

CAVA NUOVA BARTOLINA S. r. l.

GAVORRANO (GROSSETO)

CAVA “POGGIO GIROTONDO”

**PROGETTO DI COLTIVAZIONE
E RECUPERO AMBIENTALE**

(Ai sensi del. G.R. 11/02/2002 n° 138, punto 5)

VARIANTE IN AMPLIAMENTO

Agosto 2009

ALLEGATO 1

**RELAZIONE GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA
E VERIFICHE DI STABILITA' DEI FRONTI DI SCAVO**

Art. 52 D.Lgs. 624/1996

**G e o s t u d i o
DR. MAURO ROCCHI**

**Consulenze geologiche, ambientali e minerarie
Indagini geotecniche * Prospezioni geofisiche**

INDICE

1. PREMESSA
2. QUADRO GEOLOGICO
 - 2.1 Geomorfologia
 - 2.2 Strutture tettoniche e fenomeni di instabilità
 - 2.3 Caratteri geomeccanici del diabase
 - 2.4 Classificazione di Bieniawski modificata
3. RILIEVI GEOSTRUTTURALI E GEOMECCANICI
 - 3.1 Fronte Sud
 - 3.2 Fronte Est
 - 3.3 Fronte Sud-Ovest
 - 3.4 Stima del coefficiente di rugosità
 - 3.5 Commento ai risultati
4. SINTESI DEI RISULTATI E DELLE VERIFICHE DI STABILITÀ

Bibliografia

APPENDICE

APPENDICE 1 – Verifiche di stabilità cinematica

APPENDICE 2 – Verifiche di stabilità numeriche

1. PREMESSA

E' stato realizzato un programma di indagine volto alla caratterizzazione geostrutturale e geomeccanica dell'ammasso roccioso ed all'individuazione dei possibili fenomeni di instabilità dei singoli gradoni e dei fronti di cava nella loro interezza.

Una prima fase di indagine è stata rivolta allo studio del solo fronte sud; successive fasi hanno interessato i fronti est e nord e infine il fronte sud-ovest.

Le indagini svolte sono riassunte nel seguente schema:

1. Rilievo geologico e geomorfologico dell'area di cava;
2. Rilievo geomeccanico per la classificazione e definizione dei parametri di resistenza dell'ammasso roccioso (n.º3 stazioni);
3. Rilievi geostrutturali per la definizione delle giaciture delle discontinuità (di faglie e fratture) condotti sui principali gradoni di escavazione;
4. Analisi geometrica e verifiche di stabilità cinematica e numerica all'equilibrio limite delle instabilità più ricorrenti;
5. Sintesi e interpretazione dei dati, indicazioni di supporto alle fasi progettuali e di coltivazione.

I rilievi geostrutturali sono stati condotti su gradoni del fronte sud, del fronte est/nord e del fronte sud-ovest. Gli stendimenti realizzati hanno avuto lunghezza minima di 10-20 m ciascuno.

I rilievi geomeccanici sono stati condotti su tre gradoni di cava lungo stendimenti continui di lunghezza di 20 m.

La metodologia di rilievo applicata fa riferimento alle norme *I.S.R.M., 1978*.

La resistenza della roccia, intesa come funzione del grado di alterazione delle superfici delle singole fratture, è stata verificata applicando il test descritto da *Williamson D.A. & Khun R., (1988)*.

In base alle risultanze degli approfondimenti tecnici descritti sono state fornite le indicazioni degli interventi per la sistemazione dei fronti, in accordo con i risultati delle verifiche di stabilità condotte ed in relazione ai possibili rischi associati alle lavorazioni in corso. A tali indicazioni dovranno far seguito in fase di elaborazione del progetto di coltivazione le opportune azioni di messa in sicurezza e/o mitigazione del rischio.

Nella stesura del presente documento si è tenuto conto di quanto prodotto in precedenza riguardo alla valutazione dei rischi connessi alla stabilità dei versanti, ed in particolare del DSS e della relazione del settembre 2004 a firma del dott. Geol. Cristiano Di Cesare, Studio Geoambiente di Grosseto.

2. QUADRO GEOLOGICO

La Cava di Poggio Girotondo (*Cava Bartolina*) interessa una vasta area di territorio che include al suo interno due diverse formazioni geologiche. La prima è costituita da *Diabasi (Basalti massicci del Giurassico medio-superiore)*, di colore grigio o grigio-verde e marrone-rossastro se alterati per la presenza di ossidi di ferro; la struttura è massiccia e ben compatta. I diabasi affiorano nella maggior parte dell'area estrattiva e sono oggetto dell'attuale e delle passate coltivazioni.

L'altra formazione, che affiora nella parte ovest dell'area di cava, è costituita dal *Flysch Calcareo ("Argille e Calcari" dell'Eocene medio-superiore)* che ingloba e delimita il corpo diabasico e presenta una litologia prevalentemente siltitico-argillitica-marnosa con subordinate alternanze di strati calcarei, calcarenitici ed arenacei. Questa formazione si presenta tettonicamente disturbata con assetto caotico, evidenziato da ricorrenti piegamenti anche a corto raggio, e

fratturazione a tratti intensa che ne riducono considerevolmente le caratteristiche di resistenza e conseguentemente di stabilità.

2.1 Geomorfologia

Le aree di affioramento delle due formazioni descritte in precedenza devono essere distinte in quanto ad esse corrispondono caratteri geomorfologici nettamente differenziati.

La superficie maggiore, sede degli affioramenti di diabase, è ad oggi soggetta alle modificazioni morfologiche indotte dalla attività estrattiva ancora in atto. L'elevata resistenza meccanica del litotipo ha consentito una coltivazione *a fossa*, su 7-8 ordini di gradoni mediamente di 10 metri di alzata e 8-10 metri di pedata, per una profondità massima dal piano campagna originario di circa 80 m. La pendenza dei fronti è variabile dai 60° agli 80°. La fascia di alterazione esterna della roccia, che ne costituisce il *cappellaccio di alterazione*, varia di spessore da zona a zona mantenendosi comunque entro pochi metri.

Le condizioni di fratturazione del diabase sono localmente variabili; in molti casi la roccia è assai compatta, con fratture serrate e distanziate alcuni metri, con fenomeni di allentamento di blocchi rocciosi nel complesso limitati in dimensioni e in genere superficiali. In altri casi si riscontra una fitta fratturazione che scompone parti dell'ammasso in un insieme di blocchi instabili di piccole dimensioni. In ricorrenti situazioni sono state rilevate filtrazioni idriche in forma di stillicidi dalle fratture (Figura 1). La parte di area estrattiva maggiormente interessata da tali percolazioni e filtrazioni all'interno delle discontinuità, e da corrivazioni nella parte alta della cava, è quella del fronte est adiacente al corso del Fiume Bruna.

E' probabile che l'assetto del cavo estrattivo, con quote assai più depresse rispetto al letto del corso d'acqua, induca un richiamo delle acque di subalveo verso l'area estrattiva stessa. Evidenza di tale filtrazione si ha sui gradoni sia di monte che di valle prossimi alla pista di carreggio della cava, in coincidenza con il fronte est; indicazioni specifiche sono descritte nella parte dedicata

ai rilievi del fronte est medesimo. Si deve tener presente come tale circolazione idrica possa potenzialmente incidere negativamente sulle condizioni di stabilità del fronte stesso.



Figura 1 - Filtrazioni idriche nella zona est della cava

L'assetto a gradoni descritto interessa tre fronti principali, orientati rispettivamente a sud-ovest, sud ed est; di limitate dimensioni è il fronte nord, mentre l'area di affioramento del flysch coincide con il fronte ovest. In questa zona le caratteristiche di ridotta stabilità ed elevata erodibilità

dei litotipi argilloscistosi hanno creato una morfologia meno acclive con evidenti instabilità rappresentate da diffusi fenomeni di erosione e di colamento dei materiali argillosi (Figura 2).



Figura 2 – Fronte ovest; sulla sinistra l'area di affioramento del flysch

Dalle condizioni geomorfologiche in sito risulta evidente come la mancata regimazione delle acque abbia qui creato un dilavamento ed un accumulo dei materiali verso il fondo della cava e sui gradoni intermedi.

Forme di accumulo di detrito dei materiali di copertura del diabase, in parte dovute al franamento del flysch dove questo è molto fratturato e/o alterato, sono presenti anche in alcune aree come a monte della rampa occidentale di accesso alla cava, sul fronte sottostante agli impianti di cava e sui gradoni basali. In genere sui fronti attualmente attivi non si rilevano forme di accumulo

del genere; i depositi di detrito di diabase sono infatti limitati a ridotte quantità di materiali depositati al piede dei gradoni stessi.

2.2 Strutture tettoniche e fenomeni di instabilità

La buona esposizione dei fronti ha permesso una completa descrizione e la relativa cartografia delle zone di faglia che separano parti di ammasso, all'interno delle quali sono stati riconosciuti domini a diversa deformazione, oltre a vere e proprie zone di faglia all'interno delle quali sono distinguibili parti definibili come **CORE** e **DAMAGE ZONE**, in genere di limitata estensione.

Sono state riconosciute faglie di primo ordine (superfici di dislocazione associate a zone cataclastiche e mostranti evidenti indicatori cinematici), faglie minori con indicatori di movimento, fratture s.l. (joint s.s, e fratture senza evidenza mesoscopica di movimento) e sistemi di fratture coniugate.

Nell'area di cava è stata rilevata una serie di piani di faglia riconducibile a due principali sistemi rispettivamente di direzione WNW-ESE e NE-SW con superfici oscillanti intorno al piano verticale, cioè immergenti da parti opposte rispetto allo stesso e con angolo generalmente piuttosto elevato rispetto al piano orizzontale (Figura 3). Lungo i gradoni del fronte sud della cava tali piani sono particolarmente evidenti perchè tagliano a basso angolo i fronti. Queste strutture tettoniche fragili costituiscono i principali elementi di discontinuità dell'ammasso insieme ai sistemi di fratture associate .

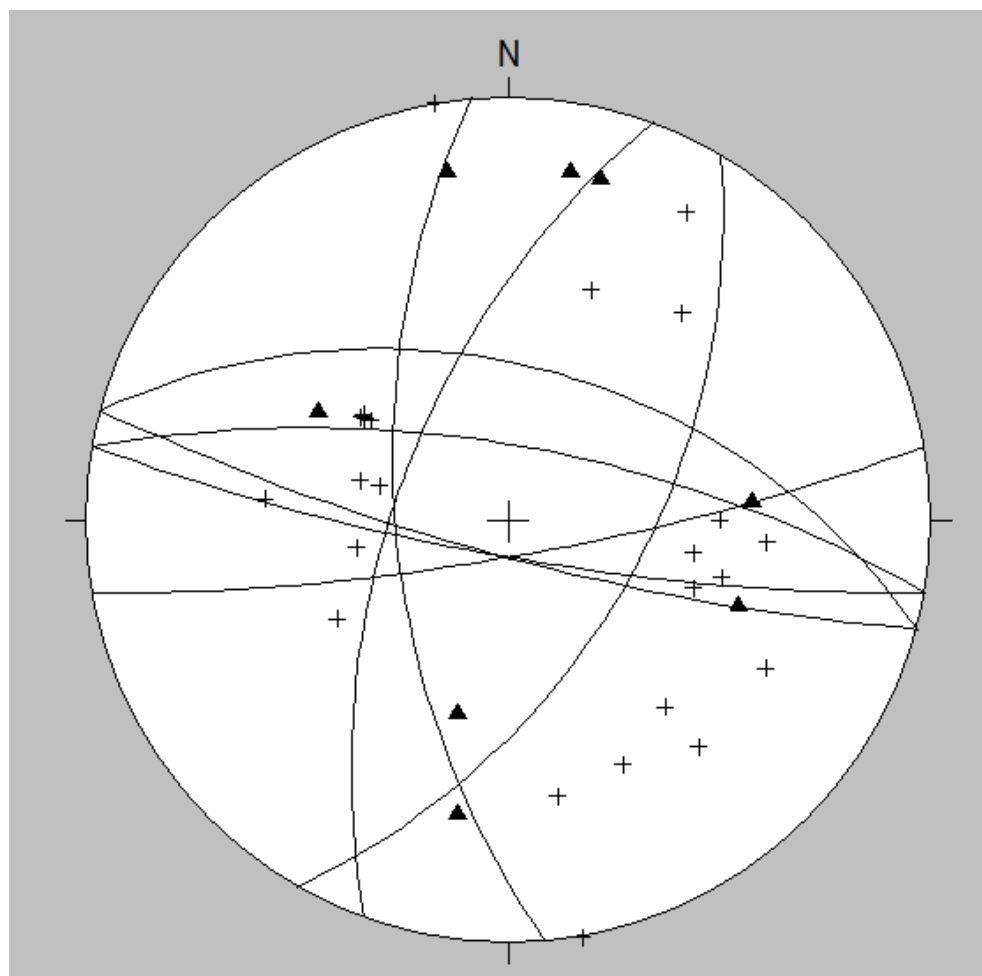


Figura 3 – Proiezione stereografica di alcuni sistemi di faglie del fronte sud

L'apertura tra muro e tetto di faglia è assente e talvolta priva di fascia cataclastica; in altri casi si rileva la presenza di un riempimento con spessori centimetrici di materiale ricristallizzato e brecciato, in genere privo di erodibilità marcata per la presenza di una ricementazione degli elementi clastici (Figure 4 e 5).

Data l'elevata resistenza del materiale e la limitata densità di fratturazione dello stesso, con sufficientemente buona qualità della roccia, non si rilevano consistenti fenomeni di crollo di blocchi rocciosi. Ai piedi delle scarpate sono presenti piccoli accumuli di blocchi da centimetrici a

decimetrici. Lungo la pedata dei gradoni qui analizzati tali accumuli sono in genere limitati e ubicati al piede delle singole alzate ed occupano un minimo spazio dei gradoni stessi per la frequente



Figura 4 - Faglia con riempimento clastico

ripulitura e manutenzione operata e per la non elevata energia di caduta di tali elementi. Maggiori accumuli di materiale sono presenti alla base dei gradoni di raccordo tra il fronte sud ed il fronte ovest.

Nei casi dove si riscontrano discontinuità singole o in sistemi di persistenza importante si rileva la presenza di superfici di scivolamento planare o a forma di cuneo, spesso molto nette e pulite, sia in forma planare sia ondulata. Tali fratture interessano maggiormente la parte alta dei gradoni ed hanno angoli di inclinazione minore; in altri casi presentano angoli di inclinazione maggiore (Figura 6), cioè sono di poco meno inclinate dei fronti di scavo e presentano superfici anche di diversi metri di ampiezza (lato est del fronte sud e fronte est). I blocchi instabili associati a

tali scivolamenti, rilevati durante i sopralluoghi, sono in genere limitati per dimensioni e numero; nella maggior parte dei casi le ampie superfici a franapoggio sono state messe a luce durante le lavorazioni ed hanno favorito lo scavo e la modellazione dei fronti stessi.



Figura 5 – Sistema di faglie con evidenze di ricristallizzazione del piano di faglia



Figura 6 – Cuneo roccioso a franapoggio molto inclinato

2.3 Caratteri geomeccanici del diabase

Il diabase è litologicamente una roccia ignea a struttura compatta priva di stratificazione; la sua conformazione è tipicamente quella di un ammasso roccioso massivo privo di discontinuità di genesi primaria. In genere la resistenza del materiale è molto elevata. Assieme alle caratteristiche

intrinseche di resistenza del materiale roccioso concorrono a caratterizzare il comportamento geomeccanico dell'ammasso le discontinuità secondarie, rappresentate da faglie e fratture, che sono connesse in questo caso alle strutture di flusso della massa ignea, alle fasi fratturative legate al raffreddamento della stessa ed alla fratturazione correlata alla storia tettonica dell'ammasso.

Ruolo ulteriore è svolto dalla presenza di alterazione della roccia riscontrabile sulle superfici di frattura e sui tratti maggiormente esposti ai fenomeni esogeni.

Dalle indagini condotte in sito lo stato di alterazione delle superfici nella maggioranza dei casi non è risultato molto spinto; si rilevano per lo più solo sottili patine di ossidi di ferro. Uno stato di alterazione leggermente più marcato è stato rilevato in alcune stazioni del fronte est. In alcuni casi fasce di alterazione più importanti sono impostate in presenza di faglie e delle strutture fragili ad esse associate con forme brecciate della roccia e/o con riempimenti secondari di natura quarzosa.

Date le caratteristiche di omogeneità complessiva dell'ammasso roccioso diabasico, gli elementi principali di discontinuità sono rappresentati dalle faglie e dai sistemi di fratture maggiori.

Il rilievo condotto ha infatti permesso di rilevare la presenza di alcuni evidenti sistemi di faglie, a cui sono associate fasce cataclastiche e ampie superfici con importante ricristallizzazione secondaria e con brecce di riempimento di spessori anche metrici, che costituiscono elementi di importante disomogeneità del mezzo. In alcuni casi la qualità stessa dell'ammasso varia passando da gradone a gradone e talvolta all'interno del singolo gradone medesimo. Ciò ha reso necessario rilevare in modo distinto e sistematico varie aree all'interno dello stesso gradone. Dai rilievi geostrutturali condotti è stata ricavata una serie di dati caratteristici dell'ammasso roccioso sia geostrutturali che geomeccanici di seguito riportati e descritti.

Da dati di letteratura i parametri geomeccanici di una formazione ignea di natura basaltica in condizioni integre sono indicativamente: angolo di attrito interno 45° , peso di volume $2,7-3,0 \text{ t/m}^3$, coesione del materiale roccioso 350 kg/cm^2 (Hoek & Bray, 1981).

2.4 Classificazione di Bieniawski modificata (1989)

I risultati forniti dal rilievo geostrutturale e dalle prove in situ sono stati elaborati anche secondo la classificazione di Bieniawski (1989) che permette una definizione migliore, più specifica, dei diversi parametri che contribuiscono a determinare il valore dell'indice di qualità della roccia (RMR = *Rock Mass Rating*). Nonostante tale classificazione sia stata creata appositamente per valutare il dimensionamento e le tipologie di intervento per la realizzazione di gallerie, essa viene normalmente utilizzata nel campo della progettazione di infrastrutture di ingegneria civile e anche per la valutazione della stabilità di fronti di scavo e pendii naturali.

Tale classificazione si basa sul rilievo di 6 parametri:

R1 - resistenza a compressione uniassiale

R2 - RQD

R3 - spaziatura delle discontinuità

R4 - condizioni delle discontinuità

R5 - condizioni idrauliche

R6 - orientamento delle discontinuità

Bieniawski presenta, per i parametri da R1 a R5, una serie di grafici e tabelle che consentono di determinare con maggiore accuratezza i singoli valori e di aumentare allo stesso tempo la possibilità di differenziazione tra ammassi appartenenti a classi uguali o limitrofe.

Nel caso di ammassi per i quali siano stati individuati dei potenziali cinematismi sfavorevoli rispetto alla posizione del fronte, la somma del parametro R6, di valore negativo, agli altri cinque consente di ridurre il valore dell'RMR.

Quindi si distinguono due valori dell'RMR:

$$\text{RMR base} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$$

$$\text{RMR corretto} = \text{RMR base} + R6$$

In base al valore di RMR, ottenuto dalla somma dei parametri caratteristici, si può attribuire l'ammasso roccioso a una delle cinque classi di qualità previste. Pertanto, dalla trattazione statistica dei singoli parametri morfometrici rilevati sono stati individuati i valori più ricorrenti quali classi di ingresso per l'applicazione della classificazione geomeccanica (*Bieniawski, 1989*).

3. RILIEVI GEOSTRUTTURALI E GEOMECCANICI

Per caratterizzare l'ammasso roccioso della cava sono stati condotti dei rilievi geostretturali nei quali sono state sistematicamente misurate in campagna le giaciture delle discontinuità presenti nelle varie stazioni di rilievo. Tali dati sono stati successivamente trattati statisticamente, al fine di identificare i principali sistemi di discontinuità dell'ammasso, verificare le intersezioni degli stessi ed i rapporti geometrici tra le discontinuità e i fronti di scavo.

I fronti interessati dai rilievi sono stati il fronte sud, il fronte sud-ovest e nord ed il fronte est.

Di seguito, per ciascuno dei fronti, si descrivono le stazioni di rilievo, le caratteristiche geostretturali e geomeccaniche, riportando i parametri di classificazione dell'ammasso roccioso, i dati geostretturali e le risultanze delle verifiche di stabilità.

3.1 Fronte Sud

In corrispondenza del fronte sud (Figura 7) sono stati interessati dai rilievi i gradoni 2-4-7 (rilievo geostretturale) e il gradone 6 (rilievo geomeccanico) (Figura 8).

Nel corso dei rilievi sono state realizzate complessivamente n.9 stazioni. Il rilievo si è concentrato sulla misurazione alla scala dell'affioramento dei sistemi di fratturazione presenti; per la caratterizzazione geomeccanica sono stati rilevati i parametri morfometrici di tali discontinuità secondo quanto raccomandato da *ISRM*, 1978.



Figura 7 – Fronte sud; i gradoni 1 (quota +20) e 3 (quota + 0) interessati dal rilievo strutturale e il gradone 5 (quota - 20) dal rilievo geomeccanico

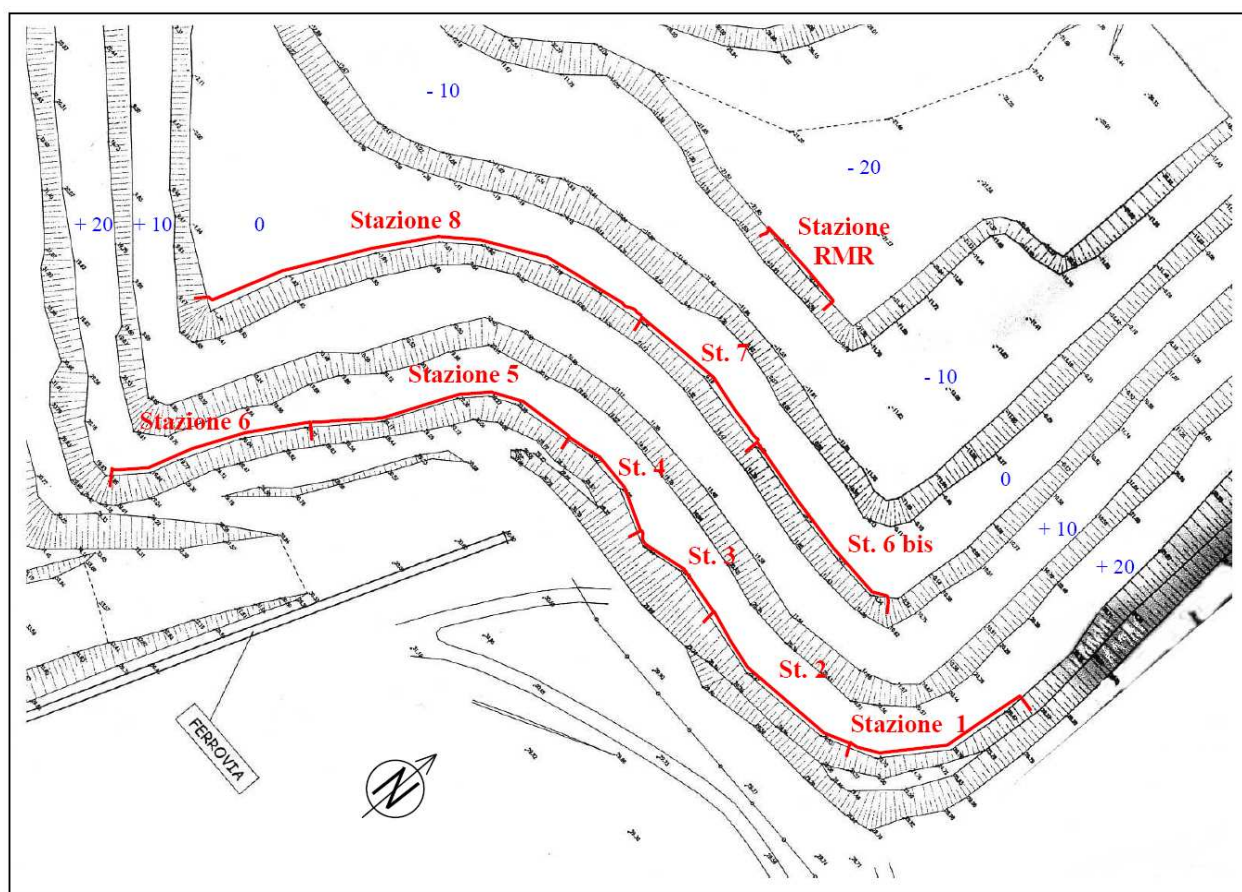


Figura 8 - Ubicazione delle stazioni di misura sul fronte Sud

Gli stendimenti effettuati, di lunghezze comprese tra 10 e 20 m, sono stati concentrati nella parte dei gradoni dove l'ammasso presenta condizioni di qualità sufficiente a condurre il rilievo statistico dei dati geomeccanici. Nella stazione ubicata nel gradone basale (Figura 9) è stato condotto il rilievo propriamente geomeccanico al fine della caratterizzazione dell'ammasso.



Figura 9 – Fronte sud - Affioramento su cui è stato effettuato il rilievo geomeccanico

La resistenza della roccia, intesa come funzione del grado di alterazione delle superfici delle singole fratture, è stata verificata applicando il test descritto da *Williamson D.A. & Khun R.,(1988)*. I risultati dei rilievi sono di seguito descritti.

In base alle prove di resistenza effettuate in sito durante i rilievi, la roccia intatta e non alterata è classificabile qualitativamente come dotata di una resistenza elevata (cat. A- classe 12 Bieniawski,1989) definita “*R4 resistente*” con valori di 100 MPa e Point Load Index = 2-4 MPa (ISRM,1981). Tale resistenza decade in relazione al grado di alterazione del materiale roccia a valori inferiori a 50 Mpa, rientrando in classe R3 “*mediamente resistente*” con una ricorrenza del 15-20% nei dati di rilievo.

Applicando la classificazione di Bieniawski (1973), per definire la qualità dell'ammasso, si rientra nel campo di un ammasso “massivo” con resistenza a compressione monoassiale di 100 MPa che lo fa classificare, nelle condizioni migliori, come di qualità “*Strong Rock mass/medium strength rock mass*” con coesione 0,2 MPa e angolo di attrito di 40°.

Sempre da dati di rilievo, la classe di resistenza rilevata come più ricorrente è la classe 7 (Bieniawski,1989), e ciò è dovuto alla presenza di superfici alterate che fanno decadere la resistenza stessa; a tale classe è applicabile cautelativamente una resistenza a compressione monoassiale di 50 MPa. In questo caso, considerando anche una fratturazione di media intensità, l'ammasso è più cautelativamente classificabile come “*Medium strength Rock Mass*” con valori di angolo di attrito 30°-40° e coesione 0,1-0,2 MPa.

Classificazione geomeccanica dell'ammasso

I dati dei parametri morfometrici più ricorrenti hanno indicato le discontinuità come debolmente alterate, leggermente scabre, con apertura 0,1-1,0 mm, persistenza tra 1,0-3,0 m, e spaziatura tra 60-200 mm. Queste classi modali sono indicative delle condizioni generali dell'ammasso e quindi non sono indicative di zone singolari quali zone di faglia, fasce cataclastiche e tettonizzate e di intensa fratturazione. Le condizioni sono rappresentative di un ammasso fratturato ma con discontinuità con media persistenza e ridotta spaziatura e apertura, medio-elevata rugosità e basso grado di alterazione.

Non sono state rilevate nei fronti analizzati del lato sud né filtrazioni di fluidi né condizioni di umidità in sito.

Dai dati rilevati risulta in prima analisi che l'ammasso ha una resistenza a compressione di circa 70 MPa, la spaziatura modale è < 60 mm. Tali valori fanno classificare l'ammasso come mediamente resistente-intensamente fratturato (Bieniawski,1973) e ad esso si associano, in prima analisi, un angolo di attrito interno pari a $\phi=30^{\circ}$ - 40° ed una coesione di $c=0,1-0,2$ MPa.

Classificazione RMR

Le attribuzioni dei rating per il calcolo dell'indice RMR hanno quindi permesso di classificare l'ammasso in classe II ammasso buono $RMR = 65$ come qualità di base. In applicazione di quanto previsto dallo stesso autore, è stata introdotta la correzione che declassifica l'ammasso in funzione della stabilità dei versanti; nel caso specifico è stata applicata una classe media ottenendo un $RMR_{mod} = 40$. Data l'assenza di fluidi i parametri considerati si intendono drenati. Il valore di RQD teorico ricavato è del 40-90%.

Il valore del Geological Strength Index (*Hoek, 1995-1998*) medio-basso è di 60.

I parametri di resistenza al taglio (criterio di Mohr-Coulomb) ricavabili da relazioni empiriche basate sull'indice RMR e la conducibilità idraulica teorica sono di seguito riportati in tabella.

PARAMETRI GEOMECCANICI BASATI SU RMR89	
Angolo di attrito	37°
Coesione KPa	325
GSI	60
Ed GPa	23-30
K (m/s)	$1,7 \times 10^{-7}$

3.2 Fronte Est

In corrispondenza del fronte est i rilevamenti geostrutturali sono stati eseguiti su n° 4 gradoni fino alla loro prosecuzione nel fronte nord; in particolare le bancate studiate sono state quelle a quota di 10 m, -10 m, - 30 m e - 45 m s.l.m. per un totale di 55 stazioni di misura con stendimenti di lunghezza superiore o uguale a 20 m (Figura 10).

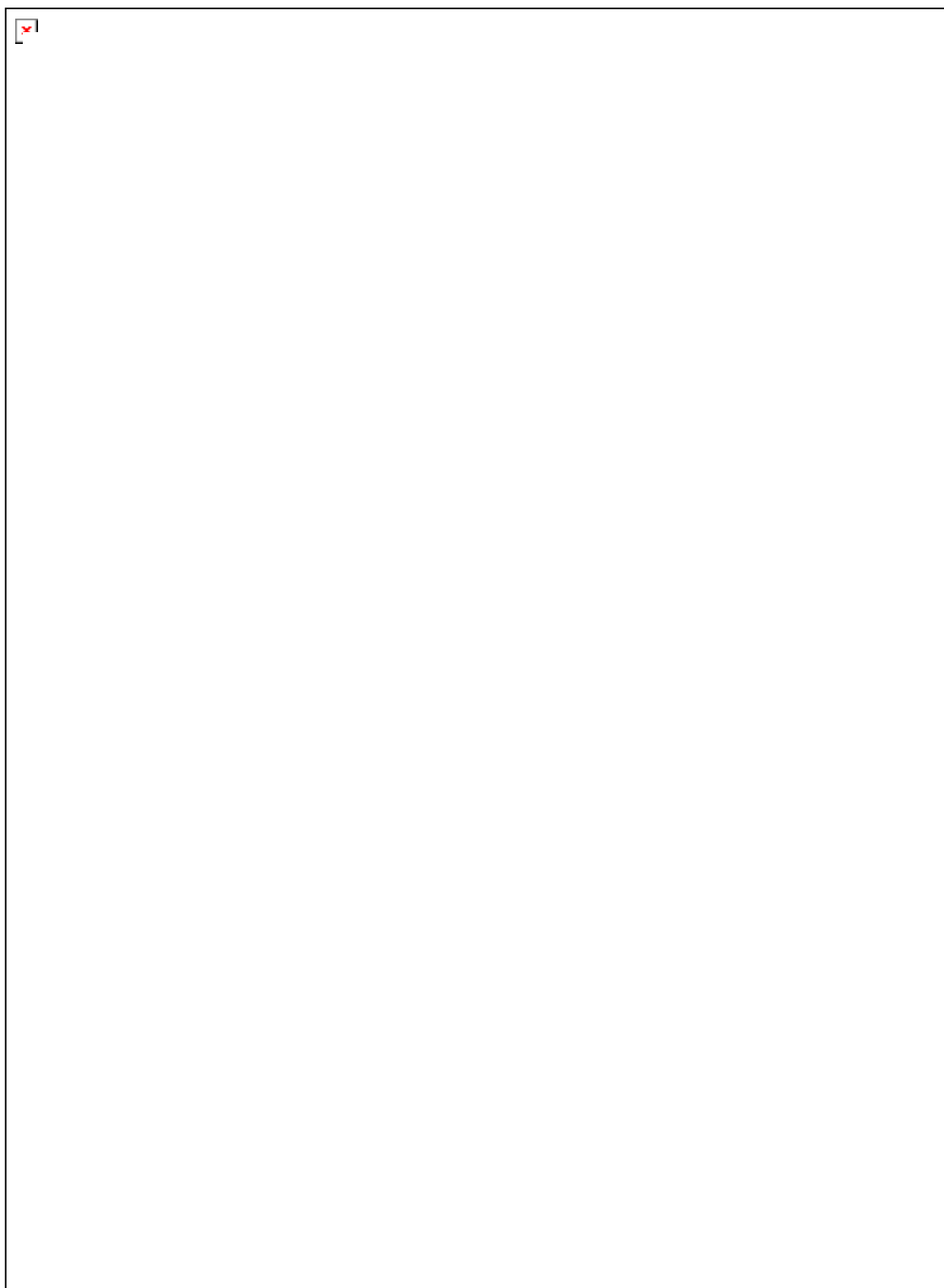


Figura 10: Fronte Est – Ubicazione delle stazioni del rilievo , delle fratture principali e delle venute idriche.

E' stata scelta una stazione di lunghezza pari a 20 m, nel gradone più basso a - 45 m, per il rilievo geomeccanico volto alla determinazione dell' RMR (Figura 11).



Figura 11 – Fronte est - Affioramento su cui è stato effettuato il rilievo geomeccanico

In base alle prove di impatto descritte in precedenza si può effettuare una stima approssimata della resistenza a compressione semplice dei terreni e delle rocce, mediante indici ottenuti in campagna. Nel caso del fronte est dalle prove si evince che la roccia è estremamente dura, rientra cioè, in una classe R6 con un valore di resistenza a compressione semplice ≥ 250 MPa.

Questi valori sono da riferirsi alla porzione di roccia meno alterata e non cataclastica; col progredire dell'alterazione e nei casi di maggior fratturazione i valori decadono progressivamente.

La dimensione dei blocchi condiziona in modo diretto il comportamento e le proprietà di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso. La dimensione e la forma dei blocchi risultano definite secondo il numero di famiglie dei giunti, la loro orientazione, la loro spaziatura e la loro continuità.

La descrizione delle dimensioni del blocco è stata realizzata definendo il parametro J_v , che rappresenta il numero totale di discontinuità che intercettano un'unità di volume (1 m^3).

Poiché sussiste l'oggettiva difficoltà ad osservare tridimensionalmente un affioramento, il valore J_v in genere si determina contando le discontinuità di ogni famiglia che intercettano una lunghezza determinata, misurando perpendicolarmente alla direzione di ognuna delle famiglie.

$$J_v = \sum \frac{\text{n° di discontinuità}}{\text{lunghezza di misura}}$$

Nel caso in esame le famiglie di giunti sono quattro quindi:

$$J_v = (\text{n° } J1/L1) + (\text{n° } J2/L2) + (\text{n° } J3/L3) + (\text{n° } J4/L4)$$

Sostituendo in tale espressione i valori trovati, si ha:

$$J_v = 22.80 \approx 23$$

Con questo valore, secondo la tabella seguente, si hanno dei blocchi piccoli.

Descrizione	J_v
Blocchi molto grandi	< 1
Blocchi grandi	1-3
Blocchi di dimensioni medie	3-10
Blocchi piccoli	10-30
Blocchi molto piccoli	< 30

Descrizione della dimensione dei blocchi in funzione del numero di discontinuità.

Il grado di fratturazione si esprime generalmente attraverso il valore dell'indice RQD (*rock quality designation*), parametro che si può stimare in affioramento a partire da formule empiriche come quella di Palmstrom, 1975 (in ISRM, 1981):

$$RQD = 100 \quad \text{per } J_v \leq 4.5$$

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad \text{per } J_v > 4,5$$

Nel nostro caso, si ha:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v = 115 - (3,3 \times 23) = 39,1$$

Classificazione geomeccanica

La spaziatura dei giunti condiziona la dimensione dei blocchi e, pertanto, definisce il ruolo che questi avranno nel comportamento meccanico dell'ammasso roccioso.

Nel nostro caso, la **Spaziatura** media dei giunti risulta essere *Ravvicinata* per la prima famiglia, da *Ravvicinata* a *Molto ravvicinata* per la seconda famiglia, da *Molto ravvicinata* a *Moderatamente ravvicinata* per la terza e *Ravvicinata* per la quarta.

Sia la **Lunghezza** che la **Terminazione** delle discontinuità sono parametri importanti che contribuiscono alla definizione dello RMR; per tutte le fratture analizzate, si hanno lunghezze che vanno da *Molto Elevate* ad *Elevate* e tutte le discontinuità si tagliano.

Un parametro importante che riguarda le discontinuità è l'**Apertura**, cioè la distanza perpendicolare che separa le pareti del giunto quando non esiste il riempimento. Su questo affioramento è stata rilevata un'apertura da 2,50 a 10 mm, quindi *Moderatamente ampia*.

La **Scabrezza**, la cui descrizione ha come scopo principale la valutazione della resistenza al taglio lungo le discontinuità prive di coesione. Secondo dei profili *standard*, per questo affioramento abbiamo delle superfici di frattura che sono *scabre* e variano il loro profilo da *Seghettato* a, talora *Levigato*, quindi rientrano nelle classi I e III.

Il **Riempimento** delle fratture non è sempre presente, talora si riscontrano ricristallizzazioni di calcite e pirite sulle pareti delle fratture.

Ad uno sguardo complessivo l'affioramento rientra in un **Grado di alterazione I**, cioè *Fresco*; dove vi è circolazione di acqua appare *Leggermente Alterato* (Grado di alterazione II).

L'ammasso roccioso si presenta molto umido. Da segnalare che la presenza d'acqua aumenta nel settore Nord-Est della cava.

Classificazione RMR

Dalla somma algebrica data a tutti questi indici, si ottiene un indice RMR dell'ammasso roccioso pari a $RMR = 46$.

Dai dati ottenuti si individua una famiglia di discontinuità con orientazione a franapoggio rispetto al fronte di scavo e questo porta ad introdurre un fattore correttivo, da applicare all'RMR ottenuto, pari a 5.

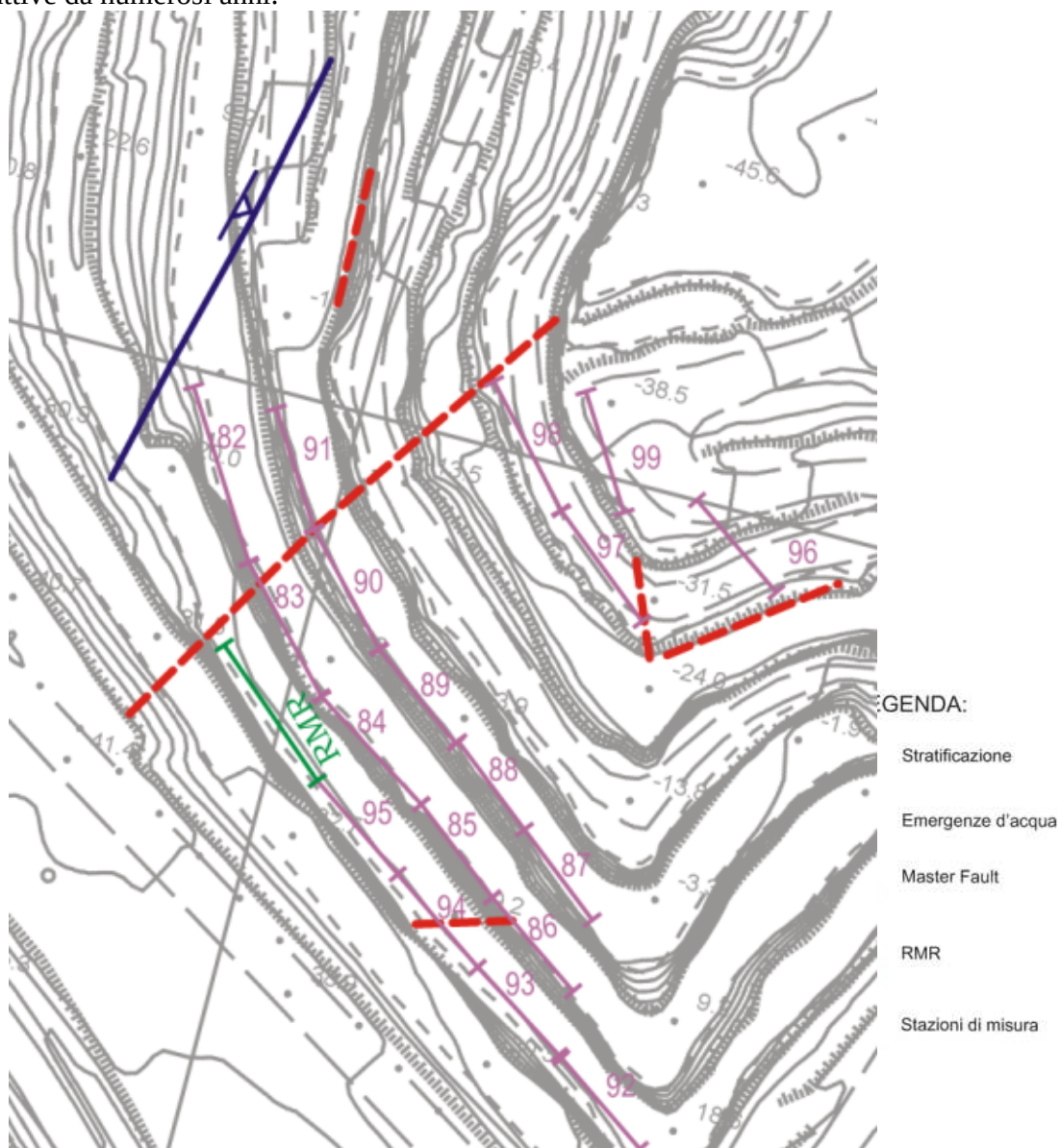
In definitiva si avrà pertanto:

$RMR_{mod} = 41$ (qualità dell'ammasso DISCRETA, prossima allo SCADENTE).

PARAMETRI GEOMECCANICI BASATI SU RMR89	
Angolo di attrito	25,5°
Coesione KPa	230
GSI	41
Ed GPa	10

3.3 Fronte Sud-Ovest

L'area del rilievo riguarda gli affioramenti del diabase tra il suo contatto stratigrafico occidentale con il flysch e la profonda inflessione a sud delle precedenti coltivazioni: Tali fronti sono inattive da numerosi anni.



Classificazione geomeccanica

Colpendo la roccia con il martello, si hanno soltanto schegge; da questo si evince che la roccia è estremamente dura, rientra cioè, in una classe R6 con un intervallo di resistenza a compressione semplice ≥ 250 MPa. Questi valori sono da riferirsi alla porzione di roccia meno alterata e non cataclastica.

Le famiglie di giunti rilevati sono caratterizzate da:

famiglia 1: 150/35

famiglia 2: 075/48

famiglia 3: 350/57

Dall'espressione $J_v = (n^\circ J1/L1) + (n^\circ J2/L2) + (n^\circ J3/L3)$

sostituendo avremo: $J_v = (8/1) + (9/1) + (10/1) = 27$

A questo valore corrispondono *blocchi piccoli*.

Il grado di fratturazione si esprime generalmente attraverso il valore dell'indice RQD (*Rock Quality Designation*), parametro che si può stimare in affioramento a partire da formule empiriche come quella di Palmstrom, 1975 (in ISRM, 1981):

$$RQD = 100 \quad \text{per } J_v \leq 4,5$$

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad \text{per } J_v > 4,5$$

Nel caso in esame si avrà::

$$RQD = 115 - 3,3 J_v = 115 - (3,3 \times 27) = 29,5$$

La **Spaziatura** media dei giunti nell'area considerata risulta essere *Ravvicinata* per la prima famiglia, da *Ravvicinata* a *Molto ravvicinata* per la seconda famiglia e da *Molto ravvicinata* a *Moderatamente ravvicinata* per la terza.

Le **Lunghezze** vanno da *Molto Elevate* ad *Elevate* e tutte le discontinuità si tagliano.

Su questi affioramenti è stata rilevata un'**Apertura** da 2.50 a 10 mm, quindi *Moderatamente ampia*.

Secondo dei profili standard, per questo affioramento abbiamo delle **Superfici** di frattura che sono *scabre* e variano il loro profilo da *Seghettato* a, talora *Levigato*, quindi rientrano nelle classi I e III.

Il **Riempimento** delle fratture non è sempre presente, talora si riscontrano ricristallizzazioni di calcite sulle pareti delle fratture.

Ad uno sguardo complessivo l'affioramento rientra in un **Grado di alterazione** I, cioè *Fresco*; dove vi è circolazione di acqua esso appare *Leggermente Alterato* (Grado di alterazione II).

L'ammasso roccioso si presenta leggermente umido.

Classificazione RMR

Dalla somma algebrica data a tutti questi indici, si ottiene l'indice RMR dell'ammasso roccioso. In questo caso abbiamo $RMR = 53$.

Dai dati ottenuti si individua una famiglia di discontinuità con orientazione a franapoggio rispetto al fronte di scavo.

Questo porta ad un fattore correttivo, da applicare all'RMR ottenuto, pari a 5.

In definitiva si avrà $RMR_{mod} = 48$ (qualità dell'ammasso *discreta*).

PARAMETRI GEOMECCANICI BASATI SU RMR₈₉	
Angolo di attrito	29°
Coesione KPa	265
GSI	48
Ed GPa	12-13

In definitiva, i parametri caratteristici dei vari fronti dei settori della cava Poggio Girotondo su cui è stato effettuato lo studio mostrano una variabilità relativa, come emerge dalla tabella di confronto che segue

TABELLA RIASSUNTIVA				
Parametri	Fronte sud	Fronte est	Fronte sud-ovest	Fronte nord
Orientazione	360 N	270 N	45 N	180 N
RMR	65	46	53	
RMR_{mod}	40	41	48	
GSI	60	41	48	
PHI (°)				
1	37,5	28	31,5	
2	41	31	35	
3	35	35,2	37	
valore di progetto	37	31	35	
Coesione (KPa)	325	230	265	
Em (GPa)	30	10	13	

1 calcolato applicando la relazione di Bieniawski, $\phi=0.5 \text{ RMR}+5$

2 valore medio del campo di variabilità calcolato con la relazione di Trunk e Monisch, 1990

3 calcolato basandosi sul RMR modificato Sen e Sadagah, 2003

3.4 Stima del coefficiente di rugosità (JRC Joint Roughness Coefficient, Barton, 1973) e della resistenza al taglio

Sono stati condotti rilievi di scabrezza in sito con profilometro, ad essi è stato assegnato un valore di JRC in base alle indicazioni standardizzate da Barton & Choubey, 1977. I valori risultanti sono compresi tra JRC=7-17 con una distribuzione bimodale con classi più ricorrenti JRC=7 e 14. Il valore più basso verrà cautelativamente considerato per la stima della resistenza al taglio.

Applicando l'equazione del criterio di Barton e Choubey

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (\text{Barton e Choubey, 1977})$$

con un carico massimo di 0,3 Mpa, prevedibile per un gradone di 10 m, un JCS=40 Mpa, come valore cautelativo delle superfici alterate, ed un angolo di attrito di base di 40° (Barton ,1974) si ottiene un **phimin** = 55°.

Parametrizzazione basata sul Geological Strength Index

La definizione del GSI permette la modellazione dell'ammasso roccioso in base alle caratteristiche geologiche ricavando, mediante l'applicazione del criterio di Hoek-Brown ed a quello di Mohr-Coulmb,i parametri di resistenza al taglio.

In letteratura (Marinos e Hoek, 2000), per rocce ultrabasiche sono indicati valori del GSI inclusi nel campo di variabilità GSI=40-85. La classificazione dell'ammasso roccioso è stata realizzata applicando il software RockLab 1 (*Rockscience Inc.*) per la applicazione del criterio di rottura di Hoek-Brown (2002); nel caso in esame sono state operate cautelativamente le seguenti scelte:

- Classe cautelativa di resistenza sgci=75 MPa
- GSI=55 selezionado le condizioni superficiali “fair” e una struttura “blocky”
- mi= 25 per il basalto
- D=1.0 applicando un fattore di disturbo tipico per le scarpate di grandi cave a fossa indotto dall'uso di esplosivi
- Failure envelope range per fronti di scavo con h=80 m e peso di volume = 2.9 MN/mc

Formulazione del Criterio di Hoek-Brown.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

where σ_1' and σ_3' are the major and minor effective principal stresses at failure
 σ_{ci} is the uniaxial compressive strength of the intact rock material and
 m and s are material constants, where $s = 1$ for intact rock.

Risultati

PARAMETRI GEOMECCANICI

Hoek Brown Classification

sigci	75	MPa
GSI	55	
mi	25	
D	1	

Hoek Brown Criterion

mb	1.0046
s	0.000553084
a	0.504048

Failure Envelope Range

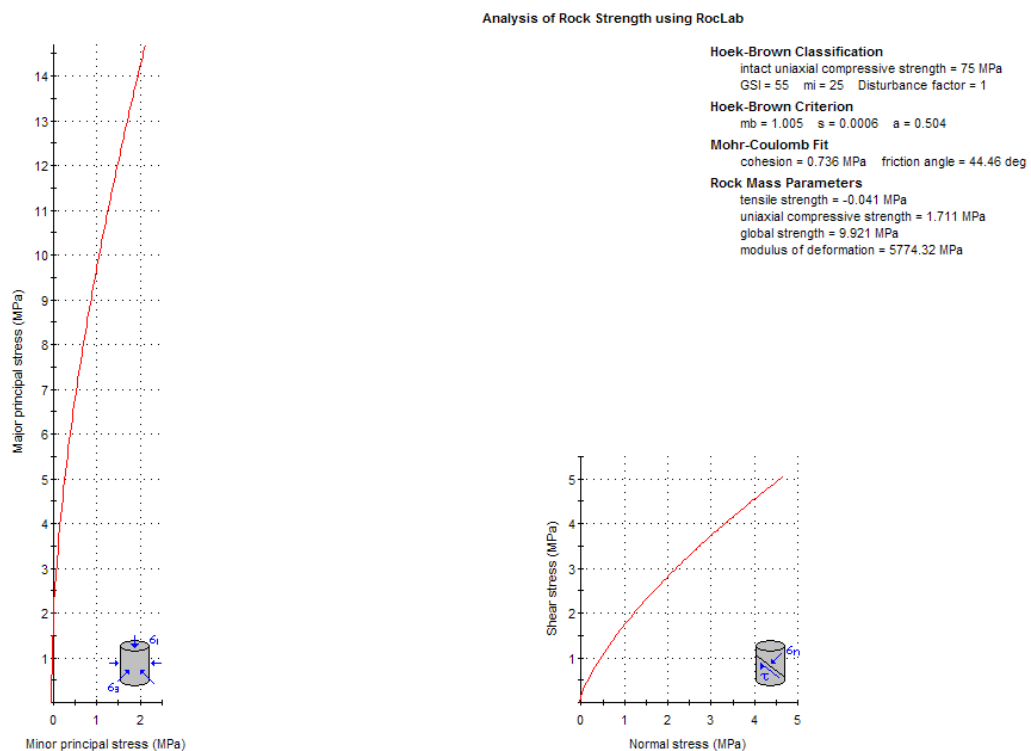
Application	Slopes
sig3max	2.11916 MPa
Unit Weight	0.029 MN/m3
Slope Height	90 m

Mohr-Coulomb Fit

c	0.735761 MPa
phi	44.4557 degrees

Rock Mass Parameters

sigt	-0.0412914	MPa
sigc	1.71108	MPa
sigcm	9.92077	MPa
Em	5774.32	MPa



3.5 Commento ai risultati

- La tabella che segue mette a confronto i parametri geomeccanici ricavati dall'applicazione degli indici e dei criteri descritti in precedenza. Il confronto permette una serie di interpretazioni per la corretta modellazione geomeccanica dell'ammasso, oltre a consentire la scelta dei parametri ottimali in termini di cautela.
- In generale si nota come il valore di angolo di attrito superiore sia associato al criterio di Barton, che stima la resistenza lungo le discontinuità e tiene conto della rugosità e della modesta alterazione dei giunti. I valori medi dati dall'applicazione del criterio di Hoek-Brown rappresentano probabilmente quelli più rappresentativi delle condizioni medie dell'ammasso roccioso.

- Nella scelta dei parametri di resistenza al taglio, per condurre le verifiche numeriche di stabilità sono stati differenziati i valori applicati sui diversi fronti, in particolare riguardo all'angolo di attrito interno che risulta sensibilmente diverso in base ai rilievi effettuati su fronti distinti. Le condizioni di resistenza al taglio sono infatti peggiori in corrispondenza del fronte est dove vi sono anche condizioni idrauliche delle discontinuità conseguenti alla presenza di ricorrenti filtrazioni idriche.

TABELLA COMPARATIVA PARAMETRI GEOMECCANICI		
CRITERIO APPLICATO	ϕ min	C KPa
RMR 89	31-37	325
Barton, 74	55	
Hoek-Brown (Rocklab)	44,5	735

Nella tabella seguente sono stati scelti dei parametri cautelativi di riferimento per le verifiche numeriche di stabilità.

PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO	
ϕ (°)	
Fronte sud	37
Fronte est e nord	31
Fronte sud-est	35
Gamma (KN/mc)	29
coesione KPa	230

4. SINTESI DEI RISULTATI DELLE VERIFICHE DI STABILITA'

Dalle indagini condotte l'ammasso roccioso risulta essere dotato di una resistenza medio elevata con associato un medio grado di fratturazione al quale è attribuibile una classe II (ammasso buono) di qualità (Bieniawski, 1989); la qualità decade in parte applicando la correzione in funzione

della stabilità dei versanti. Sono infatti presenti geometrie di instabilità dei fronti riconducibili a cunei e scivolamenti lungo superfici planari.

Fronte Sud

Le verifiche cinematiche (cfr. APPENDICE 1) indicano una instabilità dei fronti con le attuali geometrie, determinate da una esposizione generale verso nord ed una inclinazione di circa 80° del fronte. Le verifiche numeriche (cfr. APPENDICE 2) in condizioni drenate indicano delle condizioni di stabilità dei gradoni del fronte sud non particolarmente critiche in termini drenati. Introducendo un carico idraulico all'interno delle discontinuità i coefficienti di sicurezza si riducono assumendo valori di poco superiori all'unità. L'elevata inclinazione delle superfici di potenziale scivolamento fa sì che una modificazione dell'inclinazione dei fronti, anche minima, introduca delle generali condizioni migliorative della stabilità stessa. Per escludere le instabilità statisticamente più ricorrenti sul fronte sud si dovrebbero mantenere sia il fronte generale che i singoli fronti dei gradoni con pendenze non superiori ai 70°-65°.

Gli elementi di progetto attuabili al fine del miglioramento delle condizioni di stabilità sono sintetizzabili quindi in modellazioni morfologiche che mantengano gli attuali fronti dei gradoni con altezze di circa 10 m e con pendenze meno accentuate. Inoltre un attacco del fronte sud da est verso ovest anziché direttamente da sud riduce l'esposizione in fase di scavo alle instabilità potenziali presenti sul fronte sud stesso.

L'accurata regimazione deve garantire una efficiente evacuazione delle acque superficiali evitando le infiltrazioni che saturano le discontinuità stesse riducendone la resistenza .

Le condizioni dello stato fratturativo dell'ammasso sono caratterizzate da una generale buona qualità; in alcuni settori permangono blocchi instabili in genere di non grandi dimensioni che richiedono comunque un periodico controllo.

Fronte Est

Le condizioni di stabilità relative ai gradoni del fronte est (cfr. APPENDICI) devono essere particolarmente curate per una serie di ragioni ed in particolare per il fatto che qui l'ammasso presenta i parametri di resistenza più bassi, che è il fronte più esteso della cava, che è percorso dalle piste di accesso e perché è sede di filtrazioni idriche che ne diminuiscono la stabilità.

Per quanto riguarda i risultati delle verifiche condotte sono state riscontrate delle condizioni di stabilità buone per i singoli gradoni in condizioni drenate.

Le instabilità più critiche sono riconducibili a franamenti per scivolamenti planari e secondariamente a scivolamenti di cunei.

Con parziale saturazione all'interno delle discontinuità si manifesta una netta diminuzione delle condizioni di stabilità con coefficienti di sicurezza prossimi all'equilibrio. La saturazione totale implica nella maggior parte dei casi condizioni di marcata instabilità. Si tenga quindi presente che la stabilità si ridurrà in presenza di consistenti precipitazioni, in presenza di un incremento della portata e del livello idrometrico del Fiume Bruna e quindi della filtrazione idrica dal subalveo all'interno dell'ammasso roccioso. Per tale motivo si propongono i seguenti possibili interventi migliorativi.

- E' necessaria la periodica ispezione dei fronti e dei gradoni per verificare la presenza di parti di roccia instabili da assoggettare a disgaggio e la verifica della sussistenza di incrementi delle filtrazioni idriche dalle fratture.
- Su questo fronte si può operare la scelta di limitare l'angolo di inclinazione generale del fronte di avanzamento e di creare un corridoio da ovest verso est (zona sud del fronte est) e da questo avanzare da sud verso nord. Tale avanzamento risulta dai dati geostrutturali ad oggi disponibili come a minor rischio di instabilità rispetto a quello da ovest verso est. L'avanzamento ottimale del corridoio può essere realizzato mantenendo un'inclinazione

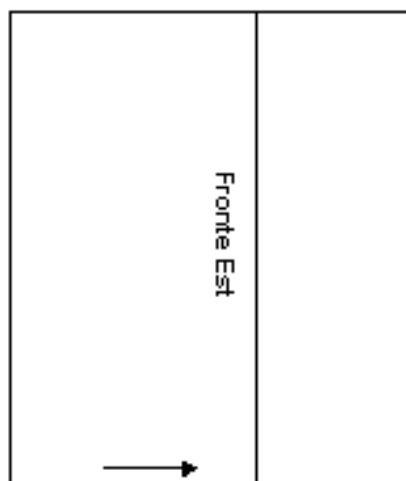
generale del fronte est non superiore ai 55°-60° e successivamente avanzando partendo dal corridoio scavato, per splateamenti successivi da sud verso nord mantenendo il fronte orientato verso sud.

Tali considerazioni valgono in via preliminare anche per la progettazione del fronte finale est che dovrà avere inclinazione non superiore ai 55°-60°. Tale angolo consente, secondo i dati oggi disponibili, di eliminare le più ricorrenti instabilità. L'assetto finale è ovviamente raggiungibile con varie geometrie di avanzamento con gradonature e splateamenti di varia entità.

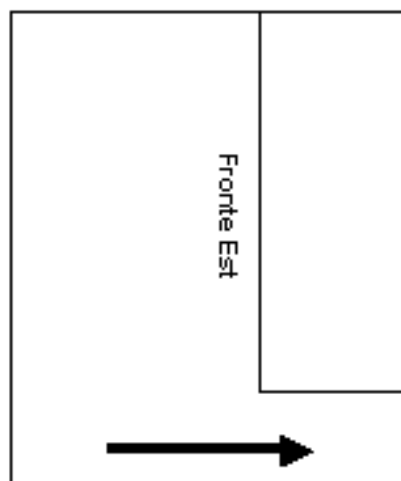
Data la difficoltà ad estrapolare i dati di rilievo su cui si basano le verifiche, sarà necessario aggiornarli con rilievi e verifiche di stabilità future. Qualora le condizioni di fratturazione e stabilità dell'ammasso emerse dai futuri rilievi più vicini al fronte finale, risultino diverse dalle descritte, la progettazione dovrà essere conseguentemente aggiornata.

- o Considerato il netto decremento della stabilità in funzione dell'incremento delle pressioni neutre ed essendo presenti ricorrenti filtrazioni idriche e stillicidi lungo i gradoni, è necessario realizzare interventi di intercettazione e drenaggio delle acque sotterranee in modo da impedire l'innescarsi di filtrazioni e pressioni interstiziali destabilizzanti.
- o Tra gli interventi possibili da valutare vi possono essere la temporanea impermeabilizzazione del tratto d'alveo adiacente alla cava del Fiume Bruna, la costruzione di pozzi tipo *well point* per l'abbassamento della falda e/o di dreni suborizzontali progettati per consentire l'ottimale effetto drenante ai fini della stabilità a breve/medio termine.

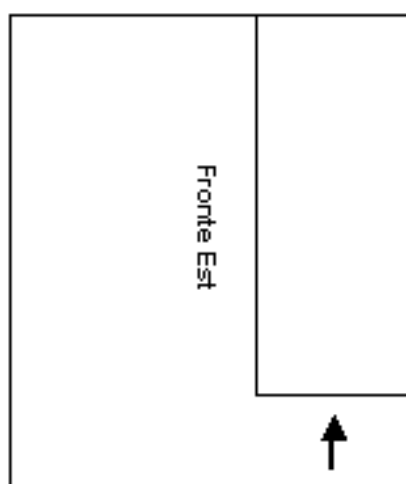
Schema del possibile avanzamento del fronte est



A



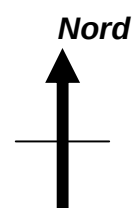
B



C



D



Fronte Nord

Il fronte nord è attualmente il fronte di dimensioni più ridotte e presenta delle instabilità di geometria cuneiformi. I valori del coefficiente di sicurezza sono superiori all'equilibrio in condizioni drenate dimostrando delle generali condizioni di stabilità in assenza di filtrazioni idriche. I valori decadono in condizioni di coesione minima e di saturazione delle discontinuità.

Anche su questo fronte oltre ai periodici controlli e disaggi di parti di ammasso in condizioni critiche si deve realizzare un'accurata ed efficiente regimazione delle acque impedendone l'infiltrazione in profondità.

Fronte Sud-Ovest

Si hanno delle generali condizioni di stabilità dei fronti in condizioni drenate. Le instabilità più ricorrenti sono a geometria cuneiforme e planare. Alcune di esse mostrano di essere stabili anche in condizioni particolarmente critiche con valori bassi di coesione e parziale saturazione. In altri casi si ha un netto decadimento dei coefficienti di sicurezza in presenza di saturazione idrica. Come nei casi precedenti anche su questo fronte oltre ai periodici controlli e disaggi di parti di ammasso in condizioni critiche si deve progettare un'accurata ed efficiente regimazione delle acque impedendone l'infiltrazione in profondità e che si inneschino movimenti di scivolamento per l'insorgere di pressioni interstiziali.

Per escludere le instabilità statisticamente più ricorrenti sul fronte sud-ovest si dovrebbero mantenere sia il fronte generale che i singoli fronti dei gradoni con pendenze non superiori ai 70°-65°.

Le azioni di progetto attuabili al fine del miglioramento delle condizioni di stabilità rispetto allo stato attuale sono sintetizzabili quindi in modellazioni morfologiche che mantengano i fronti con altezze di circa 10 m e con pendenze meno accentuate.

Bibliografia

1. AA.VV., Landslides - investigation and mitigation, T.R.B. Special report 247.
2. Barla G., Barla M., Continuo e discontinuo nella modellazione numerica di gallerie, Gallerie n.61, Patron Bologna.
3. Carta Geologica d'Italia, Foglio 306 Massa Marittima, 1:50.000.
4. Clerici A., Griffini L. & Pozzi R., (1990), Procedure for the execution of detailed geomechanical surveys on rock masses of rigid behavior, Proc.Int. Conf.on Mech. Of jointed and faulted rocks, Vienna.
5. Giani G.P., (1988), Analisi di stabilità dei pendii: pendii naturali e fronti di scavo in roccia, Ass. Min. Sub. Quaderni n.8.
6. Goodman,R.E., (1980),Introduction to Rock Mechanics.
7. Hoek E., Kaiser P.K. & Bawden W.F., (1995), Support of underground excavation in hard rock, Balkema.
8. Hoek E. & Bray J., (1981), Rock slope engineering.
9. I.S.R.M., 1978, Suggested methods for quantitative description of discontinuity in rock masses, Int. J. Rock Mech. Mining Scie. & geomech., 15.
10. ISRM (1978), Suggested methods for the quantitative description of rock masses and discontinuity,int. J. Rock Mech. Min. Sci. & geomech., vol,15.
11. Markland J.T., (1972), A useful technique for estimating the stability of rock slopes , Imperial college Rock mechanics research report, 19.
12. Marinos P., Hoek E., (2000), GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation, Proceeding of GeoEng 2000 Conference, Melbourne, Australia.
13. Pinzari M., (2006), Tipologie e metodi di coltivazione delle cave, Quarry & Construction, aprile 2006.
14. Romana M., (1991), SMR classification- Intern. Sympos. Of rock mechan., Aachen.
15. Williamson D.A. & Khun R.,(1988),The unified rock classification system, ASTM.