

**PROGETTISTA**

GEODES S.r.l. - Ing. Domenico Parisi  
 Geol. Riccardo Amici

**COMMITTENTE**

Impresa Lauro S.p.A.

**OGGETTO INCARICO**

Progetto esecutivo per la sistemazione della parete dell'imbocco sud della galleria di Piedicastello (TN)

**IMPORTO DELL'OPERA**

€ 366.849,85 di cui:  
 € 366.849,85 cat. IXC fondazioni speciali

**DESCRIZIONE DELL'OPERA**

Interventi di stabilizzazione e messa in sicurezza della parete dell'imbocco sud della galleria Piedicastello, nel comune di Trento (TN).

**PERIODO DI ESECUZIONE**

2003-2004

**PROFESSIONISTI RESPONSABILI**

Ing. Domenico Parisi - Geotecnica e Progettazione  
 Geol. Riccardo Amici - Geologia

**REALIZZAZIONE OPERE**

Opera realizzata.

**DESCRIZIONE PARTICOLAREGGIATA**

**Premessa**

Nell'ambito dei lavori di recupero urbanistico-ambientale dell'area di Piedicastello mediante lo spostamento della circonvallazione e gli interventi connessi, è stata realizzata la galleria di Piedicastello il cui imbocco è ubicato alla base del costone roccioso di Sardagna, che in tale tratto presenta pareti subverticali di altezza pari a circa 90 m, con presenza di volumi rocciosi in condizioni di precario equilibrio.

Su incarico dell'Impresa Lauro S.p.A., affidataria dei lavori, la Geodes ha eseguito dapprima lo studio per la valutazione delle condizioni di stabilità dell'area interessata dai lavori di realizzazione dell'imbocco della galleria e, successivamente, il progetto degli interventi di stabilizzazione e messa in sicurezza della parete rocciosa, sia nel breve termine, per la fase di esecuzione dei lavori, che nel lungo termine, durante l'esercizio stradale.

**Studio geologico-geotecnico**

La prima parte delle attività è consistita nell'esecuzione di uno specifico studio geologico-strutturale, finalizzato alla valutazione delle potenziali situazioni di instabilità della parete orientale del versante di Sardagna, che è stato articolato secondo i seguenti punti:

- analisi della documentazione disponibile (progetto esecutivo galleria, bibliografia e cartografia scientifica e ufficiale)
- sopralluoghi in sito a carattere geologico-strutturale e rilievi geologico-strutturali su stendimenti
- rilievo aerofotogrammetrico della parete
- analisi con documentazione fotografica dei volumi rocciosi potenzialmente instabili e mobilizzati, con suddivisione della parete rocciosa in settori con comportamento uniforme nei confronti delle problematiche di stabilità
- identificazione e calcolo dei volumi degli elementi rocciosi potenzialmente instabili e mobilizzati.

I litotipi affioranti lungo le pendici della parete appartengono, in ordine cronologico dalla più recente alla più antica, alle seguenti formazioni:

- Calcarea di Nago (Eocene superiore),
- Calcarea di Malcesine (Eocene medio).

La Formazione del Calcarea di Malcesine, affiorante alla base della parete fino alla quota di circa 250 m s.l.m., è costituita da bancate di calcari marnosi, con potenze di circa 20-40 cm, alternate a livelli marnosi con spessori variabili da qualche centimetro fino al decimetro; in particolare si tratta di calcareniti di colore grigio-nocciola, boudinate, in matrice calcarea-marnosa.

La Formazione del Calcarea di Nago, affiorante nella porzione sommitale della parete rocciosa, è costituita da biocalcareni, biolutiti e marne calcaree ricche in fossili; alla base del-

la formazione è localmente presente un deposito caotico (breccia bioclastica) con spessori variabili da 0.6 a 4.5 m.

Nel dicembre 2003 è stata effettuata, mediante un volo con elicottero, la ripresa fotografica della parete rocciosa; le immagini raccolte hanno permesso una restituzione ortofotografica della parete rocciosa, finalizzata alla determinazione dei seguenti elementi fisici e geometrici:

- modello numerico tridimensionale della superficie della parete rocciosa
- tracce dei piani di discontinuità (stratificazione e giunti/fratture)
- distanze relative sull'orizzontale per la definizione delle porzioni di parete aggettanti
- limiti della zona vegetata o boscata
- cigli di scarpata
- impluvi.

L'integrazione del rilievo aerofotogrammetrico con i dati dei rilievi geologico-strutturali, eseguiti nei mesi di gennaio e febbraio 2004, ha consentito di correlare la geometria, le dimensioni (lunghezza, larghezza e profondità) degli elementi rocciosi potenzialmente instabili e i principali sistemi di

discontinuità presenti nell'ammasso roccioso.

In particolare, in corrispondenza della parete rocciosa dell'imbocco sud, sono stati eseguiti i seguenti rilievi geologico-strutturali:

- due stendimenti alla base della parete rocciosa (Calcarea di Malcesine), denominati STD1 e STD2, di lunghezza rispettivamente di 20 m e 8 m
- due stazioni, nella parte sommitale della parete (Calcarea di Nago), denominate ST1 e ST2
- cinque traverse verticali lungo la parete (calate A, B, C, D ed E) per la corretta valutazione delle caratteristiche dei principali volumi rocciosi potenzialmente instabili, difficilmente valutabili a distanza.

I rilievi geologico-strutturali hanno permesso di individuare i piani medi dei principali sistemi di discontinuità (stratificazione, giunto/frattura e faglia), che condizionano l'assetto geomorfologico della parete rocciosa.

La parete rocciosa è stata quindi suddivisa, in relazione alla propensione al dissesto, nei seguenti tre settori con caratteristiche omogenee (dal basso verso l'alto):

• Settore Ia

Il settore comprende la parte basale della parete rocciosa ed è caratterizzato da una stratificazione immergente verso WNW, disposta da traverpoggio a franapoggio, con angoli di inclinazione mediamente compresi tra 10° e 30° e spaziatura fino ad alcuni decimetri.

L'ammasso roccioso è caratterizzato da un elevato grado di fratturazione, con formazione di blocchi unitari di dimensioni comprese tra qualche dm<sup>3</sup> e circa 20-30 dm<sup>3</sup>.

In corrispondenza dell'area di imbocco si osserva un elemento roccioso instabile, separato a tergo da una superficie di faglia appartenente al sistema K1, molto fratturato, con volume stimato di circa 1800-2000 m<sup>3</sup>.

La possibilità di distacco sia dei blocchi minori che dell'elemento di maggiore volume presente all'imbocco Sud viene giudicata molto elevata.

• Settore Ib

Il settore comprende la parte intermedia della parete rocciosa ed è caratterizzato da una stratificazione immergente verso WNW, con angoli di inclinazione mediamente compresi tra 10° e 30° e spaziatura fino ad alcuni decimetri.

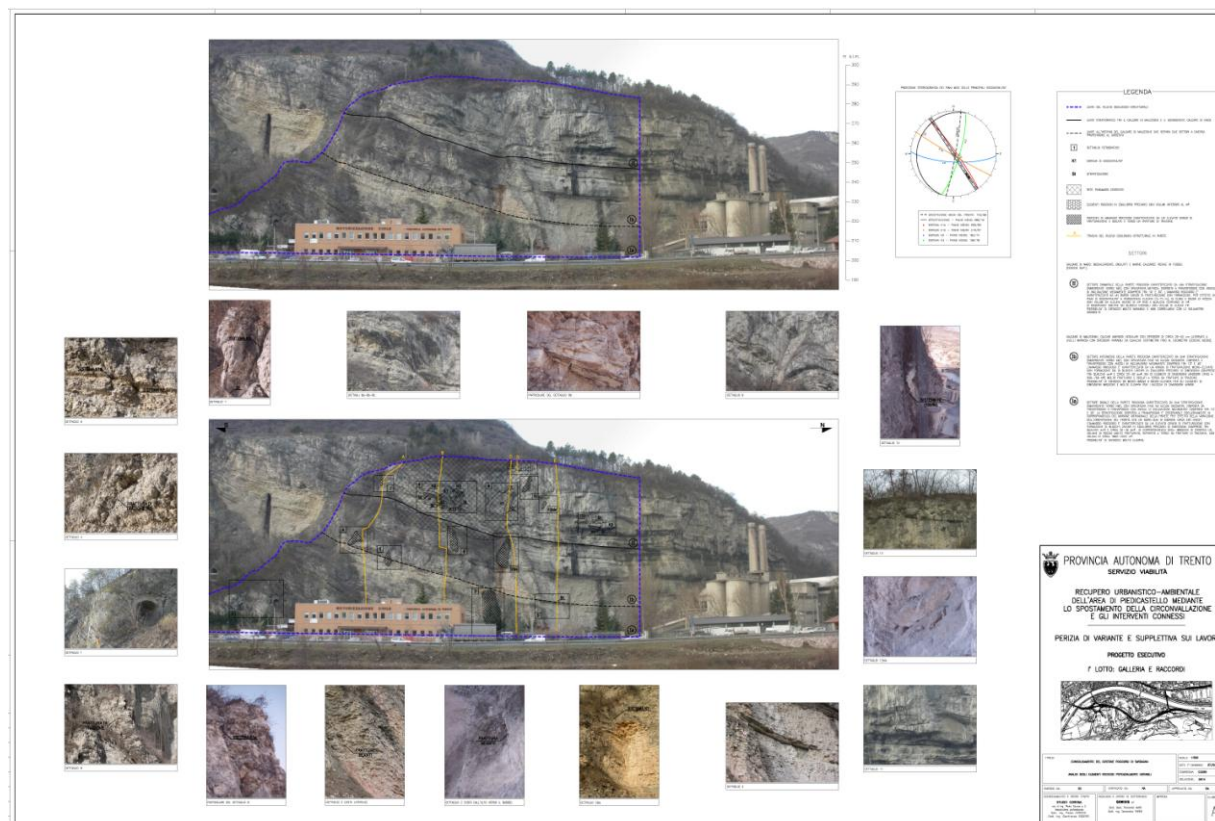
L'ammasso roccioso è caratterizzato da un grado di fratturazione medio-elevato con formazione sia di blocchi unitari di dimensioni comprese tra qualche dm<sup>3</sup> e circa 20-30 dm<sup>3</sup>, sia di elementi di dimensioni maggiori (fino a 500-750 m<sup>3</sup>) molto fratturati e isolati a tergo da fratture di trazione.

In tale settore, in cui si osservano sia degli elementi potenzialmente instabili, sia dei "vuoti" lasciati da fenomeni progressivi, la possibilità di distacco è da bassa a medio-elevata per gli elementi di dimensioni maggiori e molto elevata per i blocchi di dimensioni minori.

• Settore II

Il settore comprende la parte sommitale della parete rocciosa ed è caratterizzato da una stratificazione immergente verso WNW con angoli di inclinazione mediamente compresi tra 10° e 30° e spaziatura metrica.

L'ammasso roccioso è caratterizzato da un basso grado di fratturazione con formazione, per effetto di piani di discontinuità a persistenza elevata (5-15 m), di cunei e diedri di roccia con volumi da alcune decine di m<sup>3</sup> fino a qualche centinaio di m<sup>3</sup>.





Sono inoltre presenti blocchi con volumi di alcuni m<sup>3</sup>.  
 In tale settore, in cui si osservano sia degli elementi potenzialmente instabili, sia dei "vuoti" lasciati da fenomeni pregressi, la possibilità di distacco è molto variabile e difficilmente correlabile con le volumetrie coinvolte.

I rilievi geologico-strutturali effettuati sulla parete rocciosa dell'imbocco sud hanno messo in evidenza la presenza sia di volumi rocciosi potenzialmente instabili, con diversi gradi di pericolosità, sia di "vuoti" testimoniati fenomeni di instabilità avvenuti in periodi passati.

I risultati dello studio dei volumi potenzialmente instabili sono stati illustrati sia con Elaborati contenenti i dettagli fotografici dei diversi elementi che con Elaborati realizzati sulla base del rilievo aerofotogrammetrico, sui quali è stata condotta e riportata la stima dei volumi coinvolti.

In particolare sono stati individuati 14 principali volumi potenzialmente instabili, per ognuno dei quali sono state definite, caratteristiche, dimensioni e grado di pericolosità.

La caratterizzazione geotecnica delle formazioni rocciose presenti sulla parete è stata condotta sulla base dei risultati delle prove di laboratorio, effettuate sui campioni prelevati dai sondaggi geologico-stratigrafici eseguiti per il progetto esecutivo della galleria e della classificazione geomeccanica

ca dell'ammasso roccioso.

Sui campioni di roccia prelevati nel corso dei sondaggi geologico-stratigrafici sono state eseguite una serie di prove di determinazione del peso di volume, di compressione monoassiale e triassiale, di trazione indiretta (Brasiliana) e di punzonamento (Point Load Test), finalizzate alla determinazione delle caratteristiche fisiche e di resistenza della roccia intatta.

Le prove sono state eseguite sia sui litotipi appartenenti alla formazione dei Calcari di Malcesine che a quelli appartenenti alla formazione dei Calcari di Nago. Per la caratterizzazione della roccia intatta sono state eseguite le seguenti prove:

- n. 20 prove di punzonamento in direzione assiale (perpendicolare ai piani di stratificazione della roccia)
- n. 39 prove di punzonamento in direzione diametrale (parallela ai piani di stratificazione della roccia)
- 3 prove di compressione monoassiale
- 9 prove di compressione triassiale
- 3 prove di trazione indiretta.

I parametri di resistenza della roccia intatta sono definiti con riferimento al criterio empirico di Hoek-Brown (1988).

La classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, propedeutica alla sua caratterizzazione geotecnica, è stata effettuata con riferimento all'indice GSI (Geological Strength Index) secondo le indicazioni for-

nite da Marinos e Hoek (2000). Il parametro GSI è stato differenziato per distinguere i diversi settori della parete, corrispondenti alle diverse formazioni geologiche, messe in evidenza dallo studio geologico. Per la formazione dei Calcari di Malcesine i valori di GSI variano tra 30 e 50; per la formazione dei Calcari di Nago i valori di GSI variano tra 50 e 75.

Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso si è fatto riferimento sia ad uno schema di mezzo continuo equivalente, omogeneo ed isotropo, con modello costitutivo elasto-plastico ideale, sia ad uno schema di mezzo discontinuo. La prima schematizzazione è stata adottata per valutare lo stato tensionale nell'ammasso roccioso in prossimità della parete in esame; la seconda schematizzazione è stata adottata per le analisi di stabilità dei principali volumi rocciosi individuati.

Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso si è fatto riferimento al criterio empirico generalizzato di Hoek-Brown (2002), ricorrendo alle formule empiriche di correlazione con gli indici di classificazione dell'ammasso roccioso, in particolare con GSI (Hoek e Brown, 1997), e con i parametri relativi alla roccia intatta.

I valori caratteristici per le due formazioni sono riportati nel seguente prospetto:

	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$ (-)	GSI (-)	D (-)	$m_b$ (-)	s (-)	a (-)
<b>C. Nago</b>	101.7	9.4	62	0.0	2.41	0.015	0.502
				0.7	1.16	0.004	0.502
<b>C. Malcesine</b>	67.3	7.4	42	0.0	0.93	0.002	0.510
				0.7	0.30	0.0002	0.510

Nel prospetto seguente sono riportati i valori caratteristici dei parametri di deformabilità:

Formazione	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI (-)	D (-)	$E_m$ (GPa)	$\nu$ (-)
<b>Calcari di Nago</b>	101.75	50	0.0	20.0	0.35
			0.7	13.0	
<b>Calcari di Malcesine</b>	67.28	30	0.0	5.2	0.35
			0.7	3.4	

Per la caratterizzazione geotecnica delle discontinuità in sito è stato adottato il crite-

rio empirico di Barton-Bandis (1993) o modello JRC. La resistenza a taglio di una discontinuità è quindi costituita fondamentalmente da quattro componenti: l'attrito residuo  $\phi_r$  (o di base  $\phi_b$ ); la rugosità delle superfici, espressa mediante il coefficiente JRC<sub>n</sub>; la rottura delle asperità, controllata dal rapporto JCS<sub>n</sub>/ $\sigma_n$ ; l'ondulazione  $i_u$  di grande scala.

A partire dall'involuppo di resistenza curvilineo di Barton-Bandis è comunque possibile esprimere la resistenza dei giunti mediante il criterio di Mohr-Coulomb, con parametri opportunamente calcolati in funzione dello stato tensionale agente lungo le superfici prese in considerazione.

**Gli interventi**

Per permettere l'inizio dei lavori di attacco della galleria naturale nel minor tempo possibile, la realizzazione degli interventi è stata articolata in due fasi:

- nella prima fase sono realizzati gli interventi necessari prima dell'attacco della galleria naturale, nella sola sezione di calotta
- nella seconda fase sono realizzati la restante parte degli interventi.

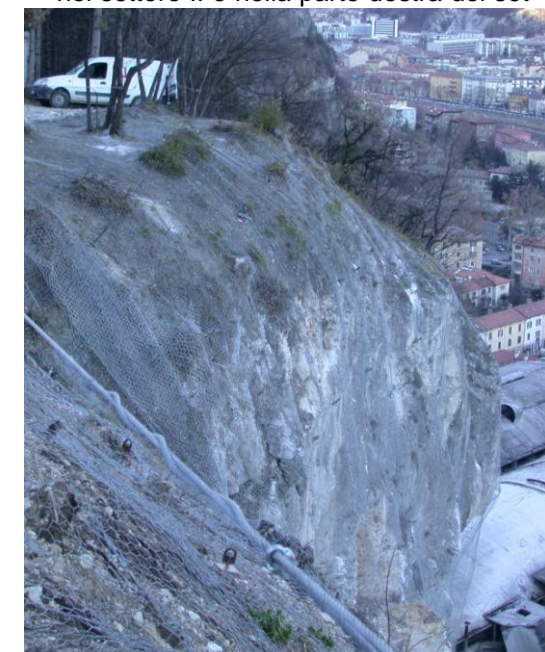
Secondo quanto risultante dallo studio geologico-strutturale, la parete rocciosa dell'imbocco sud della circonvallazione di Piedicastello è stata suddivisa, in relazione alla propensione al dissesto, in due settori con caratteristiche omogenee, per i quali sono stati definiti differenti interventi di consolidamento e/o protezione.

Con riferimento ai volumi rocciosi potenzialmente instabili evidenziati dallo studio geologico, si prevede pertanto l'esecuzione dei seguenti interventi:

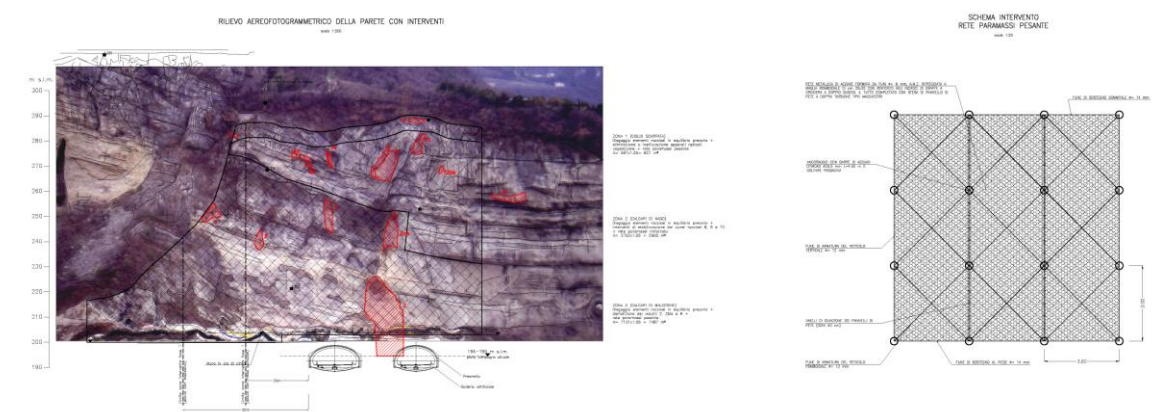
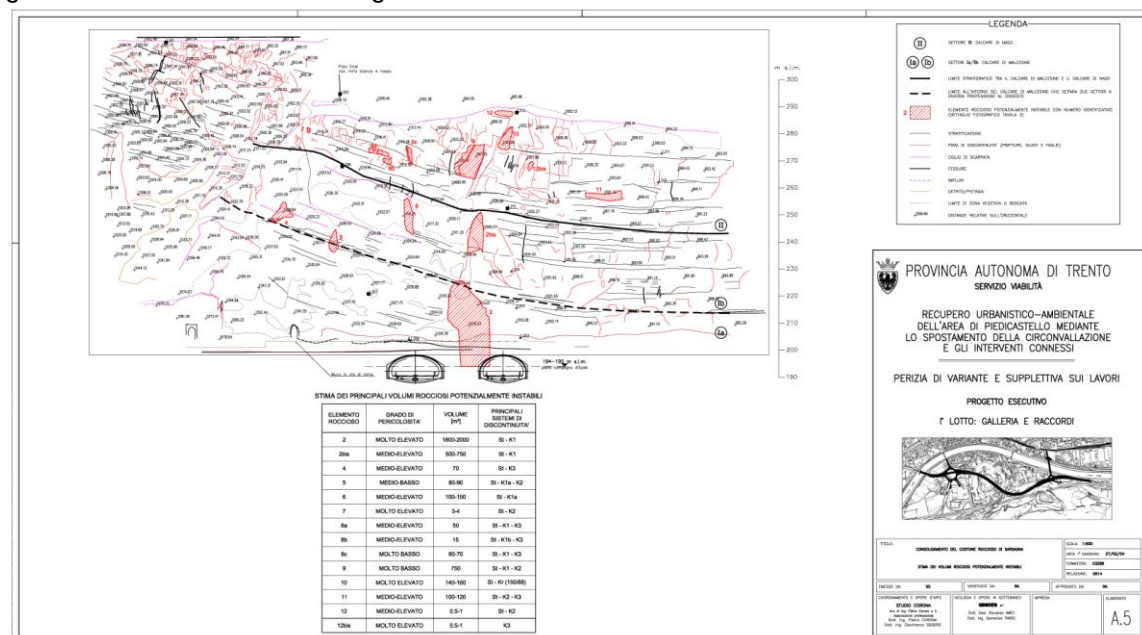
- disgiungimento sull'intera parete dei volumi

rocciosi di medio-piccole dimensioni (indicativamente minori di 0.5 m<sup>3</sup>) in condizioni di precario equilibrio con l'ausilio di leve e, dove necessario, di martinetti ed allargatori e demolizione degli elementi rocciosi potenzialmente instabili di maggiori dimensioni presenti in corrispondenza degli imbocchi delle gallerie (blocchi 2, 2bis e 6) e dei volumi allentati presenti al piede della parete

- nel settore II e nella parte destra del set-

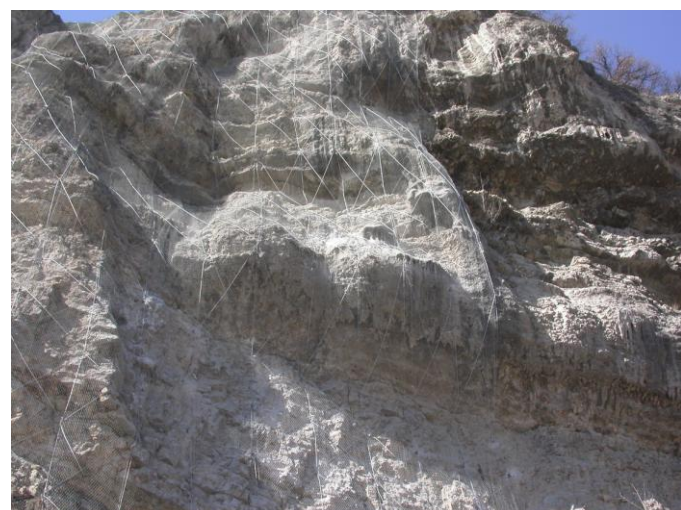


- tore Ib
- posa in opera della rete paramassi pesanti in corrispondenza del ciglio della scarpata, per un'altezza di circa 6 m;
  - posa in opera della rete paramassi rinforzata ed esecuzione degli interventi di stabilizzazione degli elementi rocciosi di maggiori dimensioni pre-





senti nel settore II; per gli elementi 8a, 8b e 10 si prevede l'imbragaggio con pannelli di rete metallica formata da funi di diametro 8 mm intrecciate a maglia romboidale, rinforzate con funi perimetrali e intermedie di diametro 16 mm, ancorate all'esterno degli elementi rocciosi con barre Dywidag di diametro 26.5 mm e lunghezza 6.0 m con testa filettata, munita di golfare passacavi; per gli elementi 8c e 9 si prevede la chiodatura dei blocchi



con barre Dywidag di diametro 26.5 mm, lunghezza variabile tra 6 e 9 m, in modo da assicurare un ancoraggio utile non inferiore a 4 m, e maglia di 3x2 m;

- nel settore Ia e nella parte sinistra del settore Ib
  - posa in opera delle reti paramassi pesanti.

Per la sistemazione finale della zona di imbocco, dopo la realizzazione dei tratti di galleria artificiale, in considerazione della loro ridotta estensione, si prevede la realizzazione di un rilevato di protezione circa parallelo all'asse stradale della lunghezza di circa 50 m, nel primo tratto dopo la galleria, sormontato da una barriera paramassi, avente sviluppo totale di 96 m, con energia di assorbimento  $\geq 2000$  kJ, a ulteriore protezione della zona di imbocco della galleria.

La rete paramassi rinforzata è costituita da rete metallica a doppia torsione tipo Maccaferri con funi verticali  $\phi=12$  mm ad interasse di 3 m, oblique  $\phi=12$  mm ad interasse di 3x4 m e orizzontali (sommitali e al piede)  $\phi=14$  mm. L'ancoraggio sommitale e

al piede della rete sarà effettuato con barre di acciaio tipo Dywidag  $\phi=26.5$  mm e lunghezza di 4.5 m; gli ancoraggi intermedi saranno effettuati con barre di acciaio tipo FeB44k ad aderenza migliorata  $\phi=24$  mm e lunghezza minima 1.5 m. Considerando un incremento del 5% rispetto alla superficie teorica risultante dal rilievo aerofotogrammetrico, per tenere conto delle irregolarità della superficie del versante, si ha un'estensione dell'intervento pari a 2900 m<sup>2</sup>.

La rete paramassi pesante è costituita da rete metallica a doppia torsione tipo Maccaferri e da rete metallica di acciaio formata da funi  $\phi=8$  mm tipo A.M.Z. intrecciata a maglia romboidale di cm 20x20 con rinforzo agli incroci di graffe a crociera a doppio guscio armate con funi verticali  $\phi=12$  mm ad interasse di 3 m, oblique  $\phi=12$  mm ad interasse di 3x3 m e orizzontali (sommitali e al piede)  $\phi=14$  mm. L'ancoraggio della rete sarà effettuato con barre di acciaio tipo Dywidag  $\phi=26.5$  mm e lunghezza di 4.5 m. Considerando un incremento del 5% rispetto alla superficie teorica risultante dal rilievo aerofotogrammetrico, per tenere conto delle irregolarità della superficie del versante, si ha un'estensione totale dell'intervento pari a 8115 m<sup>2</sup>.

Le fasi esecutive di intervento risultano:

- Fase 1a (interventi preliminari a ogni altro intervento sull'imbocco)
  - a) disaggio e taglio ceppaie
  - b) demolizioni con agenti chimici non esplosivi in parete (elementi 2bis e 6)
  - c) posa in opera della rete paramassi pesante sul ciglio della parete
  - d) demolizione con mezzi meccanici dell'elemento 2 e dei volumi allentati presenti al piede del versante
  - e) calo delle reti nella zona della galleria; i limiti della zona di intervento sono definiti in relazione alla metodologia di scavo della galleria (50 m oltre il limite di scavo della galleria per scavo con esplosivo; 25 m per scavo con fresa puntuale)
- Fase 1b (interventi preliminari a ogni operazione di scavo della galleria; possibili interventi di preconsolidamento sul fronte di scavo e sulla parete di attacco

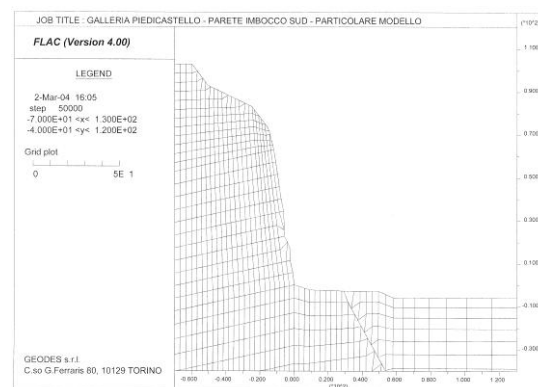
al di sotto delle reti paramassi e la realizzazione dei preanelli)

- f) esecuzione perforazioni e posa in opera dei bulloni di ancoraggio nella zona della galleria
- g) posa in opera delle reti di funi e delle funi di armatura e placcaggio delle reti nella zona della galleria



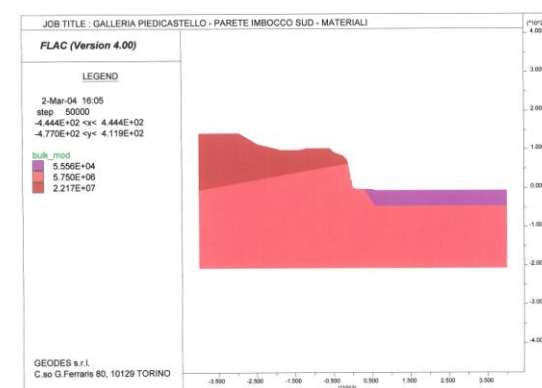
- Fase 2 (interventi da eseguire parallelamente allo scavo della galleria)
  - h) completamento posa in opera delle reti nella zona esterna alla galleria
  - i) esecuzione perforazioni e posa in opera dei bulloni di ancoraggio nella zona esterna alla galleria
  - j) posa in opera delle reti di funi e delle funi di armatura e placcaggio delle reti nella zona esterna alla galleria.

**Analisi e verifiche**



Per il dimensionamento e la verifica degli interventi sono state effettuate sia alcune analisi numeriche con il metodo delle differenze finite in condizioni bidimensionali, per valutare lo stato tensionale presente nell'ammasso roccioso, che analisi di stabilità di cunei rocciosi, svolte con il metodo

dell'equilibrio limite, sui principali blocchi rocciosi evidenziati nel settore II della parete.



Le analisi numeriche con il metodo delle differenze finite, effettuate con il codice di calcolo FLAC, hanno permesso di valutare lo stato tensionale presente nella parete rocciosa. I risultati hanno evidenziato che, nelle zone di ammasso roccioso avente ridotte caratteristiche di resistenza a causa del degrado indotto dagli agenti atmosferici, si determinano locali condizioni di plasticizzazioni all'interno dei Calcari di Malcesine; la lunghezza delle barre di ancoraggio delle reti è stata fissata in almeno 4.5 m per assicurare un efficace immorsamento all'interno della porzione di ammasso non degradato.



Sui volumi rocciosi potenzialmente instabili ritenuti più critici (elementi denominati 8c e 9) sono state eseguite una serie di analisi e verifiche di stabilità con il codice di calcolo SWEDGE, basato sul metodo dell'Equilibrio Limite, in modo da verificare l'incremento del fattore di sicurezza fornito dall'intervento di stabilizzazione previsto.

I parametri di resistenza al taglio sono stati determinati sulla base delle informazioni del rilievo geologico-strutturale, unitamente ad una serie di analisi a ritroso sui volumi 15 e 16 mobilizzati. L'ispezione visiva del fronte, infatti, ha consentito l'individuazione di due nicchie di distacco, adiacenti ai due blocchi indagati, generate dal crollo di altrettanti cunei rocciosi. Analizzando la geometria delle nicchie, è stato possibile riconoscere le medesime configurazioni geostrukturali che sono alla base della formazione dei blocchi 8c e 9. Si è proceduto pertanto secondo quanto descritto nel seguito:

- i valori dell'angolo di resistenza al taglio sono stati determinati utilizzando il criterio di resistenza di Barton-Bandis;
- la stima dei valori di coesione è stata effettuata in base ai risultati delle analisi parametriche a ritroso, individuando i valori di coesione in corrispondenza dei quali il fattore di sicurezza, calcolato nelle condizioni rappresentative dei blocchi 15 e 16, risulta prossimo a 1.

Le analisi hanno evidenziato valori del coefficiente di sicurezza in assenza di interventi prossimi alle condizioni di equilibrio limite (FS $\approx$ 1.0)

Al fine di valutare l'incremento del livello di sicurezza apportato dall'intervento di stabilizzazione, si è utilizzata la correlazione di Bjurström (1974), attraverso la quale è possibile tradurre l'azione del sistema di chiodatura in un incremento della resistenza coesiva della discontinuità (denominata coesione apparente).

Sono state eseguite sia analisi statiche, considerando come forze agenti le sole forze gravitative, sia analisi dinamiche (pseudostatiche), tenendo in conto anche l'effetto del sisma, considerando le forze sismiche di un sito posto in Zona 3, cui corrisponde un'accelerazione orizzontale sismica  $a_g = 0.15g$ . I risultati evidenziano coefficienti di sicurezza variabili tra 1.52 (volume 9, analisi in condizioni sismiche) e 3.13 (volume 8c, analisi in condizioni statiche). Ai sensi del D.M. 11/03/1988 le verifiche sono positive, risultando in tutti i casi indagati  $F_s > 1.3$ .