

INDAGINE SULLA BULLONATURA DI GALLERIE. METODO DI CALCOLO PER BULLONI COMUNQUE INCLINATI (o)

G. BARLA

Professore Incaricato di Meccanica delle Rocce, Politecnico di Torino.

M. CRAVERO

Contrattista, Politecnico di Torino

G. PERRI

Assistente supplente, Politecnico di Torino.

(o) Lavoro svolto nell'ambito del Centro di studio per i problemi minerari del CNR, Torino.

SOMMARIO

Il metodo di calcolo, usato in precedenza dagli Autori allo scopo di condurre verifiche di stabilità di gallerie bullonate, è esteso, nel presente studio, all'analisi dell'influenza di bulloni comunque inclinati. Si esamina dapprima la distribuzione delle sollecitazioni nell'interno di un bullone singolo, diversamente orientato ed ancorato all'interno di un semispazio omogeneo, isotropo ed elastico lineare, rappresentante l'ammasso roccioso. Successivamente si studia l'influenza dei parametri che definiscono lo schema di bullonatura, dando particolare risalto all'esame dell'effetto dovuto all'orientamento dei bulloni. Si considerano gallerie a sezione rettangolare ed ubicate in roccia omogenea o contenente famiglie di discontinuità, di cui si suppongono note le caratteristiche di resistenza.

1. INTRODUZIONE

Lo studio dello stato di sollecitazione in un ammasso roccioso, circostante una cavità sotterranea bullonata, è stato in precedenza affrontato dagli Autori mediante un metodo di indagine che, per quanto limitato dalle stesse ipotesi semplificative che ne sono alla base (Barla et Al., 1973), consente di trarre interessanti orientamenti qualitativi nella soluzione del complesso problema applicativo in esame.

Il procedimento di calcolo allora proposto è però applicabile soltanto quando i bulloni sono ancorati all'interno dell'ammasso roccioso in direzione normale alla superficie della cavità. Lo scopo del presente studio è perciò quello di ovviare all'anzidetta limitazione, rendendo possibile l'analisi di cavità sotterranee rinforzate con bulloni comunque inclinati rispetto alla superficie di scavo.

2. DISTRIBUZIONE DELLE SOLLECITAZIONI NELL'INTORNO DEL BULLONE

Lo stato di sollecitazione indotto da un bullone ancorato all'interno di un ammasso roccioso, supposto omogeneo, isotropo ed elastico lineare, può essere definito mediante soluzioni analitiche della teoria classica dell'elasticità. L'azione del bullone è schematizzata con due carichi concentrati (figura 1) e le diverse componenti di sollecitazione sono valutate sovrapponendo in modo appropriato le equazioni di Boussinesq, Cerruti e Mindlin (Poulos e Davis, 1974).



FIG. 1 - Rappresentazione schematica dell'azione del bullone mediante due carichi concentrati.

Allo scopo di ottenere una descrizione completa dello stato di sollecitazione nell'intorno del bullone si sono calcolate le componenti di σ_{ij} (tensore delle sollecitazioni) su piani, diversamente orientati, passanti per l'asse del bullone stesso (figura 2). Si sono in particolare ricavati i diagrammi delle tensioni normali σ_{x_0} , σ_{y_0} , σ_{z_0} , riferiti al tiro applicato $P = 15$ t e validi per un bullone di lunghezza $L = 2$ m, inclinato di $\vartheta = 45^\circ$ sulla superficie del semispazio (rappresentante la superficie di scavo), per un valore del rapporto di Poisson ν uguale a 0,25.

I piani di indagine passanti per l'asse del bullone (ZO) formano con l'asse Y angoli ψ rispettivamente uguali a 0° , 45° e 90° ; le osservazioni riportate sono estese a questi tre casi, mentre i diagrammi allegati illustrano l'andamento delle tensioni nel solo piano definito da $\psi = 90^\circ$ (figure 3, 4 e 5).

L'esame dei risultati numerici ottenuti

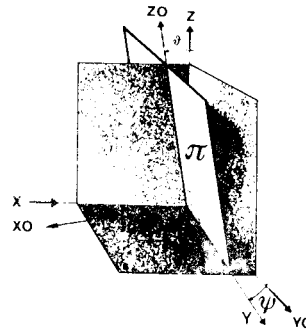


FIG. 2 - Sistemi di coordinate usati e definizione del "piano di indagine" π .

ti consente di fare le seguenti considerazioni.

1) Sul piano ($\psi = 90^\circ$), perpendicolare alla superficie del semispazio, la tensione assiale σ_{z0} , pur confermando qualitativamente l'andamento riscontrato per il bullone verticale (Barla et Al., 1973), presenta componenti di trazione nella zona corticale. La tensione radiale σ_{x0} , a differenza di quanto osservato per il bullone verticale, è di compressione lungo tutto l'asse e di trazione sotto l'ancoraggio. La sollecitazione circonferenziale σ_{y0} mostra, al confronto, una zona di trazione maggiormente estesa lateralmente all'asse del bullone e più ridotta nella parte sotto l'ancoraggio.

2) Sul piano ($\psi = 0^\circ$), cioè in condizioni di simmetria rispetto all'asse del bullone, la tensione assiale determina una zona di compressione tra piastra ed ancoraggio. La tensione radiale conferma quanto osservato sul piano $\psi = 90^\circ$. La tensione circonferenziale mostra invece una zona di trazione, estesa sotto l'ancoraggio e lungo l'asse, che interessa anche una limitata area corticale.

3) Sul piano ($\psi = 45^\circ$), i diagrammi delle sollecitazioni presentano andamenti intermedi rispetto a quelli sui due piani $\psi = 90^\circ$ e $\psi = 0^\circ$ appena considerati.

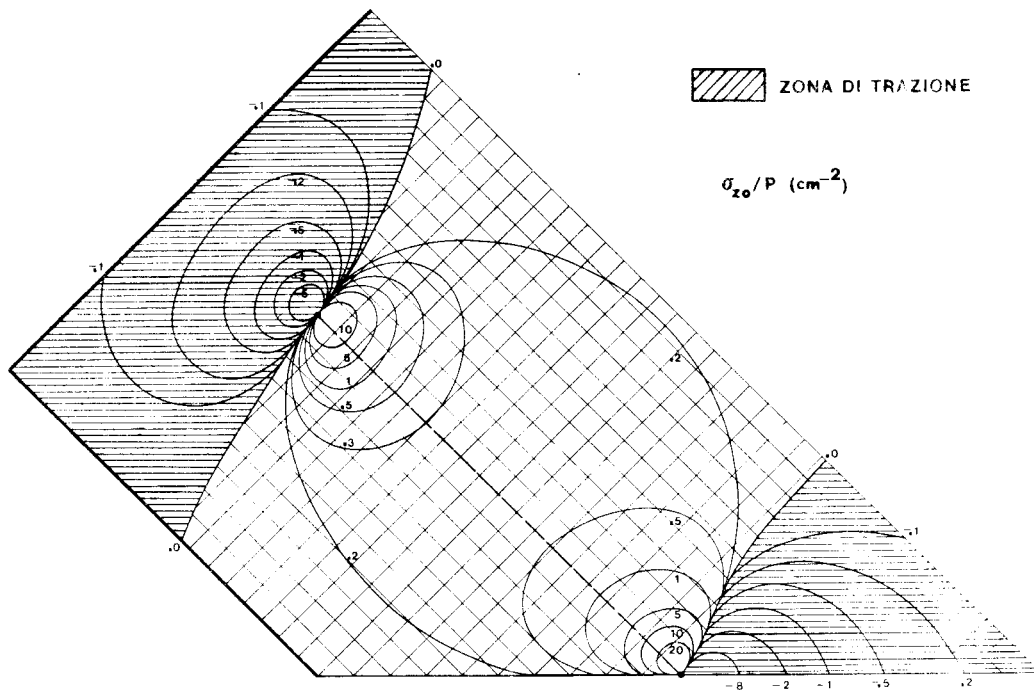


FIG. 3 - Tensione assiale σ_{z0} sul piano $\psi = 90^\circ$ per un bullone inclinato di $\varphi = 45^\circ$.

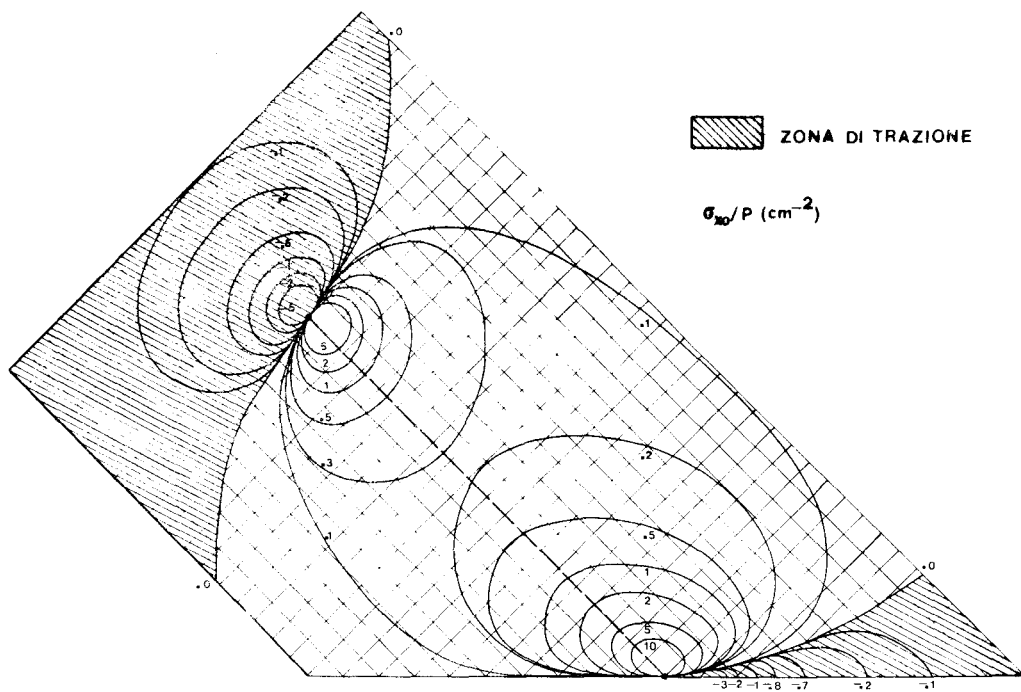


FIG. 4 - Tensione radiale σ_{x0} sul piano $\psi = 90^\circ$ per un bullone inclinato di $\vartheta = 45^\circ$.

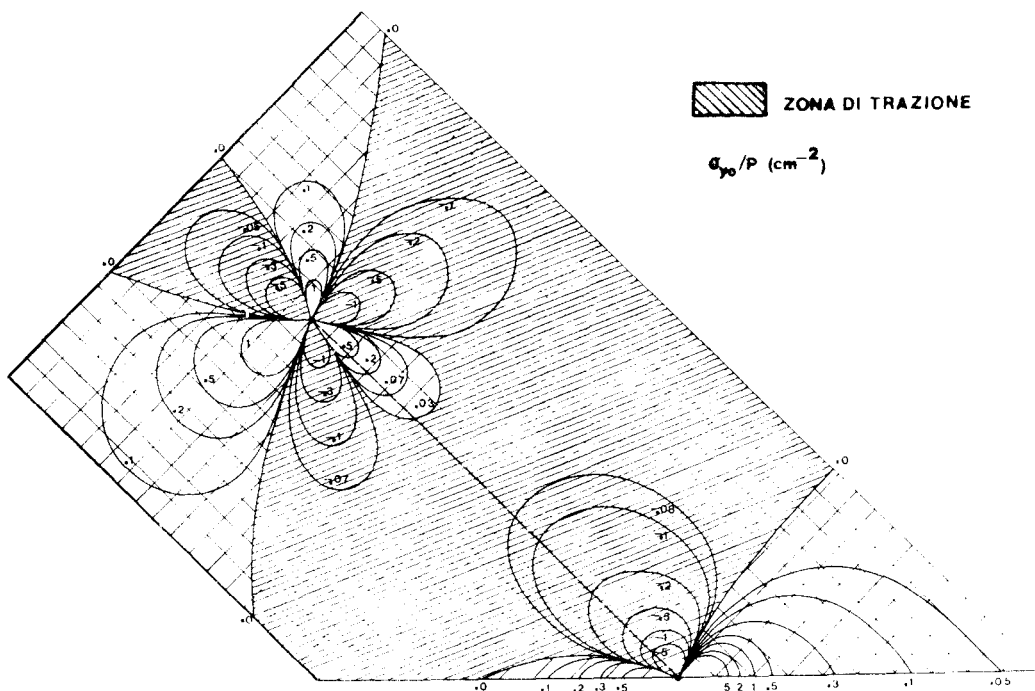


FIG. 5 - Tensione circonferenziale σ_{y0} sul piano $\psi = 90^\circ$ per un bullone inclinato di $\vartheta = 45^\circ$.

Sulla base dei risultati ottenuti per le sollecitazioni e ricorrendo ai cosiddetti criteri della "trazione semplice" e di "Coulomb in forma generalizzata" (Barla, 1975), si ricercano le zone di rottura relative alle inclinazioni del bullone definite da: $\vartheta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$.

Per la roccia si assumono le seguenti caratteristiche di resistenza: resistenza a trazione semplice $T_0 = 5 \text{ kg/cm}^2$, coesione $c = 100 \text{ kg/cm}^2$ (posta molto elevata in modo da poter considerare un ammasso roccioso pressochè non resistente a trazione), angolo di attrito $\Phi = 30^\circ$. La zona di indagine è compresa entro un cilindro di raggio 0,4 m, scelto coassiale col bullone; il reticolo usato sui diversi piani $\psi = \text{costante}$ ha maglie quadrate di lati $\Delta r = \Delta z = 0,02\text{m}$.

L'analisi di stabilità è condotta su due piani passanti per l'asse del bullone, perpendicolari tra loro, definiti da $\psi = 0^\circ$ e $\psi = 90^\circ$. Il caso del bullone inclinato di $\vartheta = 45^\circ$ è esplorato con maggiore dettaglio, in quanto l'analisi di stabilità è effettuata, oltre che sui due piani anzidetti, anche su due intermedi definiti da $\psi = 30^\circ$ e $\psi = 45^\circ$.

I risultati, illustrati in parte dai diagrammi di figura 6, mettono in luce, per le zone di rottura, l'assenza di simmetria rispetto all'asse del bullone; questo è assai evidente nella zona prossima alla piastra, dove si risente in modo prevalente dell'influenza della frontiera del semispazio. In corrispondenza

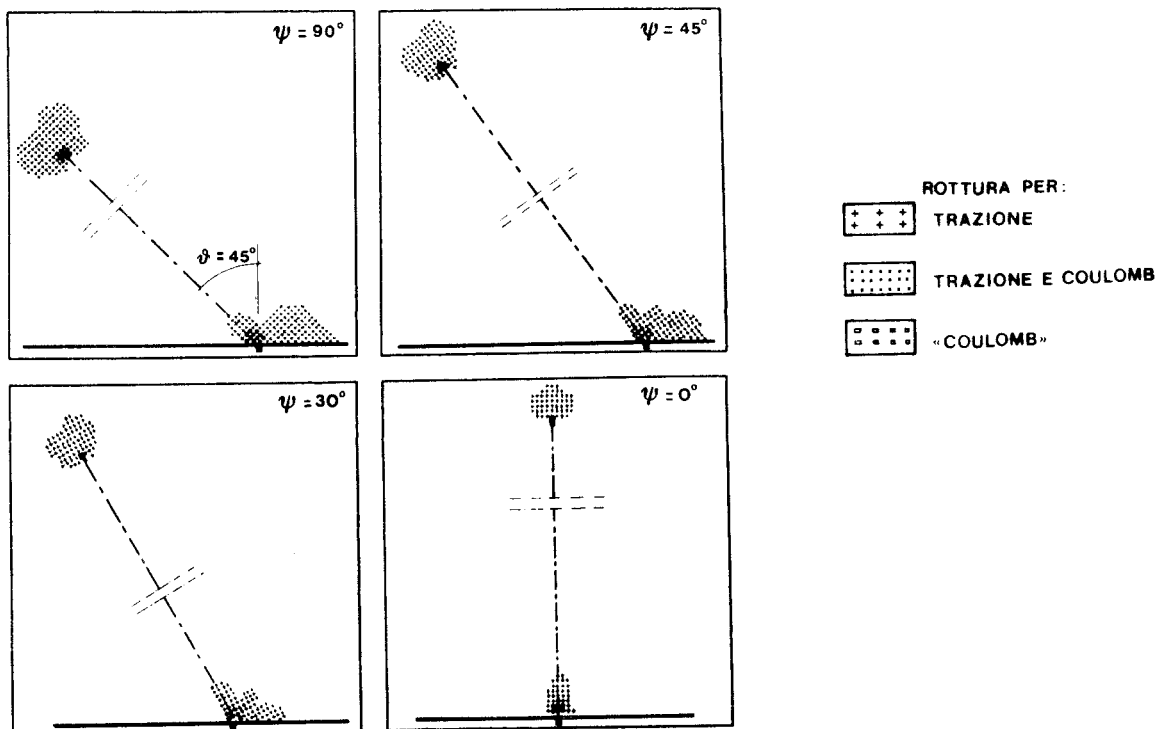


FIG. 6 - Zone di rottura nell'intorno di un bullone inclinato di 45° rispetto alla superficie di scavo.

dell'ancoraggio si ha invece una zona di rottura di forma assai regolare, rappresentabile mediante un solido di rotazione, avente per asse l'asse del bullone.

Si deve però notare che, quando il bullone si inclina sulla verticale, la zona di rottura, immediatamente sottostante il punto di ancoraggio, si riduce via via sino ad annullarsi completamente. Si può quindi affermare che l'ancoraggio del bullone determina un solido di rottura subsferico e simmetrico, praticamente indipendente dall'inclinazione del bullone, nel quale il punto di ancoraggio occupa il polo inferiore anzichè il centro. La simmetria della figura di rottura si osserva invece sui piani $\psi = 0^\circ$, dove essa è anche ridotta in estensione rispetto a quelle presenti nel piano $\psi = 90^\circ$. Questa differenza si accentua all'aumentare dell'inclinazione del bullone e diventa in particolare evidente in corrispondenza della piastra di ripartizione.

L'estensione delle zone di rottura è condizionata, quasi esclusivamente, dalla rottura per trazione che si genera a monte dei punti di applicazione del carico (piastra ed ancoraggio), dove la componente orizzontale della sollecitazione è di trazione. In particolare si osserva che, per l'inclinazione del bullone definito da $\vartheta = 60^\circ$, la zona di rottura in prossimità della piastra si sviluppa interamente da un solo lato rispetto all'asse del bullone.

Per quanto riguarda poi la rottura secondo il criterio di Coulomb in forma generalizzata, si deve osservare che essa, anche in relazione alle particolari caratteristiche di resistenza ammesse per la roccia, è presente, con estensione molto limitata, in corrispondenza dei punti di applicazione dei carichi, dove si generano gradienti di sollecitazione molto elevati.

A scopo illustrativo si riportano nella figura 7, in funzione dell'angolo ϑ di inclinazione del bullone, le estensioni delle aree di rottura (A_f) valutate sui due piani di indagine $\psi = 0^\circ$ e $\psi = 90^\circ$, sia per la zona prossima all'ancoraggio che per quella vicino alla piastra di ripartizione.

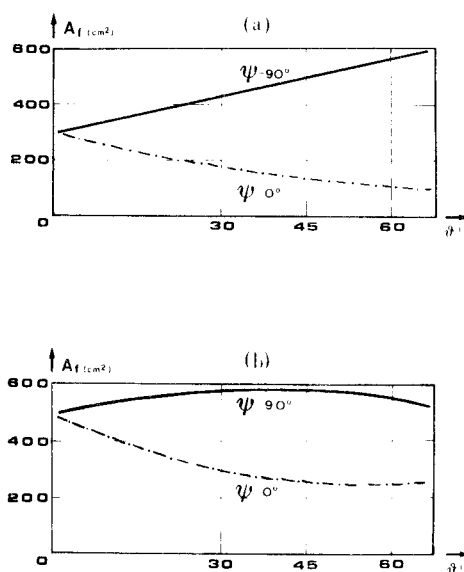


FIG. 7 - Estensione delle superfici di rottura vicino a: a) ancoraggio, b) piastra di ripartizione.

3. SCHEMA DI BULLONATURA E CARATTERISTICHE STRUTTURALI DELL'AMMASSO ROCCIOSO

L'efficacia di un sistema di bullonatura è definito dalla capacità di modificare, a favore della stabilità, la distribuzione delle tensioni al contorno della cavità cui questo sistema è applicato.

La determinazione dello stato di tensione risultante è condotta secondo lo schema seguente (figura 8):

- a) valutazione dello stato di tensione $(\sigma)_g$ dovuto allo scavo e di quello $(\sigma)_b$ indotto dai bulloni;
- b) sovrapposizione dei risultati: $(\sigma) = (\sigma)_g + (\sigma)_b$.

La valutazione di questi due stati di sollecitazione segue procedimenti diversi: per il calcolo di $(\sigma)_g$ si utilizza un modello ad elementi finiti piano, in condizioni di deformazione piana; il calcolo di $(\sigma)_b$ è invece condotto mediante le soluzioni analitiche tridimensionali già menzionate nel precedente paragrafo. Per definire la tensione indotta dai bulloni in un generico punto P di indagine, si considerano unicamente quei bulloni che provocano una variazione apprezzabile dello stato di tensione in quello stesso punto, secondo la

$$(\sigma)_b = \sum_{k=1}^N (\sigma)_{bk}$$

dove N è il numero dei bulloni che contengono il punto P all'interno dei rispettivi cilindri di influenza.

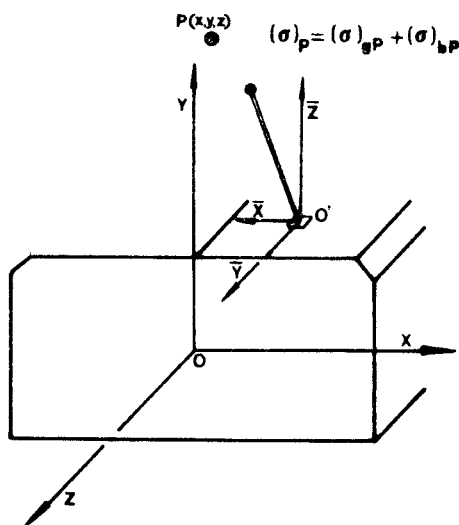


FIG. 8 - Schema illustrativo della valutazione dello stato di tensione risultante.

Per l'ammasso roccioso si considerano due modelli strutturali semplici: quello omogeneo e quello contenente giunti paralleli di stratificazione (figura 9). Nel primo caso, gli schemi di bullonatura adottati devono seguire le condizioni di simmetria rispetto all'asse verticale passante per il centro dello scavo; nel secondo, il problema non rispetta le condizioni di simmetria, tranne nei due casi limite in cui i giunti siano verticali od orizzontali. Di conseguenza, anche lo schema di bullonatura non sarà simmetrico rispetto all'asse verticale per il centro della sezione di scavo.

A scopo esemplificativo si considera nel seguito il caso di una sezione di scavo rettangolare (2,5 x 4 m). Il calcolo di $(\sigma)_g$ è condotto mediante un modello ad elementi finiti costituito da 485 elementi e 486 nodi, riportato parzialmente in figura 10. Il campo di tensione preesistente, definito da $\sigma_v = 50 \text{kg/cm}^2$

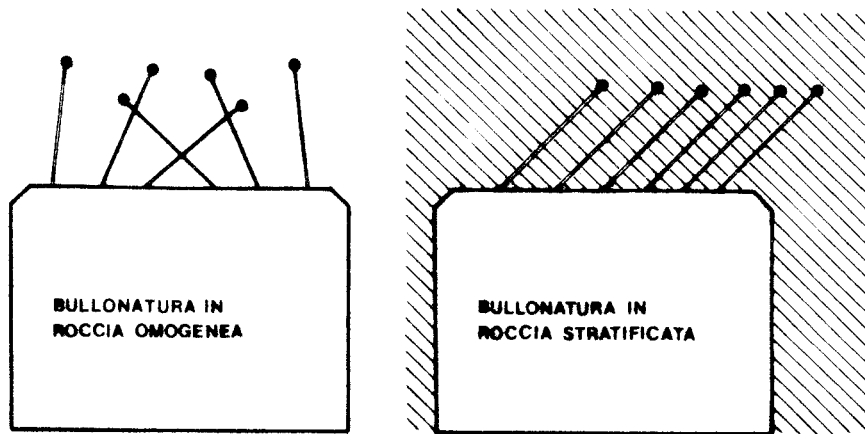


FIG. 9 - Modelli strutturali adottati per l'ammasso roccioso e schemi di bullonatura considerati.

e $\sigma_0 = 15 \text{ kg/cm}^2$, corrisponde ad una galleria situata a 200 m di profondità in un ammasso roccioso avente peso specifico $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$ e rapporto di Poisson $\nu = 0,25$.

Si esamina in particolare con questo esempio l'influenza dell'inclinazione dei bulloni mantenendo costanti gli altri parametri caratteristici della bullonatura: tiro, $P = 15 \text{ t}$; lunghezza, $L = 2,0 \text{ m}$; spaziatura tra le piastre di ripartizione, $S = 0,7 \text{ m}$; passo, lungo l'asse della galleria, $S_z = 0,7 \text{ m}$; franco dalla parete, $p = 0,25 \text{ m}$.

La sezione di indagine contiene 6 bulloni e le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso sono definite da: resistenza a trazione $T_0 = 5 \text{ kg/cm}^2$, coesione $c = 100 \text{ kg/cm}^2$, angolo di attrito interno $\phi = 30^\circ$, angolo di rugosità sui giunti (per l'ammasso stratificato) $\phi_r = 20^\circ$.

3.1 Roccia omogenea

Dal confronto delle zone di rottura presenti nella sezione non bullonata (figura 11a) con quelle residue dopo l'intervento della bullonatura (due schemi di intervento considerati sono quelli riportati nei diagrammi b e c della stessa figura 11) si traggono le osservazioni seguenti: 1) la disposizione dei bulloni verticali (figura 11b) non porta pratici vantaggi ai fini della stabilità; 2) l'efficacia dello

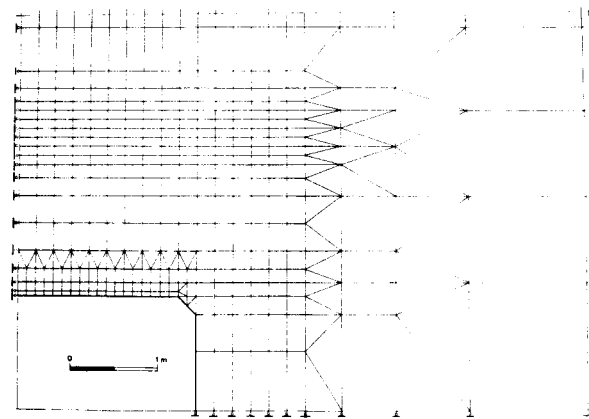


FIG. 10 - Modello FEM rappresentante la zona circostante la galleria rettangolare considerata.

schema di bullonatura risulta invece apprezzabile se si dispongono i bulloni inclinati.

Pur non avendo stabilito una relazione generale tra l'affidabilità dello schema di bullonatura e l'inclinazione dei bulloni, dall'esame dei risultati conseguiti nelle diverse analisi condotte si può affermare che è possibile raggiungere un risultato ottimale conservando un'elevata inclinazione per i bulloni posti in chiave e diminuendola per quelli periferici, come risulta dal diagramma

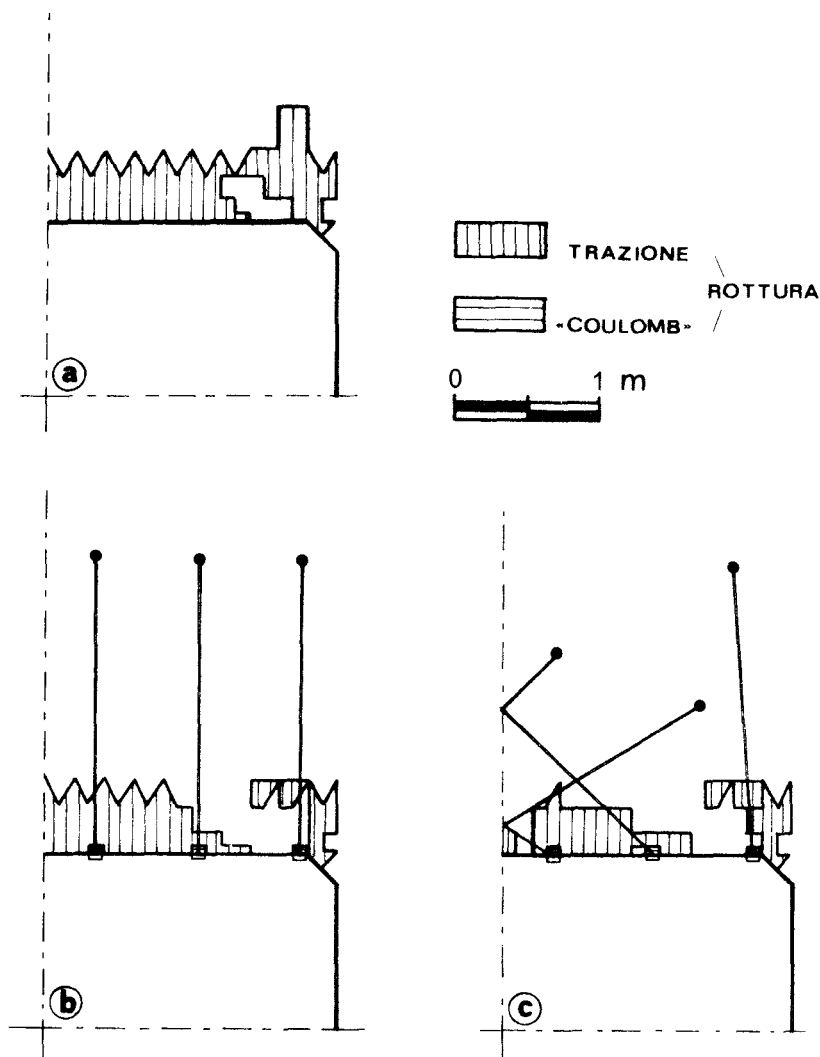


FIG. 11 - Zone di rottura nell'intorno di una galleria a sezione rettangolare in roccia omogenea.

c di figura 11. D'altra parte, questa osservazione è confermata dai risultati riassunti nella figura 12, dove, per schemi di bullonatura costituiti da bulloni egualmente inclinati, si ha che: 1) l'ampiezza dell'area di rottura (A_f) cresce mentre l'angolo di inclinazione ϑ passa da 30° a 60° (questo aumento è dovuto ad una zona di rottura che si sviluppa in tal caso in prossimità del rac-

cordo tra volta e parete, a causa della presenza del bullone più periferico);
 2) nella parte centrale della galleria un'inclinazione dei bulloni di 60° comporta una riduzione dell'area A_f .

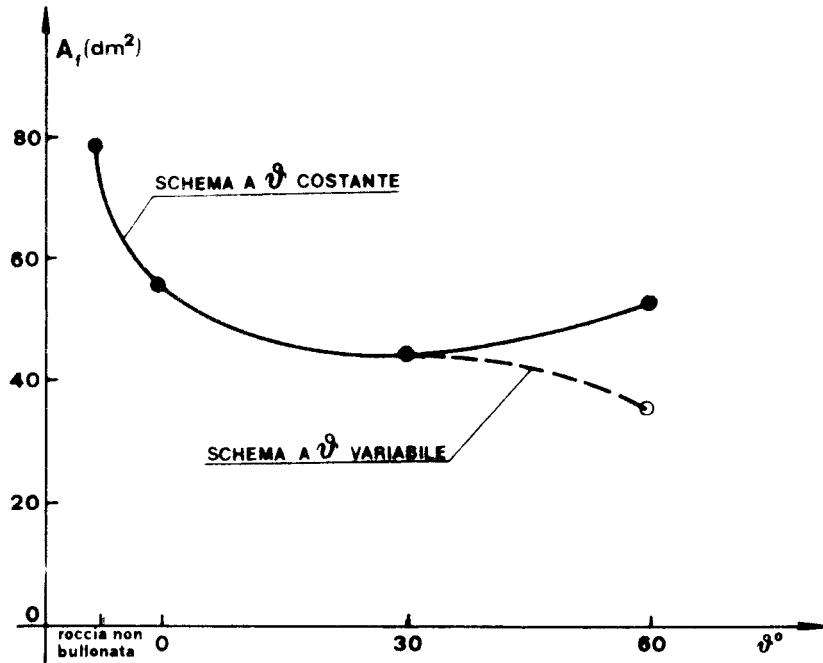


FIG. 12 - Influenza dell'inclinazione dei bulloni applicati ad una galleria a sezione rettangolare in roccia omogenea.

3.2 Roccia con giunti di stratificazione

Il problema è dapprima esaminato nei due casi limite di giunti di stratificazione verticali ed orizzontali. Si osserva in particolare che: 1) quando gli strati sono verticali, i bulloni, posti perpendicolarmente alla volta della galleria, e quindi nella stessa direzione degli strati, non portano benefici alla stabilità; quest'ultima migliora invece con bulloni inclinati, disposti secondo lo stesso schema geometrico considerato ottimale per il caso di roccia omogenea; 2) quando gli strati sono orizzontali, i bulloni, applicati perpendicolarmente alla superficie di scavo, e quindi anche agli strati, rivelano un'influenza decisamente positiva; dall'esame invece delle condizioni di stabilità dello scavo in presenza di bulloni comunque inclinati, si riscontra infine un sensibile peggioramento della situazione globale.

Si sono successivamente considerati ammassi rocciosi contenenti giunti di stratificazione aventi diversa giacitura; si sono analizzati alcuni possibili schemi di bullonatura con l'intento principale di mettere in luce gli effetti prodotti dai bulloni, in relazione all'orientamento reciproco bulloni-strati.

Si riportano a scopo illustrativo i soli risultati delle figure 13 e 14, ottenuti per il caso di galleria aperta in roccia con giunti inclinati di 45° ;

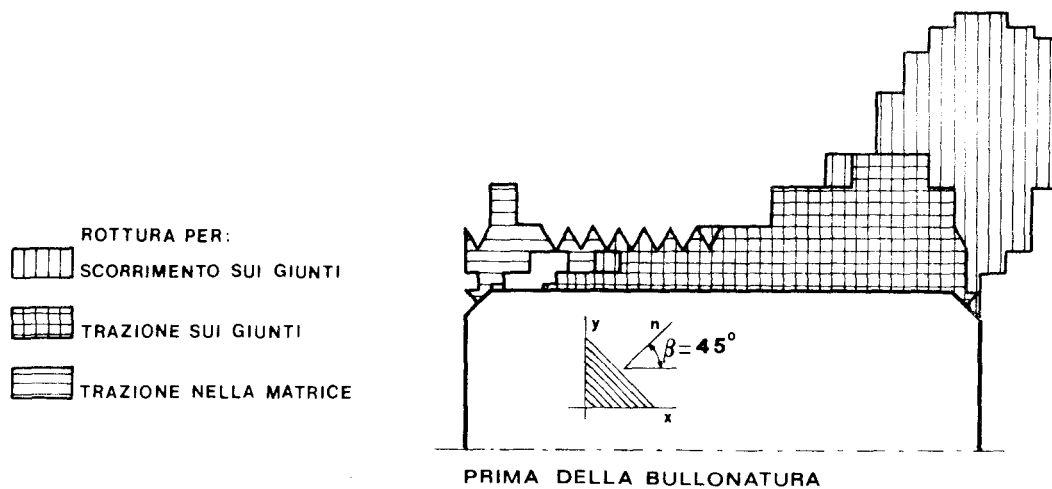


FIG. 13 - Zone di rottura nell'interno di una galleria a sezione rettangolare. Condizioni prima della bullonatura. Ammasso roccioso con giunti di stratificazione inclinati di 45° .

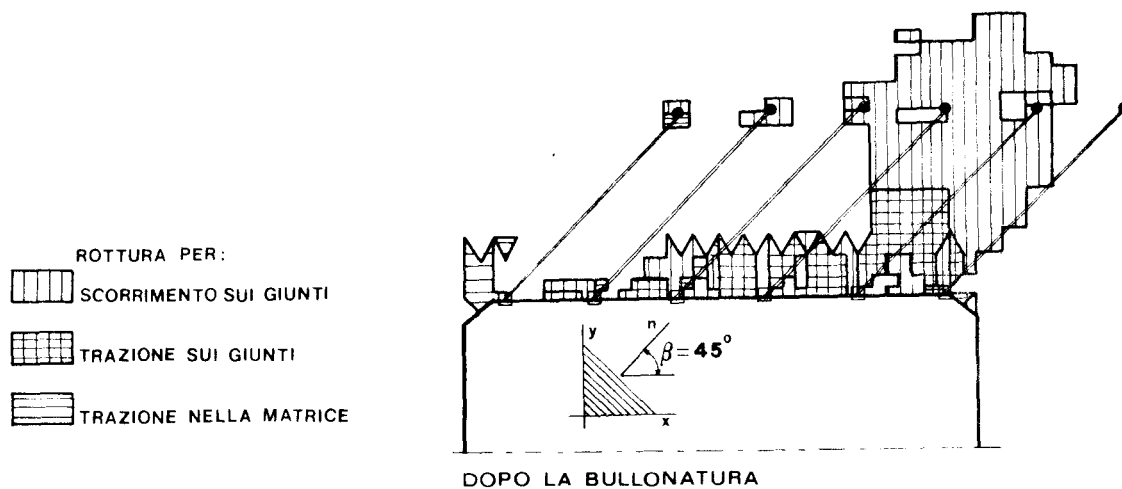


FIG. 14 - Zone di rottura nell'interno di una galleria a sezione rettangolare. Condizioni dopo la bullonatura. Ammasso roccioso con giunti di stratificazione inclinati di 45° . Bulloni applicati perpendicolarmente alla stratificazione.

da un punto di vista quantitativo, la rottura avviene prevalentemente sui giunti ed essa è ampiamente diffusa sulla parte destra della volta.

L'azione dei bulloni, nei confronti di questo tipo di rottura, appare generalmente limitata; essa comunque si manifesta riducendo via via la rottura nelle immediate vicinanze delle piastre di ripartizione dei bulloni e, nei soli

casi in cui i bulloni spaziano intorno alla posizione di perpendicolarità agli strati, anche nel senso di ridurre la rottura in zone più lortane dal contorno della galleria.

Alla sinistra dell'asse verticale, passante per il centro della galleria, le zone di rottura hanno eguale estensione sia per lo scorrimento sia per la trazione sui giunti, ed occupano aree limitate che si sviluppano in prossimità della chiave della galleria. Nei confronti degli sforzi di trazione agenti perpendicolarmente ai giunti, l'azione dei bulloni si mostra più efficace portando ad una sensibile diminuzione delle aree interessate alla rottura: tale influenza positiva si accentua man mano che i bulloni tendono a direzioni di normalità alla giacitura dei giunti di stratificazione.

4. CONCLUSIONI

Il metodo di calcolo presentato si rivela alquanto restrittivo a causa delle supposte condizioni di omogeneità, isotropia ed elasticità lineare nei confronti delle caratteristiche globali di deformabilità dell'ammasso roccioso. In particolare, dal punto di vista della valutazione dell'efficacia della bullonatura, il metodo prescinde, tra l'altro, dalle modificazioni indotte nella roccia dall'apertura del vuoto; queste certamente avvengono nel periodo di tempo intercorrente tra le operazioni di abbattimento e di bullonatura.

Le prospettive per un ulteriore approfondimento dell'indagine sono quindi volte alla eliminazione, o quanto meno, alla limitazione dei principali difetti del metodo di calcolo sin qui impiegato. E', per esempio, allo studio la possibilità di introdurre nello schema di calcolo il comportamento non lineare della massa rocciosa, dando particolare risalto alla simulazione delle diverse modalità esecutive seguite nelle applicazioni.

BIBLIOGRAFIA

- BARLA G. (1975) - Meccanica delle rocce. Teoria e applicazioni. Parte seconda. CEUT, Torino (in fascicoli).
- BARLA G., BRIZIO P., CRAVERO M. (1973) - Indagine teorica sulla bullonatura di gallerie. II: metodo per l'analisi di stabilità. Rivista Italiana di Geotecnica, Vol. VII, n. 4, pp. 250-268.
- POULOS H.G. e DAVIS E.H. (1974) - Elastic solutions for soil and rock mechanics. John Wiley, New York.

SUMMARY

The numerical method, previously used by the Authors for the stability analysis of underground openings reinforced with rock bolts, is extended in the present paper to account for bolts of different orientations with respect to the excavation surface.

The state of stress around the bolts is evaluated by using analytical solutions of the Classical Theory of Elasticity. The stresses around the opening, in the rock mass, due to either gravity or tectonic field, are calculated by the Finite Element Method and a model which obeys by the conditions of plane strains.

The superimposition of the two stress fields let one evaluate the stress components around the opening, which can subsequently be used in order to perform stability analyses of the rock structure. Both homogeneous and jointed media can be treated.

The normal stresses around the bolt are plotted for a 45 degree inclination angle with respect to the excavation surface (figure 3,4, and 5). The failure zones around the bolt, due to the applied load only, are evaluated for a rock mass of a very low tensile strength, with consideration being given to different inclination angles (figure 6 and 7).

The bolt patterns to be applied in the case of a rectangular opening, located in either a homogeneous or jointed rock mass, are investigated (figures 11, 12, 13, and 14). The numerical results let one infer that in a homogeneous rock mass the bolts are effective, when properly inclined with respect to the roof of the opening. It is found that a fan shaped bolt pattern (figure 11) can be chosen.

In a jointed rock mass, this same bolt pattern seems to be applicable when the joints are vertical, i.e. the strike is normal to the roof. In general, when the joints are differently oriented with respect to the excavation surface, the bolts seem to be effective when applied approximately normally to the joints plane: an example, for a 45° jointed rock mass, is described (figure 13 and 14).