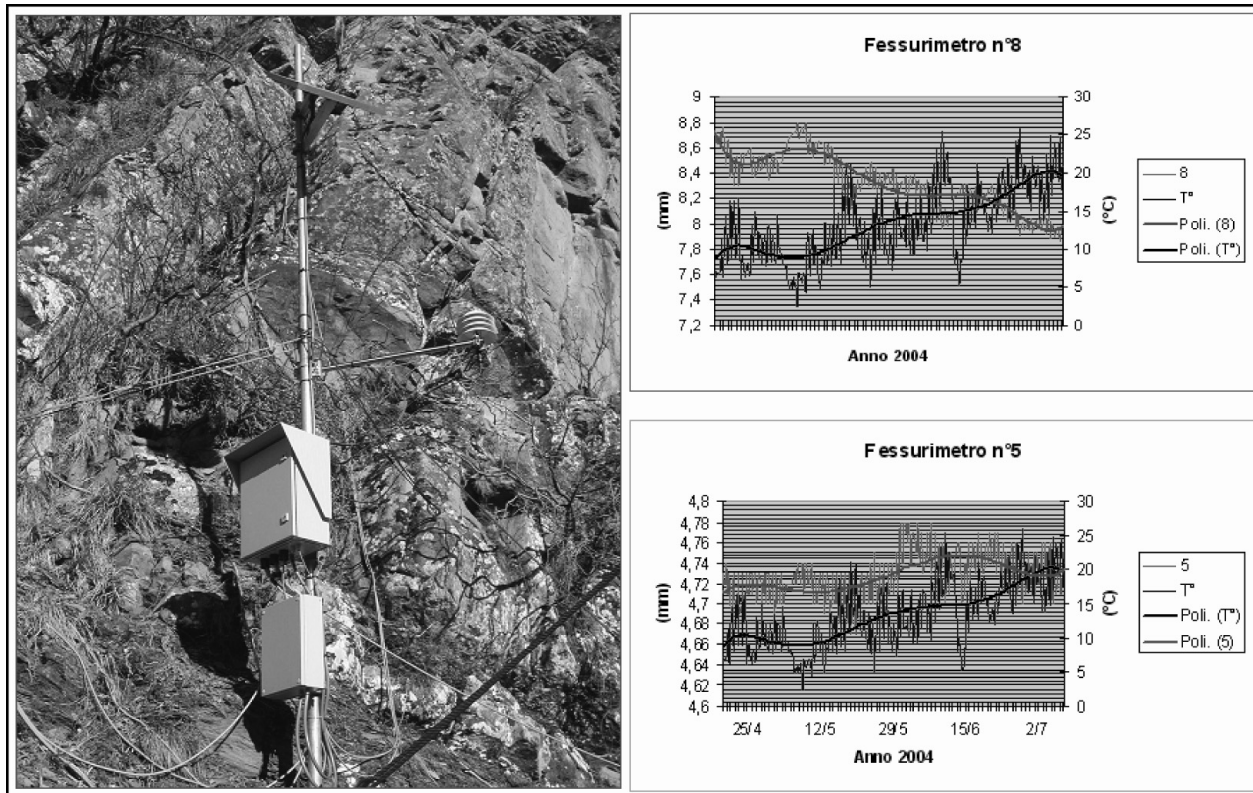


Fig. 12 – Stazione di monitoraggio a cui fanno capo 10 fessurimetri ed una sonda di temperatura. I grafici che mostrano l'andamento della temperatura e dell'ampiezza delle fratture in mm relativamente ai fessurimetri nn. 8 e 5 (modificata da Rambaldi, 2004)

Fig. 12 – Monitoring station equipped with 10 rock crack monitoring devices and one temperature probe. Graphs show trend of temperature and opening of cracks in mm as measured by rock crack monitoring devices nos. 8 and 5 (modified after Rambaldi, 2004)

Dal presente lavoro emerge:

1. l'importanza di uno studio geomeccanico propedeutico degli ammassi rocciosi per l'inquadramento del fenomeno e l'applicazione di modelli di simulazione caduta massi che, con tutti i limiti e le approssimazioni del caso, danno comunque indicazioni significative sulla scelta delle opere di messa in sicurezza (tipologia, dimensionamento ed ubicazione);
2. l'alta versatilità delle barriere paramassi ad elevato assorbimento energetico, il cui impiego, unitamente alla posa di pannelli di rete ad elevata resistenza per le aree particolarmente a rischio, rendono l'intervento piuttosto efficace, prova ne è il fatto che non si sono più registrate invasioni della carreggiata stradale, con le barriere che hanno trattenuto in diverse occasioni il detrito senza subire danni;
3. l'importanza del monitoraggio, che consente di tenere

sotto controllo le aree più a rischio; è comunque evidente che dinanzi a vaste aree dissestate, come nel nostro caso, è altrettanto utile un monitoraggio periodico/stagionale di tipo speditivo.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Prof. Giuseppe Bettelli ed il Dott. Luca Rambaldi per il prezioso contributo dato nell'analisi strutturale dell'ammasso roccioso. Gli autori desiderano, inoltre, ricordare con affetto e stima l'Ing. Pasquale Federico, responsabile del Servizio Tecnico Bacini Panaro e destra Secchia nel decennio 1996-2006, scomparso nel marzo 2006. Egli ha sempre affrontato con impegno e perizia le problematiche del dissesto idrogeologico; a lui il merito di avere sostenuto ed incoraggiato gli interventi qui descritti.

Bibliografia

Abbate E., Bortolotti V., 1961. Tentativo di interpretazione dei livelli di Argille Scagliose intercalate nella parte alta del Macigno lungo l'allineamento M. Prado-Chianti (Appennino settentrionale) mediante colate sottomarine. *Boll. Soc. Geol. It.*, 80, 335-342.

Abbate E., Bortolotti V., Passerini P., 1970. Olistostromes and olistoliths. *Sedimentary Geology*, 4, 521-557.

Abbate E., Bortolotti V., Sagri M., 1981. An approach to olistostrome interpretation. In "Excursion guidebook, 2nd European Regional

Meeting IAS, Bologna, 1981" (F. Ricci Lucchi ed.), 165-185, Tecnoprint, Bologna.

Barton N., Lien R., Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236.

Bettelli G., Bonazzi U., Fazzini P., Gelmini R.,

1989. Macigno, Arenarie di Monte Modino e Arenarie di Monte Cervarola del crinale appenninico emiliano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 39, 1-17.
- Bieniawski Z., 1989. *Engineering rock mass classification*. Wiley, New York.
- Chicchi S., Plesi G., 1990. Il complesso M. Modino-M. Cervarola nell'Alto Appennino emiliano (fra il Passo di Lagastrello e il M. Cimone) e i suoi rapporti con la Falda Toscana, l'Unità di Canetolo e le Liguridi. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 46.
- Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. *Landslide Types and Processes*. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.) "Landslides Investigation and Mitigation", Special Report 247, Transportation Research Board, National Academy Press, 3, 36-75, Washington, D.C.
- De Libero C.M., 1998. Sedimentary vs. tectonic deformation in the "Argille Scagliose" of Mt. Modino (northern Apennines). *Giornale di Geologia*, 56, 143-166.
- Lucente C.C., Pini, G.A., De Libero C., 2006. The role of large-scale sedimentary failures at the wedge front-foredeep boundary: a case study from the northern Apennines, Italy. *GeoActa*, 5, 113-128.
- Martini P., Plesi G., 1988. Scaglie tettoniche divelte dal Complesso di M. Modino e trascinate alla base delle Unità subliguri e ligure: gli esempi del M. Ventasso e del M. Cisa (Appennino reggiano). *Boll. Soc. Geol. It.*, 107, 171-191.
- Merlini F., Bianchi G., Guiducci A., Guerra C., 2004. Problematiche geotecniche delle rupi calcaree nella Valmarecchia. Recenti sviluppi ed esperienze nella caratterizzazione e parametrizzazione degli ammassi rocciosi, nell'analisi dei fenomeni di caduta massi e nell'esplorazione delle strutture profonde. *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 18 (nuova serie), 39-54.
- Nardi R., Tongiorgi M., 1962. Contributo alla Geologia dell'Appennino toscano-emiliano. I. Stratigrafia e tettonica dei dintorni di Pievepelago (Appennino modenese). *Boll. Soc. Geol. It.*, 81, 1-76.
- Panizza M., 1995. *Geomorfologia*. Pitagora Ed., Bologna.
- Paronuzzi P., 1989. Probabilistic approach for design optimization of rock fall protective barriers. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 22, 175-183.
- Perilli N., 1994. The Mt. Modino olistostrome Auctorum (Apennino modenese): stratigraphical and sedimentological analysis. *Mem. Soc. Geol. It.*, 48, 343-350.
- Pini G.A., Lucente C.C., Cowan D.S., De Libero C.M., Dellisanti F., Landuzzi A., Negri A., Tateo F., Del Castello M., Morrone M., Cantelli L., 2004. The role of olistostrome and argille scagliose in the structural evolution of the Northern Apennines. In *Field Trip Guidebooks*, 32nd IGC, Florence 20-28 August 2004 (L. Guerrieri, I. Rischia & L. Serva eds.), *Mem. Descrittive Carta Geol. d'It.*, 63, B13, 1-40.
- Plesi G., 1975. La giacitura del complesso Bratica-Pietrignacola nella Serie del Rio di Roccaferara (Val Parma) e dei flysch arenacei tipo Cervarola dell'Appennino settentrionale. *Boll. Soc. Geol. It.*, 94, 157-176.
- Plesi G., Chicchi S., Daniele G., Palandri S., 2000. La struttura dell'Alto Appennino reggiano-parmense fra Valditacca, il Passo di Pradarena e il M. Ventasso. *Boll. Soc. Geol. It.*, 119, 267-296.
- Priest, S.D., Hudson J.A., 1976. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scan line surveys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech.*, 18, 183-197.
- Rambaldi L., 2004. Analisi dei fenomeni di crollo dalle pareti rocciose "Groppe delle Tagliole" (Pievepelago, Appennino modenese). Tesi di Laurea inedita, Università di Modena e Reggio Emilia, 231 pp.
- Reutter K.J., 1969. La geologia dell'alto Appennino modenese tra Civago e Fanano e considerazioni geotettoniche sulla Unità di M. Modino-M. Cervarola. *Ateneo Parmense Acta Naturalia*, 5, 3-86.
- Sagri M., 1975. Ambienti di deposizione e meccanismi di sedimentazione nella successione Macigno-Olistostroma Arenarie del Monte Modino (Appennino modenese). *Boll. Soc. Geol. It.*, 94, 771-788.