

## Analisi agli elementi distinti di un fronte di cava in calcare fessurato

Piernicola Lollino<sup>1</sup>, Alessandro Reina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNR-IRPI

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Bari

### *Distinct element analysis of a jointed limestone quarry face*

**ABSTRACT:** The paper describes the stability analysis of a quarry front in fissured limestone in the area of Cassano Murge (BA, Southern Italy), which has been carried out by means of a detailed geo-structural analysis, a geomechanical characterization of the involved materials and a numerical study with the Distinct Element Method. The quarry front investigated is the final one, i.e. at the end of the excavation activity, and is 225 m wide and 15 m high. A preliminary detailed geo-structural analysis has been performed to define the main structural features of the rock mass, which is characterised by three main sets of joints. Persistent faults have been detected within the mass. Laboratory tests have been carried out on limestone samples taken from the front area to determine the physical and mechanical properties of the materials, whereas field measurements have been performed on exposed joints to evaluate the mean values of the joint mechanical properties by means of the empirical relationships available in the literature. The numerical analyses, which have been carried out by means of UDEC 3.0 code, have highlighted the influence of the fault as a predisposing factor against the occurrence of rock wedge sliding. Coupled seepage analyses through the existing discontinuity net enabled to identify the saturation process of the joint net due to significant rainfall events as the main factor which produces instability of the quarry front. Sensitivity analyses assuming different heights of the piezometric surface at the boundary sides of the model have been carried out to verify the stability of the quarry front once the steady state seepage condition was reached. The results show that only a condition of full saturation of the joint net of the rock mass is capable of producing unstable conditions of the rock mass.

*Key terms:* DEM analysis, abandoned quarry, limestone, seepage

*Termini chiave:* analisi DEM, cava abbandonata, calcare, filtrazione

### **Riassunto**

La nota descrive uno studio di stabilità di un fronte di cava in calcare fessurato in territorio di Cassano Murge (BA) svolto mediante analisi geo-strutturale dettagliata, caratterizzazione geomeccanica dei materiali coinvolti e analisi numerica mediante il metodo degli elementi distinti. Il fronte di cava indagato è relativo a quello finale dopo l'abbandono delle attività di estrazione del calcare e si estende per una lunghezza di circa 225m, con un'altezza massima di circa 15m. Uno studio geo-strutturale dettagliato è stato svolto in fase preliminare per definire le caratteristiche strutturali principali dell'ammasso, il quale risulta caratterizzato da tre famiglie principali di discontinuità. È stata rilevata la presenza di faglie di estese dimensioni, con giacitura a franapoggio rispetto al fronte della cava. Prove di laboratorio sono state condotte su campioni di calcari per determinare le proprietà fisiche e meccaniche delle rocce, mentre prove in sito sono state effettuate sui giunti con pareti a vista per valutare le proprietà meccaniche delle discontinuità. Le analisi numeriche, svolte con l'ausilio del codice di calcolo UDEC3.0, hanno posto in evidenza l'influenza della giacitura delle faglie come uno dei fattori predisponenti

rispetto alla possibilità di scivolamenti di cunei di roccia. Analisi di filtrazione accoppiata attraverso la rete di discontinuità esistente hanno consentito di identificare nel processo di saturazione della stessa rete di giunti a seguito di eventi pluviometrici rilevanti quale fattore principale di instabilità del fronte di cava. Sono state condotte analisi parametriche ponendo la superficie piezometrica lungo il contorno di monte a varie altezze e verificando la stabilità del fronte a seguito del raggiungimento di una condizione di filtrazione stazionaria. I risultati mostrano come solo una condizione di saturazione della rete di discontinuità sia in grado di creare condizioni di instabilità per l'ammasso.

### **1. Introduzione**

La cava oggetto di studio è ubicata a sud dell'abitato di Cassano Murge (BA) ed è posta lungo il versante esposto a est della collina di Villa D'Ambrosio. La posizione della cava è in sponda sinistra dell'impluvio principale che divide la collina del Convento da quella della zona di S.Lucia.

La cava è dismessa e non recuperata all'ambiente, del tipo a mezza costa sviluppa un fronte di circa 225 metri lineari (Figura 1). Tale fronte sottende un bacino idrografico

di area pari a circa un ettaro. Il fronte della cava si trova ad una quota pressoché costante di circa 400m slm. La quota

più alta del bacino è posta a circa 435 m slm. La pendenza del versante è di circa 0,1 %.



Figura 1 – Vista panoramica della cava  
*Panoramic view of the quarry*

Il giacimento minerario è rappresentato da calcari stratificati e in banchi, molto fratturati e a luoghi carsificati, riferibili alla parte di età santoniana della formazione del “Calcarea di Altamura”. Il giacimento veniva utilizzato per l'estrazione di materiale inerte per l'edilizia (pietrisco).

La stabilità del fronte di una cava in roccia fessurata è, in generale, funzione di vari fattori quali le condizioni geometriche e strutturali dell'ammasso roccioso, le proprietà meccaniche della roccia e quelle delle discontinuità e le condizioni idrauliche dell'ammasso stesso. A causa dell'interazione tra questi fattori, ma soprattutto della notevole complessità geologico-strutturale che caratterizza gli ammassi rocciosi mediamente o fortemente fessurati, una analisi di stabilità delle pareti degli ammassi rocciosi svolta con i metodi convenzionali dell'equilibrio limite risulta spesso inadeguata, poiché non è rappresentativa delle reali condizioni dell'ammasso. In tali casi, i metodi di analisi numerica, quale ad esempio il Metodo degli Elementi Distinti (DEM, Cundall 1978), che sono invece in grado di tenere in conto delle condizioni geologiche e strutturali e delle varie proprietà meccaniche dei materiali, offrono strumenti di indagine decisamente più appropriati al problema specifico. Infatti, il grande vantaggio offerto da questi metodi di analisi, che è costituito dal fatto che il meccanismo di instabilità del fronte dell'ammasso roccioso è un risultato dell'indagine e non è imposto “a priori” come nel caso dei metodi all'equilibrio limite, consente di investigare meccanismi di rottura anche complessi, che talvolta non sono rilevabili da semplici indagini in sito. Il metodo degli elementi distinti, proprio perché è in grado di analizzare il comportamento di sistemi discontinui, si presta bene per studi di problemi di meccanica delle rocce, e nello specifico di stabilità di fronti in roccia, ed è infatti quello più largamente utilizzato. In

particolare, nel caso specifico della cava di Cassano Murge (BA) una analisi bidimensionale DEM è stata condotta con l'ausilio del codice UDEC 4.0 (Universal Distinct Element Method) (Itasca 2004) per valutare il comportamento tensionale e deformativo, e quindi le condizioni di stabilità, del fronte finale della cava, già interessato nel recente passato da processi di instabilità. Le analisi sono state volte a comprendere quali siano i processi che possono mettere a rischio nel tempo la stabilità del fronte della cava per offrire uno strumento di supporto nelle scelte progettuali di sistemazione finale della cava.

L'affidabilità delle previsioni svolte con l'ausilio di un simile modello di calcolo dipende dalla approssimazione che si opera in fase di schematizzazione geologico-strutturale del problema e dalle ipotesi circa il comportamento meccanico degli elementi costituenti l'ammasso. Una siffatta modellazione consente quindi di simulare il comportamento meccanico di un mezzo discontinuo come interazione dei volumi elementari, o blocchi, che lo compongono. Ciascun blocco, dotato di proprie caratteristiche di resistenza e deformabilità, interagisce con gli elementi circostanti attraverso le discontinuità, alle quali sono assegnate precise relazioni forze-spostamenti di tipo lineare o non-lineare, sia in direzione normale che in quella tangenziale alla discontinuità stessa. La procedura di calcolo è basata sulla risoluzione delle equazioni della dinamica applicate a ciascun blocco, le quali, a partire dalle forze squilibrate eventualmente esistenti nel sistema, sulla base di determinate procedure di integrazione rispetto al tempo, consentono di valutare velocità e spostamenti dei vari blocchi. Lo stesso sistema, pertanto, può evolvere sino a raggiungere configurazioni di equilibrio statico o dinamico, che rispettivamente indicano il raggiungimento di

condizioni di stabilità o instabilità. La eventuale deformabilità interna dei blocchi è consentita mediante un processo di discretizzazione del blocco in sub-zone triangolari, che sono considerate a loro volta indeformabili. Il comportamento sforzi-deformazioni del singolo blocco roccioso o di una discontinuità è simulato scegliendo uno tra i vari modelli costitutivi possibili disponibili nel codice per i blocchi deformabili o per le discontinuità. Una simile analisi consente, quindi, di simulare spostamenti, deformazioni e stati tensionali del dominio studiato corrispondenti a precise fasi di un processo fisico reale. Queste ultime sono simulate mediante opportune variazioni delle condizioni al contorno o mediante applicazione di carichi esterni al sistema.

## 2. Ipotesi alla base delle analisi

La Figura 3 mostra la maglia adottata nelle analisi UDEC svolte per il problema specifico qui in esame e rappresenta una sezione tipo perpendicolare al fronte di cava. La geometria del fronte e le caratteristiche strutturali dell'ammasso sono state derivate da rilievi di dettaglio operati in sito. In particolare, nel modello sono stati riprodotti due sets principali di discontinuità, quello sub-parallelo al fronte della cava e quello costituito dai giunti di stratificazione sub-orizzontali con giacitura a franapoggio (Figura 2). Inoltre, è stata altresì introdotta nel modello una direttrice di faglia diretta (N-S), ad inclinazione anch'essa a franapoggio (85°), ubicata a pochi metri dal ciglio del fronte.



Figura 2 – Strati a franapoggio visibili sui fronti della cava  
*Layers visible on the quarry front*

La Figura 4 riporta invece un dettaglio dello schema nell'area del fronte. Il comportamento del calcare, che è la roccia del quale è costituito l'ammasso studiato, è stato ipotizzato secondo un modello elastico-perfettamente plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Le caratteristiche meccaniche del calcare sono state derivate

dalla letteratura disponibile ed i seguenti parametri sono stati adottati nelle analisi:

$\gamma = 2600 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ ;  $E = 5000 \text{ (MPa)}$ ;  $\nu = 0.3$ ;  $c' = 3 \text{ (MPa)}$ ;  
 $\varphi' = 30^\circ$ ;  $R_t = 4 \text{ (MPa)}$

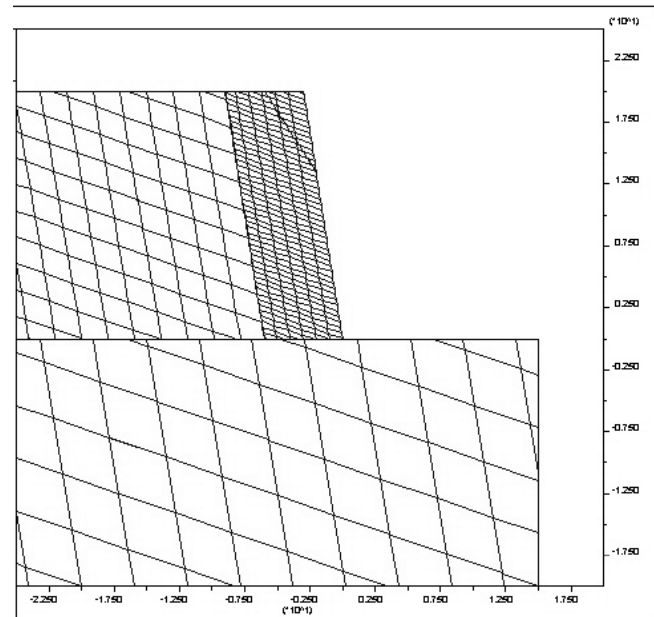


Figura 3. Maglia adottata per le analisi UDEC  
*Grid adopted for UDEC analyses*

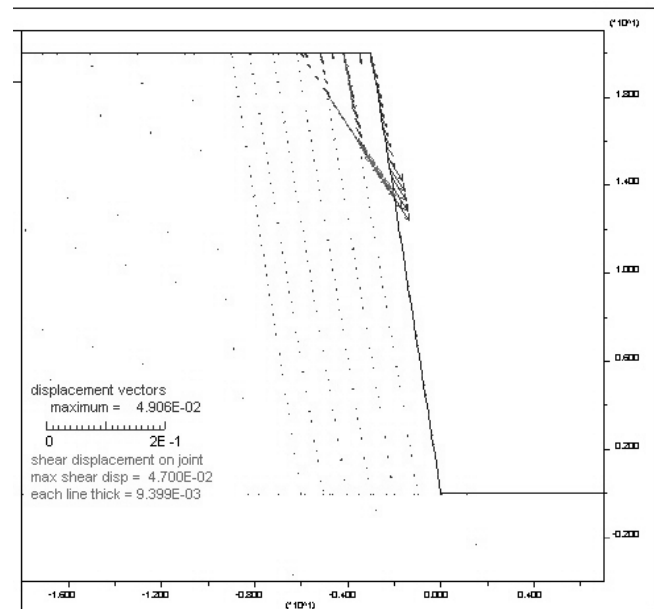


Figura 4. Particolare della maglia con ubicazione dei tre punti di monitoraggio scelti  
*Detail of the grid and location of three monitoring points*

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche delle discontinuità, si è ipotizzato che le discontinuità seguano un comportamento a molle, definite da rigidità normali,  $JK_n$ ,

e tangenziali,  $JK_s$ , con una resistenza ultima definita secondo un criterio alla Mohr-Coulomb. Prove in situ su superfici esposte dei giunti sono state condotte seguendo le indicazioni ISRM (International Society Rock Mechanics 1978) per valutare i valori di scabrezza (JRC) mediante prove con il profilometro di Barton e di resistenza a compressione delle pareti delle discontinuità (JCS) mediante prove con sclerometro di Schmidt. Pertanto, i valori di rigidità normale e di rigidità tangenziale delle discontinuità sono stati definiti a partire dai valori di JRC e di JCS mediante le relazioni empiriche fornite da Bandis et al. (1983) e da Barton & Choubey (1977) e sono di seguito riportati:

$JK_n$  = rigidità in direzione normale dei giunti = 20 (GPa/m)

$JK_s$  = rigidità in direzione tangenziale dei giunti = 2 (GPa/m)

$J\phi$  = angolo di attrito dei giunti (da dati di letteratura) =  $30^\circ$

Per le analisi di filtrazione si è ipotizzato un fattore di permeabilità media dei giunti del calcare pari a  $100 \text{ Pa}^{-1}\text{s}^{-1}$ , in accordo con la legge cubica che è largamente considerata adatta ad esprimere il comportamento idraulico del singolo giunto.

Tutti i blocchi che costituiscono lo schema di calcolo sono stati considerati internamente deformabili mediante una ulteriore suddivisione interna dei blocchi secondo sub-triangoli. Tuttavia, data la scarsa deformabilità del calcare, si è assegnata una dimensione dei sub-triangoli molto elevata.

Nello schema di calcolo, carrelli che permettono scorrimenti verticali sono stati ipotizzati lungo i bordi verticali laterali del modello, mentre cerniere fisse che impediscono spostamenti verticali e spostamenti orizzontali sono state ipotizzate alla base dello schema.

Per analizzare le condizioni di stabilità del fronte di cava, sono stati esaminati gli spostamenti di alcuni punti di monitoraggio ubicati lungo il fronte stesso in relazione ai cicli di calcolo. In particolare, sono state monitorate le componenti orizzontali di spostamento di tre punti (punti 1, 2 e 3 in Figura 4).

Le analisi sono state finalizzate a valutare le condizioni di stabilità del fronte della cava in due ipotesi: 1) in assenza di acqua nelle discontinuità dell'ammasso e 2) in presenza di una certa distribuzione delle pressioni idrauliche conseguente a processi di filtrazione stazionaria di acqua nelle stesse discontinuità indotti da eventi pluviometrici intensi e prolungati che possono determinare provvisoriamente la saturazione completa o parziale della rete di giunti presente nell'ammasso. Il processo di filtrazione è stato simulato imponendo una differenza di carico idraulico tra l'area di monte e quella di valle rispetto al fronte della cava, nelle quali si ipotizza una distribuzione delle pressioni idrauliche al contorno di tipo idrostatica. Pertanto, nelle analisi sono state simulate tre fasi di calcolo: una prima fase per il raggiungimento dell'equilibrio sotto l'azione della forza di gravità in condizioni puramente

elastiche; una seconda fase nella quale sono state introdotte le leggi di comportamento di tipo elasto-plastiche per la roccia, più rispondenti alle caratteristiche reali del materiale, ed una terza fase di calcolo (solo per le analisi che considerano l'effetto dell'acqua nell'ammasso) di sola filtrazione idraulica in condizioni stazionarie a cui è stata fatta seguire una analisi puramente meccanica per valutare le condizioni di stabilità del fronte conseguenti alle pressioni idrauliche sviluppate al termine del processo di filtrazione. Pertanto, le analisi per il calcolo della stabilità a seguito dei processi di filtrazione sono state condotte in condizioni disaccoppiate tra il calcolo idraulico e quello meccanico.

### 3. Risultati

#### 3.1 Analisi di stabilità del fronte di cava con giunti privi di acqua

Nella prima analisi è stata ipotizzata totale assenza di acqua nei giunti dell'ammasso al fine di verificare le condizioni di stabilità del fronte per effetto delle sole condizioni geostrukturali. In particolare, oltre ai due sistemi di discontinuità principali si è ipotizzata una sola faglia a franapoggio a pochi metri di distanza dal ciglio del fronte. La Figura 5 mostra i vettori di spostamento calcolati nella analisi e le discontinuità soggette a scorrimento dei due lembi. Dalla figura si osserva che il fronte nel complesso è stabile e che solo il complesso di blocchi rocciosi delimitati dalla faglia è suscettibile di instabilità, con scivolamento proprio lungo la faglia.

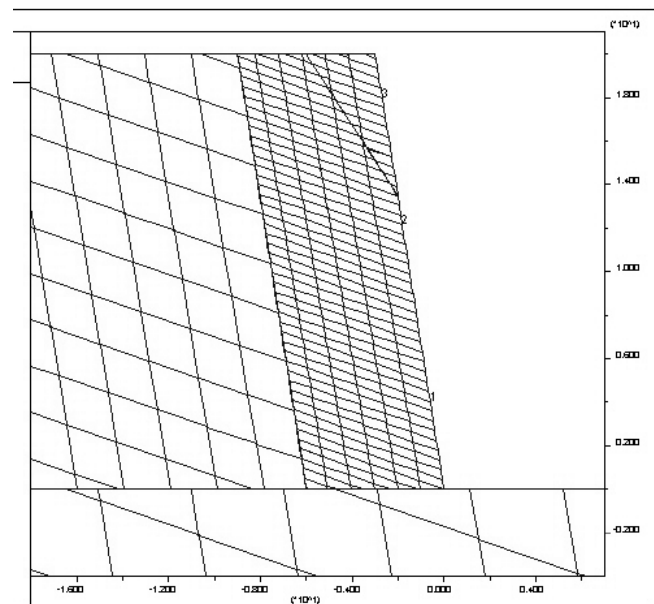


Figura 5. Vettori di spostamento e scorrimenti lungo giunti in assenza di acqua nelle discontinuità

*Displacement vectors and joint slippings assuming dry joints*

I diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti

di monitoraggio lungo il fronte in funzione dei cicli di calcolo, riportati in Figura 6, confermano quanto osservato in Figura 5; solo per il punto 3, infatti, lo spostamento orizzontale aumenta indefinitamente con i cicli di calcolo senza raggiungere un valore costante che attesterebbe invece la stabilità del blocco cui il punto appartiene. Nessun indizio di instabilità invece emerge per le porzioni sottostanti del fronte (punti 1 e 2). Quindi, una simile configurazione del fronte di cava suggerisce problemi di instabilità locale del fronte. L'influenza della presenza della faglia è altresì messo in evidenza in una analisi identica alla precedente nella quale è stata eliminata la stessa faglia.

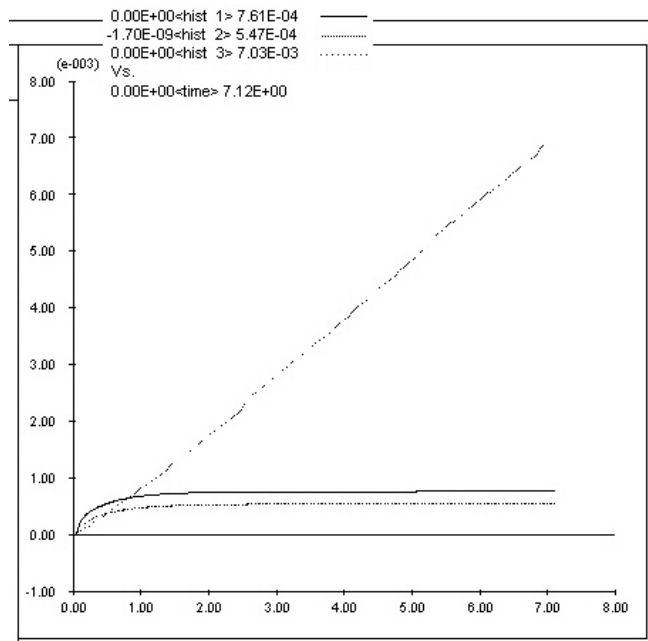


Figura 6. Diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio al variare dei cicli di calcolo in condizioni di assenza d'acqua nelle discontinuità  
*Horizontal displacements against timesteps for three monitoring points assuming dry joints*

I diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio, riportati in Figura 7, indicano in questo caso il raggiungimento di un valore costante degli spostamenti (< 1mm) all'aumentare dei cicli di calcolo, che confermano le condizioni ipotizzate di stabilità in queste ipotesi. Si sono anche analizzate le condizioni di stabilità del fronte nel caso in cui vi fosse un'altra faglia parallela alla prima e posizionata ad una spaziatura di 10m circa. La Figura 8, che mostra i vettori di spostamento risultanti e gli scorrimenti lungo le discontinuità per questa analisi, suggerisce che la presenza di questa seconda faglia determinerebbe una condizione di instabilità più generale poiché coinvolgerebbe l'intero fronte, con uno scivolamento globale della porzione di ammasso sovrastante la faglia inferiore.

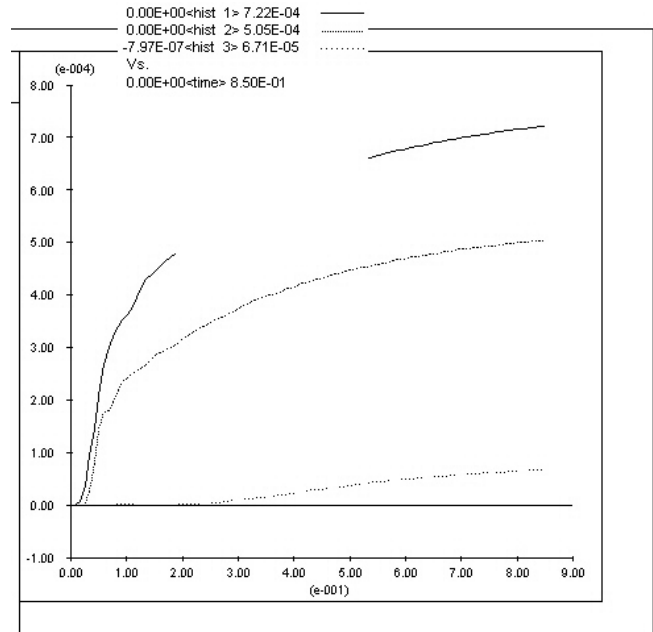


Figura 7. Diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio al variare dei cicli di calcolo in condizioni di assenza d'acqua nelle discontinuità e senza faglia  
*Horizontal displacements against timesteps for three monitoring points assuming dry joints and no fault*

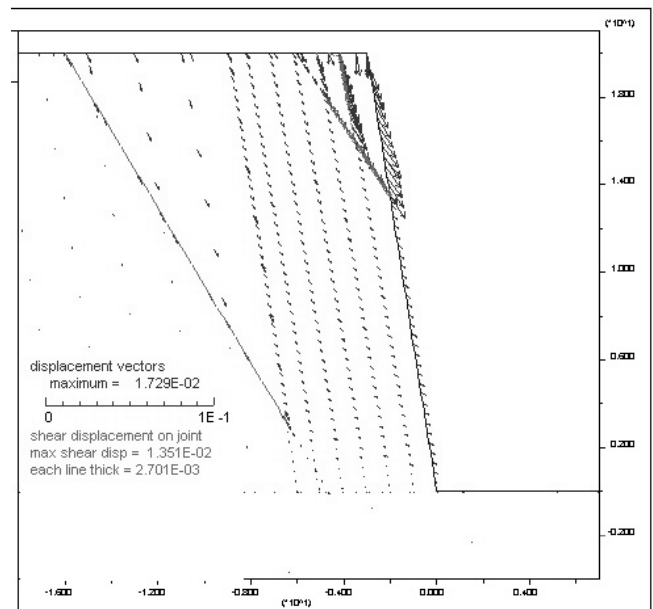


Figura 8. Vettori spostamento e scorrimenti lungo giunti in assenza d'acqua nelle discontinuità ed ipotizzando due faglie parallele ravvicinate  
*Displacement vectors and joint slidings assuming dry joints and two parallel faults*

**3.2 Analisi di stabilità del fronte di cava con giunti pieni totalmente o parzialmente di acqua**

Con riferimento alla maglia nella quale si ipotizza una

sola faglia nella parte superiore del fronte di cava, l'effetto della presenza di acqua all'interno della rete di discontinuità interna all'ammasso ai fini della stabilità del fronte è stato verificato attraverso tre analisi di sola filtrazione stazionaria seguite da analisi di tipo meccanico per la verifica delle condizioni di stabilità. Le analisi di filtrazione sono state condotte assumendo varie condizioni idrauliche in corrispondenza del contorno destro della maglia (cioè del contorno di monte rispetto al fronte di cava) e mantenendo inalterata la condizione di valle. In particolare, si è ipotizzato che a monte del fronte vi sia una distribuzione idrostatica delle pressioni idrauliche con livello d'acqua rispettivamente ad una profondità dal piano campagna di 10m, 5m e livello d'acqua in corrispondenza del piano campagna. A valle, invece, si è ipotizzato per le tre analisi sempre un livello d'acqua al piano campagna. Queste condizioni idrauliche derivano dall'assumere che per effetto di significativi eventi pluviometrici l'acqua possa percolare nell'ammasso fino a trovare un livello impermeabile ad una certa profondità che consenta accumuli di acqua a monte ed a valle secondo le distribuzioni ipotizzate. Le portate di flusso attraverso la rete di discontinuità risultate dalla prima analisi di filtrazione (livello d'acqua a 10m dal p.c. a monte) sono mostrate in Figura 9, mentre le pressioni idrauliche corrispondenti sono indicate in Figura 10.

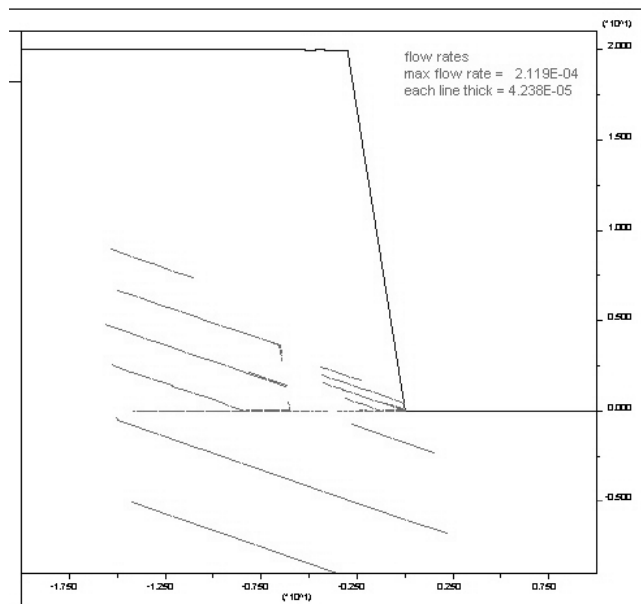


Figura 9. Portate di filtrazione nelle discontinuità nella ipotesi in cui il livello d'acqua a monte sia ad una profondità di 10m dal p.c. *Flow rates within the joint net assuming a water table upslope at a depth of 10m from the ground level*

Il calcolo meccanico per la verifica delle condizioni di stabilità del fronte conseguenti a queste condizioni di pressioni idrauliche nelle discontinuità ha indicato una situazione pressoché invariata rispetto alle condizioni di totale assenza d'acqua nell'ammasso. Infatti, in Figura 11

sono riportati i diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio in relazione ai cicli di calcolo, che mostrano incrementi di spostamento solo per il punto 3 ubicato in sommità. Condizioni di generale stabilità sono osservate per le aree corrispondenti ai due punti inferiori 1 e 2. Le stesse condizioni di stabilità sono state verificate nell'analisi in cui si ipotizza un livello d'acqua a monte a circa 5m dal piano campagna.

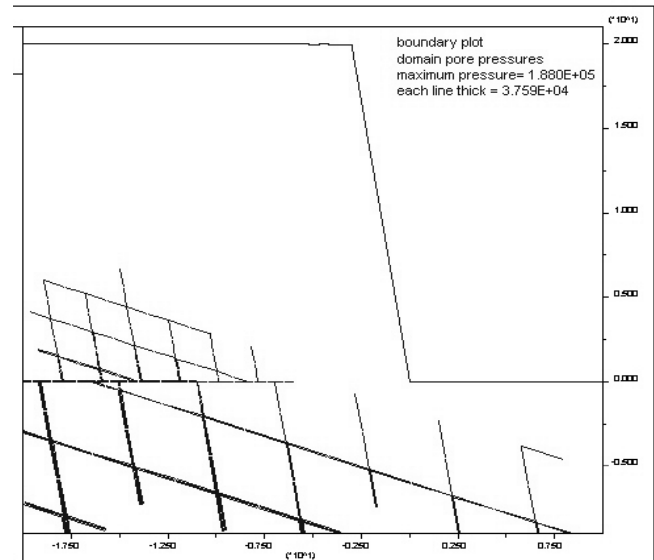


Figura 10. Pressioni idrauliche nelle discontinuità nella ipotesi in cui il livello d'acqua a monte sia ad una profondità di 10m dal p.c. *Water pressures within the joint net assuming a water table upslope at a depth of 10m from the ground level*

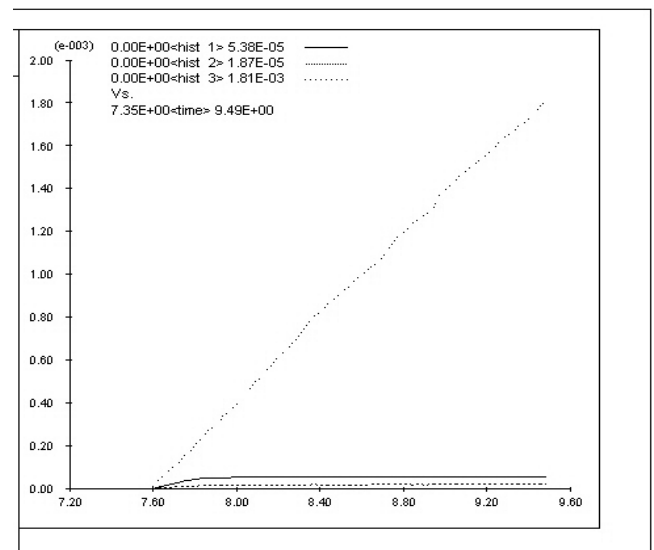


Figura 11. Diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio al variare dei cicli di calcolo nella ipotesi di livello d'acqua a monte ad una profondità di 10m dal p.c. *Horizontal displacements against timesteps for three monitoring points assuming a water table upslope at a depth of 10m from the ground level*

Nelle Figure 12, 13 e 14 sono mostrate rispettivamente le portate di filtrazione, le pressioni idrauliche ed i diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio rispetto ai cicli di calcolo per questa seconda analisi. Non si osservano variazioni rilevanti rispetto alla analisi precedente. Risultati diversi sono invece osservati nell'analisi in cui si ipotizza un livello d'acqua a monte al piano campagna.

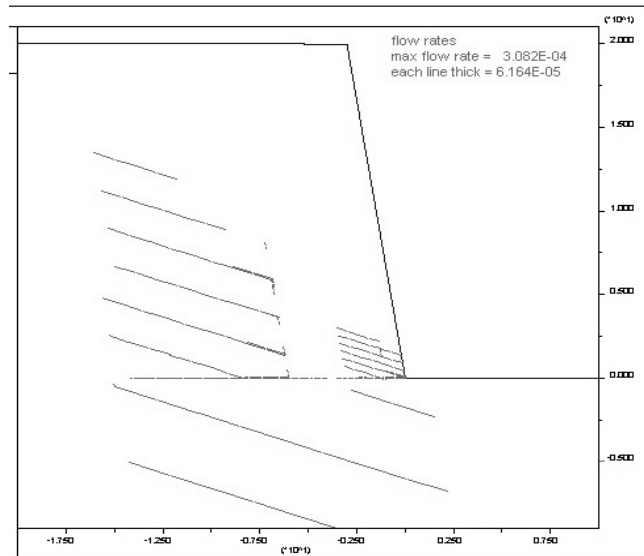


Figura 12. Portate di filtrazione nelle discontinuità nella ipotesi di livello d'acqua a monte ad una profondità di 5m dal p.c.  
*Flow rates within the joint net assuming a water table upslope at a depth of 5m from the ground level*

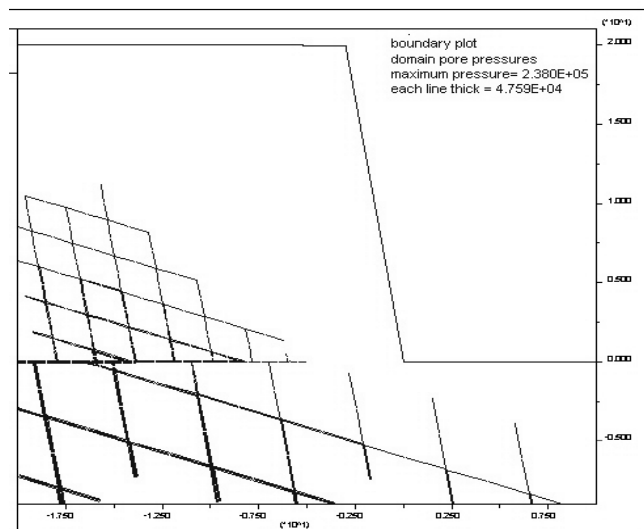


Figura 13. Pressioni idrauliche nelle discontinuità nella ipotesi di livello d'acqua a monte ad una profondità di 5m dal p.c.  
*Water pressures within the joint net assuming a water table upslope at a depth of 5m from the ground level*

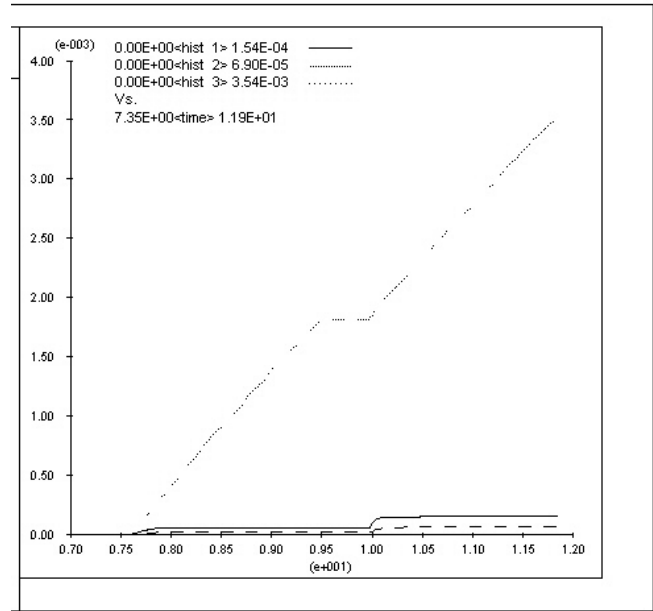


Figura 14. Diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio al variare dei cicli di calcolo nella ipotesi di livello d'acqua a monte ad una profondità di 5m dal p.c.  
*Horizontal displacements against timesteps for three monitoring points assuming a water table upslope at a depth of 5m from the ground level*

Le portate di filtrazione e le relative pressioni idrauliche sono mostrate rispettivamente nelle Figure 15 e 16.

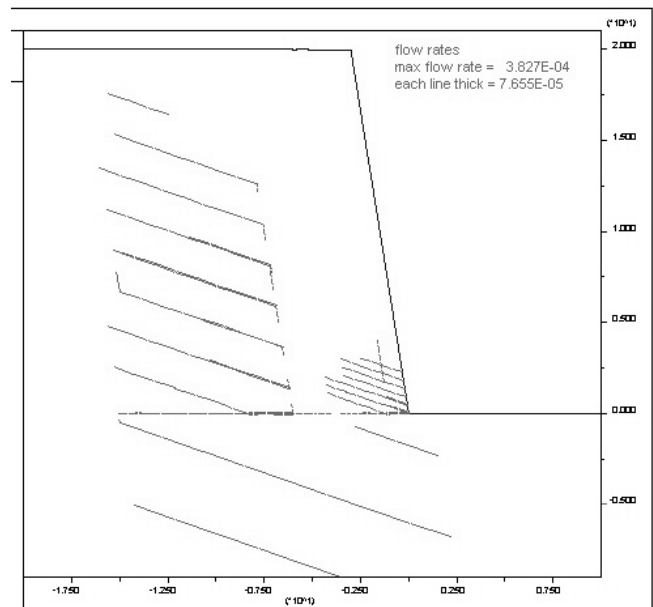


Figura 15. Portate di filtrazione nelle discontinuità nella ipotesi di livello d'acqua a monte al piano campagna  
*Flow rates within the joint net assuming a water table upslope at the ground level*

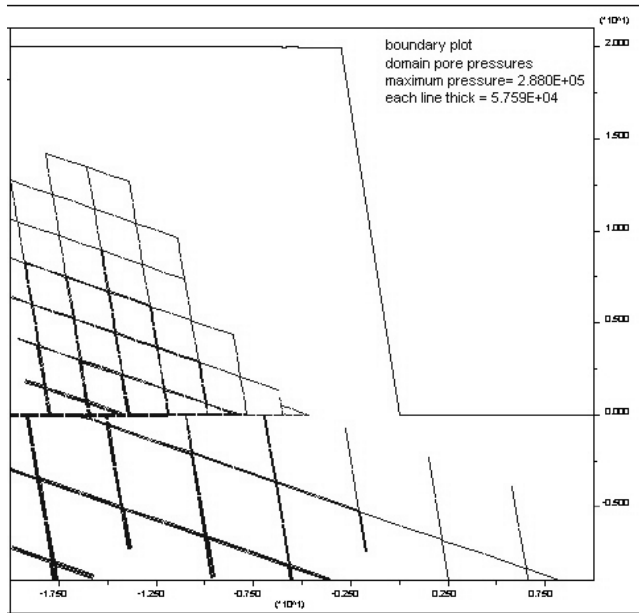


Figura 16. Pressioni idrauliche nelle discontinuità nella ipotesi di livello d'acqua a monte al piano campagna.  
*Water pressures within the joint net assuming a water table upslope at the ground level*

I diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio sono invece riportati in Figura 17 e mostrano che, oltre al punto 3, anche i punti 1 e 2 subiscono spostamenti crescenti rispetto ai cicli di calcolo, e ciò indica instabilità di tutto il fronte.

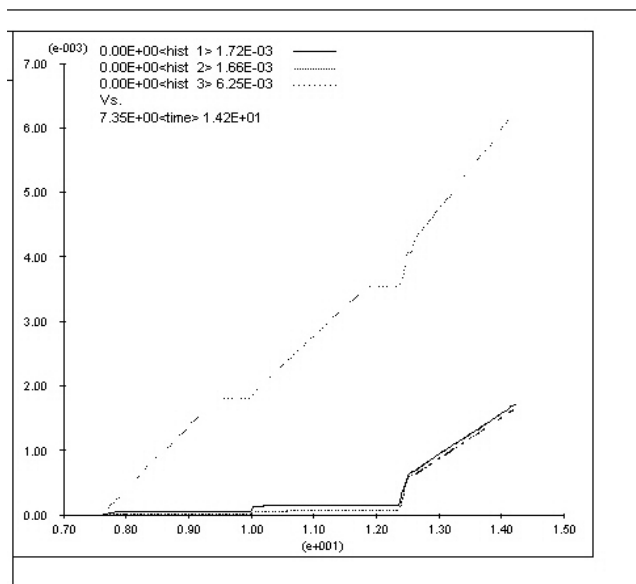


Figura 17. Diagrammi degli spostamenti orizzontali dei tre punti di monitoraggio al variare dei cicli di calcolo nella ipotesi di livello d'acqua a monte al piano campagna.  
*Horizontal displacements against timesteps for three monitoring points assuming a water table upslope at the ground level*

Il meccanismo di instabilità conseguente è mostrato in Figura 18, che riporta i vettori di spostamento risultanti da questa analisi. La figura suggerisce infatti che queste condizioni idrauliche determinano un meccanismo di instabilità generale di tutto il fronte, che non è più localizzato alla porzione delimitata dalla faglia.

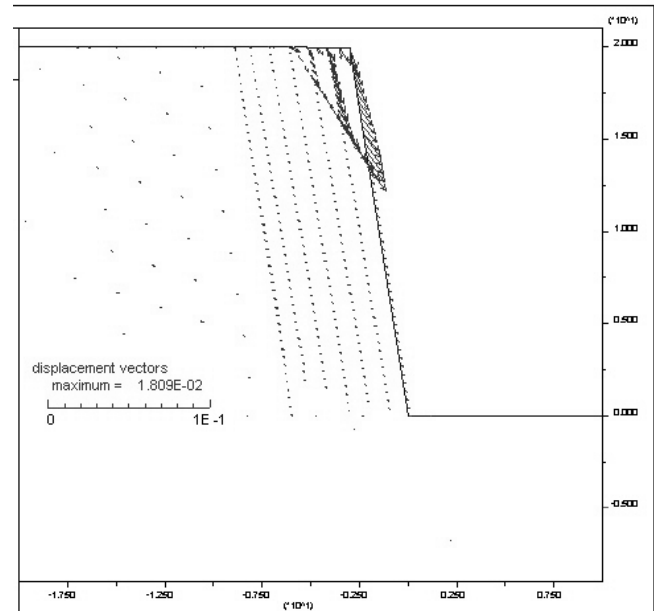


Figura 18. Vettori spostamento nella ipotesi di livello d'acqua a monte al piano campagna.  
*Displacement vectors assuming a water table upslope at the ground level*

Il rilievo strutturale dell'ammasso roccioso, i risultati della parametrizzazione meccanica e le analisi numeriche svolte con l'ausilio del codice di calcolo UDEC4.0 hanno consentito di riconoscere alcuni caratteri interessanti delle condizioni di stabilità del fronte della cava. In particolare, sulla base dei risultati delle analisi si possono fare le seguenti considerazioni:

- In assenza di acqua nell'ammasso calcareo, possibili condizioni di instabilità locale possono derivare solo dalla presenza di faglie locali a franapoggio nella parte sommitale del fronte. Infatti, in assenza di faglie le condizioni del fronte sono da ritenersi stabili.
- Nell'eventualità di processi di filtrazione, anche transitori, all'interno della rete di discontinuità che caratterizza l'ammasso, condizioni generali di instabilità dell'intero fronte possono generarsi solo allorquando si raggiungono a monte del fronte condizioni di totale saturazione dell'ammasso (cioè livello d'acqua al piano campagna). Pertanto, occorrerebbe ridurre il rischio che simili condizioni possano verificarsi.



## **Bibliografia**

- ItascaCG (2000). UDEC 4.0 User's Manual. Minneapolis, Minnesota, USA.
- Barton N., Bandis S. & Bakhtar K. (1985). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 3, 121-140.
- Barton N. & Choubey V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-54.
- ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, 319-368.