

Indagine teorica sulla bullonatura di gallerie*

I. La distribuzione delle tensioni nell'intorno di un bullone

G. BARLA, P. BRIZIO, M. CRAVERO*

SOMMARIO: Dopo un esame dello stato attuale delle conoscenze nel campo della bullonatura di gallerie, si studia, ricorrendo a soluzioni note della teoria classica dell'elasticità, lo stato di tensione nell'intorno di un singolo bullone. Con riferimento alla morfologia dell'ammasso roccioso, si impiegano diversi criteri di resistenza che consentono di valutare gli effetti di instabilità dovuti al bullone. In particolare, si riportano alcuni risultati numerici ottenuti per date caratteristiche di resistenza della roccia. Il presente lavoro fa parte di un'indagine condotta con lo scopo di elaborare un metodo di calcolo che consenta di valutare l'influenza dei diversi parametri che intervengono nella scelta di uno schema di bullonatura per gallerie di sezione geometrica comunque assegnata.

Introduzione.

Nello scavo e nel mantenimento di vuoti sotterranei si usano diverse tecniche di sostegno, alcune tradizionali ed altre di più recente introduzione. L'adattabilità ed il basso costo del legno ne mantengono l'uso per strutture di non lunga durata e di dimensioni modeste. L'introduzione di centine metalliche deformabili, ad elevata resistenza, ha ridotto l'impiego di questo materiale ed ha permesso di effettuare scavi di grandi dimensioni ed a maggiore profondità, rinnovando anche i metodi di avanzamento. Più recente è invece l'impiego della bullonatura, tecnica di sostegno che permette di ridurre, rispetto a quelle menzionate, sia l'ingombro di sezione che i costi. Vi sono però alcuni inconvenienti nella bullonatura, quali ad esempio la difficile adattabilità ad alcuni tipi di roccia, la diminuzione nel tempo della tensione applicata, nonché l'incerto ed a volte contraddittorio supporto teorico.

Molteplici studi sono stati condotti per analizzare, in diversi campi, sia le tecniche costruttive che l'uso dei bulloni, giungendo anche a dare delle utili indicazioni applicative. Da un esame dei lavori pubblicati appare che una teoria generale della bullonatura ancora non esiste, anche se si possono riscontrare negli ultimi anni contributi rigorosi. La mancanza di una teoria generale della bullonatura è probabilmente dovuta tanto alla complessità del problema, quanto al fatto che diversi studiosi hanno cercato di produrre soluzioni adattabili di volta in volta a

specifiche situazioni di impiego. Questo modo di procedere appare valido e realistico: in primo luogo, perché richiesto dall'applicazione molto estesa e diversificata dei bulloni, in secondo luogo perché il problema deve essere esaminato nel suo singolo dettaglio.

Con la seguente indagine si intende esaminare il problema della bullonatura da un punto di vista teorico ed elaborare un metodo di calcolo che consenta di analizzare l'influenza dei diversi parametri che intervengono nella scelta dello schema di bullonatura di una galleria di sezione geometrica nota. In questo lavoro preliminare, che ha anche lo scopo di introdurre il problema in esame, si studia la distribuzione delle tensioni intorno ad un singolo bullone e si determinano le zone di rottura nell'intorno di questo, nell'ipotesi che l'ammasso roccioso sia omogeneo o contenga giunti di stratificazione.

Stato attuale delle conoscenze nel campo della bullonatura.

Rinunciando a fornire una bibliografia dettagliata sulle conoscenze nel campo della bullonatura, si danno invece alcune indicazioni sugli orientamenti seguiti dai diversi Autori nella scelta degli schemi di bullonatura, citando in particolare quei lavori che sembrano più interessanti in relazione al metodo di calcolo prospettato nella presente indagine.

Tra i dati che si devono considerare per progettare correttamente uno schema di bullonatura, vengono solitamente citati:

1) le caratteristiche di resistenza meccanica del « materiale roccia »;

* Il presente lavoro è stato svolto con contributo del CNR, Centro di studio per i problemi minerari, Torino.

** Prof. Dr. Ing. Giovanni BARLA; Dr. Ing. Pierfranco BRIZIO; Dr. Ing. Masantonio CRAVERO - Politecnico di Torino.

- 2) le sue caratteristiche di deformabilità;
- 3) la morfologia dell'ammasso roccioso.

La conoscenza della resistenza meccanica della roccia dà informazioni sulla massima tensione applicabile al bullone e sul tipo di ancoraggio da usarsi [SINGH, CHUGH, 1967]; note le caratteristiche di deformabilità, è quindi possibile studiare il comportamento dell'ancoraggio [STEFANKO, 1962], e stabilire un'eventuale variazione della tensione nel tempo [STEFANKO, 1962; SINGH e CHUGH, 1967; EWOLDSSEN e McNIVEN, 1969].

Per quanto riguarda la morfologia dell'ammasso roccioso, si è studiata l'azione dei bulloni per:

- 1) rocce fratturate;
- 2) rocce stratificate orizzontalmente;
- 3) rocce comunque stratificate;
- 4) rocce compatte ed omogenee.

Nelle rocce fratturate il bullone può svolgere due funzioni distinte: la prima, di sostegno passivo, per stabilizzare un ammasso roccioso fratturato al contorno di un'apertura sotterranea, è stata studiata da LANG [1957]; la seconda, di rinforzo, con un'azione di trave, è stata discussa da COATES e COCHRANE [1970]. Prove compiute su modelli composti da cubetti di vario materiale, tali da simulare una roccia fratturata, hanno permesso di chiarire l'azione di rinforzo di bulloni posti trasversalmente ai modelli.

E' stato così possibile giungere alle seguenti conclusioni:

a) non si riesce a costruire una trave se la spaziatura dei bulloni è superiore alla loro lunghezza;

b) la spaziatura è funzione della dimensione dei blocchi e del materiale costituente i blocchi;

c) le flessioni della trave sotto carichi costanti sono direttamente proporzionali alla spaziatura dei bulloni ed inversamente proporzionali al loro tiro;

d) la disposizione comunque inclinata dei blocchi non produce sostanziali differenze nei risultati delle prove.

Per rocce stratificate orizzontalmente, l'azione dei bulloni può ritenersi distinta in due diverse componenti: (1) la creazione di una trave e (2) l'azione di sospensione.

La creazione di una trave, che lega tra di loro diversi strati, produce un effetto di rinforzo per le sollecitazioni a flessione. I bulloni, esercitando

una compressione contro gli strati, creano una resistenza di attrito fra gli stessi in modo da impedire spostamenti lungo i piani di stratificazione [PANEK, 1962 a].

L'azione di sospensione consiste nel trasferimento di una parte del peso dagli strati più sottili o più deboli ad uno o più strati di maggior spessore. Tale azione avviene quando strati con diverse rigidzze flessionali sono costretti ad assumere una uguale flessione. In tali ipotesi sono state ricavate formule che legano la spaziatura, la lunghezza, il tiro dei bulloni, lo spessore degli strati, nonché la loro rigidzza flessionale [PANEK, 1962 b]. Alle indagini del PANEK [1964], sia teoriche che sperimentali, condotte su modelli, si aggiungono quelle di COATES e COCHRANE, che stabiliscono criteri pratici per la bullonatura sulla base di applicazioni in miniera.

Per rocce omogenee, a comportamento elastico, è stata studiata l'azione del bullone sotto due differenti aspetti: 1) la precompressione e 2) il rinforzo della zona prossima al contorno della galleria. In entrambi i casi si suppone che i bulloni inducano nell'ammasso roccioso uno stato di tensione che si va a sovrapporre a quello preesistente dovuto alla galleria: le rocce tendono ad espandersi nei vuoti creati nell'ammasso e questo induce tensioni differenziali; i bulloni, sotto tiro, inducono sforzi di compressione e riportano la roccia allo stato di sollecitazione originario. I bulloni inoltre esercitano un'azione di freno sulle piccole fratture (dovute agli effetti dell'impiego di esplosivi, alla eventuale alterazione superficiale prodotta dagli agenti atmosferici, ecc.) che tendono a propagarsi verso l'interno dell'ammasso, riducendo così il distacco di blocchi dalle pareti dello scavo.

EWOLDSSEN e McNIVEN [1969] considerano come effetto principale derivante dalla bullonatura la variazione dello stato di tensione nella massa rocciosa ed analizzano, con riferimento ad una galleria circolare, sia il caso di rocce omogenee, sia il caso di rocce con giunti di stratificazione. Essi utilizzano delle soluzioni in forma chiusa fondate sulla teoria classica dell'elasticità, tanto per il calcolo delle tensioni indotte dai bulloni, quanto per la determinazione dello stato di sollecitazione preesistente nell'ammasso. Questa indagine perde tuttavia la sua validità se il profilo della galleria non è circolare: non esistono infatti soluzioni analitiche che consentano di calcolare le tensioni attorno ad una galleria se non per forme semplici [BARLA, 1970]. EWOLDSSEN e McNIVEN analizzano anche il problema della scelta dello schema di

bullonatura; successivamente, GOODMAN ed EWOLDSEN [1969] forniscono informazioni preliminari sui principali parametri che determinano questa scelta.

Per quel che riguarda infine la conoscenza dello stato di tensione attorno ad un bullone, si può ancora fare riferimento al lavoro di EWOLDSEN e McNIVEN. Essi riducono l'azione del bullone a due forze applicate in due punti distinti sulla superficie e all'interno di un semispazio e risolvono il problema mediante formule della teoria classica dell'elasticità. OUDENHOVEN e OSEN [1967] trattano invece il caso particolare della distribuzione di tensione nell'intorno di bulloni ad ancoraggio esplosivo; CULVER e JORSTAD [1967], mediante prove su modelli fotoelastici piani e soluzioni analitiche, cercano di trarre alcune conclusioni sull'estensione delle fratture attorno all'ancoraggio e sulla loro propagazione, indicando alcuni accorgimenti operativi.

Calcolo dello stato di tensione nell'intorno di un singolo bullone.

Come è illustrato in fig. 1, l'azione di un bullone può essere schematizzata con due forze, applicate in due punti distinti, agenti nella direzione del bullone, di uguale entità e di verso opposto. E' opportuno chiarire che con questa schematizzazione non si tiene conto né delle condizioni di ancoraggio né dell'azione della piastra, che provvedono ambedue a distribuire il carico. Mentre,

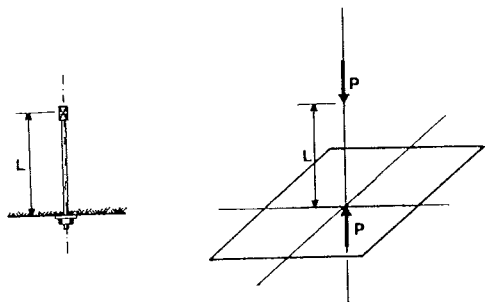


Fig. 1. - Rappresentazione schematica dell'azione di un bullone.

secondo EWOLDSEN e McNIVEN [1969], le differenze tra le tensioni calcolate nei due casi sono trascurabili nell'effetto globale prodotto dalla bullonatura, sarebbe opportuno condurre un'analisi per stabilire sino a che punto l'approssimazione è valida per l'ancoraggio e la piastra, dove il gra-

diente delle tensioni è molto elevato (1). Schematizzando l'azione del bullone in questo modo, viene inoltre ignorata la presenza del bullone tra l'ancoraggio e la piastra; questa ipotesi, se non è limitativa per quel che riguarda l'azione delle forze, provoca però una modifica nella distribuzione delle tensioni nella vicinanza dell'asse del bullone.

Non esistendo soluzioni per il calcolo della distribuzione delle tensioni per carichi all'interno del mezzo, se non quando questi siano applicati nell'interno di semispazi omogenei indefiniti a comportamento elastico, è necessario trascurare, nell'applicazione a gallerie, l'effetto delle superfici curve, il che porta ad errori crescenti in proporzione diretta alla loro curvatura.

Tenendo ben presente quanto sopra, è allora possibile ricorrere, come hanno anche fatto EWOLDSEN e McNIVEN, alle note soluzioni di BOUSSINESQ [1885] e di MINDLIN [1936].

BOUSSINESQ ha dedotto la distribuzione delle tensioni in un semispazio indefinito sottoposto ad un carico applicato su un'area puntiforme e con direzione normale alla superficie piana del semispazio. Con riferimento al sistema di coordinate cilindriche di fig. 2 (a), le tensioni sono [WESTERGAARD, 1964]:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left[-\frac{3r^2 z}{R^3} + \frac{(1-2\nu)R}{R+z} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(1-2\nu)P}{2\pi R^2} \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_z = -\frac{3Pz^3}{2\pi R^3} \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3Prz^2}{2\pi R^3} \quad (4)$$

dove:

ν = rapporto di Poisson,

P = carico applicato,

r = distanza della proiezione del punto in cui si studiano le tensioni dal punto di applicazione del carico,

R = distanza dal punto considerato al punto di applicazione del carico.

(1) Un'indagine per esaminare questo problema è stata condotta utilizzando un modello assialsimmetrico con elementi finiti [BARLA, 1971]. Si è potuto constatare che l'approssimazione introdotta, schematizzando il carico all'ancoraggio con un carico puntiforme, è accettabile in quanto interessa qui soprattutto l'azione globale del bullone.

La distribuzione delle tensioni in un semispazio indefinito, sottoposto ad un carico agente in un punto ad una certa distanza dalla superficie ed

di coordinate cilindriche avente come origine il punto simmetrico, rispetto alla superficie di separazione, del punto geometrico in cui è supposto

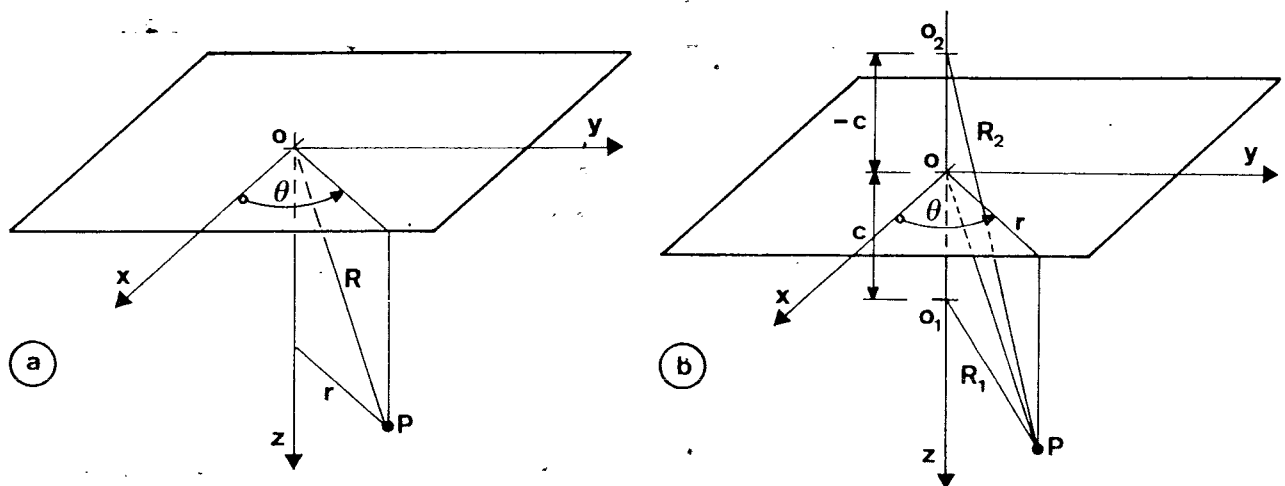


Fig. 2. - Sistemi di coordinate cilindriche: (a) problema di Boussinesq, (b) problema di Mindlin.

in direzione normale a questa, è stata data dal MINDLIN. Come è illustrato in fig. 2 (b), il sistema di riferimento usato dal MINDLIN è un sistema

applicato il carico.

Le tensioni σ_r , σ_θ , σ_z , τ_{rz} sono [WESTERGAARD, 1964]:

$$\sigma_r = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{3z_1^3}{R_1^5} - \frac{2(1+\nu)z_1}{R_1^3} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R(R+\bar{z})} + \frac{-2(5-7\nu)\bar{z} + 12(1-\nu)c}{R^3} + \frac{3(3-4\nu)\bar{z}^2 - 6(7-2\nu)c\bar{z} + 24c^2\bar{z}}{R^5} + \frac{30c\bar{z}^3(\bar{z}-c)}{R^7} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)z_1}{R_1^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R(R+\bar{z})} + \frac{(1-2\nu)(3-4\nu)\bar{z} - 6(1-2\nu)c}{R^3} + \frac{6(1-2\nu)c\bar{z} - 6c^2\bar{z}}{R^5} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[-\frac{3z_1^3}{R_1^5} - \frac{(1-2\nu)z_1}{R_1^3} + \frac{(1-2\nu)(\bar{z}-2c)}{R^3} + \frac{-3(3-4\nu)\bar{z}^3}{R^5} + \frac{12(2-\nu)c\bar{z}^2 - 18c^2\bar{z}}{R^5} - \frac{30c\bar{z}^3(\bar{z}-c)}{R^7} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{rz} = \frac{Pr}{8\pi(1-\nu)} \left[-\frac{3z_1^2}{R_1^5} - \frac{1-2\nu}{R_1^3} + \frac{1-2\nu}{R^3} + \frac{-3(3-4\nu)\bar{z}^2}{R^5} + \frac{6(3-2\nu)c\bar{z} - 6c^2}{R^5} - \frac{30c\bar{z}^2(\bar{z}-c)}{R^7} \right] \quad (8)$$

dove:

P e r hanno lo stesso significato chiarito in figura 2 (a),

c è la distanza del punto di applicazione della forza P dal piano di separazione,

z_1 ha origine in O_2 ,

\bar{z} ha origine in O_1 ,

R è la distanza OP ,

R_1 è la distanza O_2P .

Dovendo sovrapporre le due soluzioni è ora necessario operare un cambiamento di riferimento per una delle due soluzioni precedenti. Per comodità, nel lavoro che segue è conveniente ri-

portare le soluzioni del problema del MINDLIN al sistema di riferimento usato dal BOUSSINESQ con origine nel punto O (figura 2 a).

Le formule così ridotte diventano:

$$\sigma_r = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{3(z-c)^3}{R_1^5} - \frac{2(1+\nu)(z-c)}{R_1^3} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+c)} + \frac{-2(5-7\nu)(z+c) + 12(1-\nu)c}{R_2^3} + \right. \\ \left. + \frac{3(3-4\nu)(z+c)^3 - 6(7-2\nu)c(z+c)^2}{R_2^5} + \frac{24c^2(z+c)}{R_2^5} + \frac{30c(z+c)^3z}{R_2^7} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+c)} + \frac{(1-2\nu)(3-4\nu)(z+c) - 6(1-2\nu)c}{R_2^3} + \right. \\ \left. + \frac{6(1-2\nu)c(z+c)^2 - 6c^2(z+c)}{R_2^5} \right] \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{3(z-c)^3}{R_1^5} - \frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_1^3} + \frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_2^3} + \right. \\ \left. + \frac{-3(3-4\nu)(z+c)^3 + 12(2-\nu)c(z+c)^2 - 18c^2(z+c)}{R_2^5} - \frac{30c(z+c)^3z}{R_2^7} \right] \quad (11)$$

$$\tau_{rz} = \frac{Pr}{8\pi(1-\nu)} \left[-\frac{3(z-c)}{R_1^5} - \frac{1-2\nu}{R_1^3} + \frac{1-2\nu}{R_2^3} + \frac{-3(3-4\nu)(z+c)^2}{R_2^5} + \right. \\ \left. + \frac{6(3-2\nu)c(z+c) - 6c^2}{R_2^5} - \frac{30c(z+c)^2z}{R_2^7} \right] \quad (12)$$

dove si è posto:

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2}; R_1 = [r^2 + (z-c)^2]^{1/2}; R_2 = [r^2 + (z+c)^2]^{1/2}$$

Risultati numerici.

a) Analisi della distribuzione delle tensioni.

Vengono riportati nelle figg. 3 (a, b) e 4 (a, b) i diagrammi della tensione assiale σ_z , radiale σ_r e di taglio τ_{rz} , nonché quella di massimo taglio τ_{max} , tutte riferite al tiro applicato (P), per una data lunghezza del bullone ($L = 3,0$ m) e per un mezzo di costanti elastiche note ($E = 600.000$ kg/cm² e $\nu = 0,25$)⁽²⁾. Utilizzando questi diagrammi, è pos-

(2) Durante il calcolo numerico di queste tensioni si è condotta una verifica della validità delle formule teoriche prima ricavate. Essa consiste nel valutare lo stato di tensione sovrapponendo correttamente le due soluzioni precedenti con $c=0$. Dal momento che in questo caso le due forze sono applicate nello stesso punto e con verso opposto, il massiccio risulta conseguentemente privo di tensioni.

sibile fare alcune osservazioni sullo stato di tensione nell'intorno del bullone.

Si può notare dai diagrammi della tensione radiale e di quella assiale che si creano, sia in prossimità della superficie esterna che nella parte dietro l'ancoraggio, zone sottoposte a sollecitazioni di trazione (quelle tratteggiate in fig. 3 (a e b)). Nella porzione centrale, tra la piastra e l'ancoraggio, si notano invece tensioni assiali di compressione e radiali di trazione. Queste ultime determinano una zona di trazione, anch'essa indicata a tratto nel diagramma di fig. 3 (b).

Le tensioni tangenziali, riportate in fig. 4 (a), sono inferiori, in valore assoluto, sia a quelle radiali che alle assiali; le curve del taglio massimo di fig. 4 (b), analoghe alle isocromatiche che si possono ottenere in prove fotoelastiche, mostrano

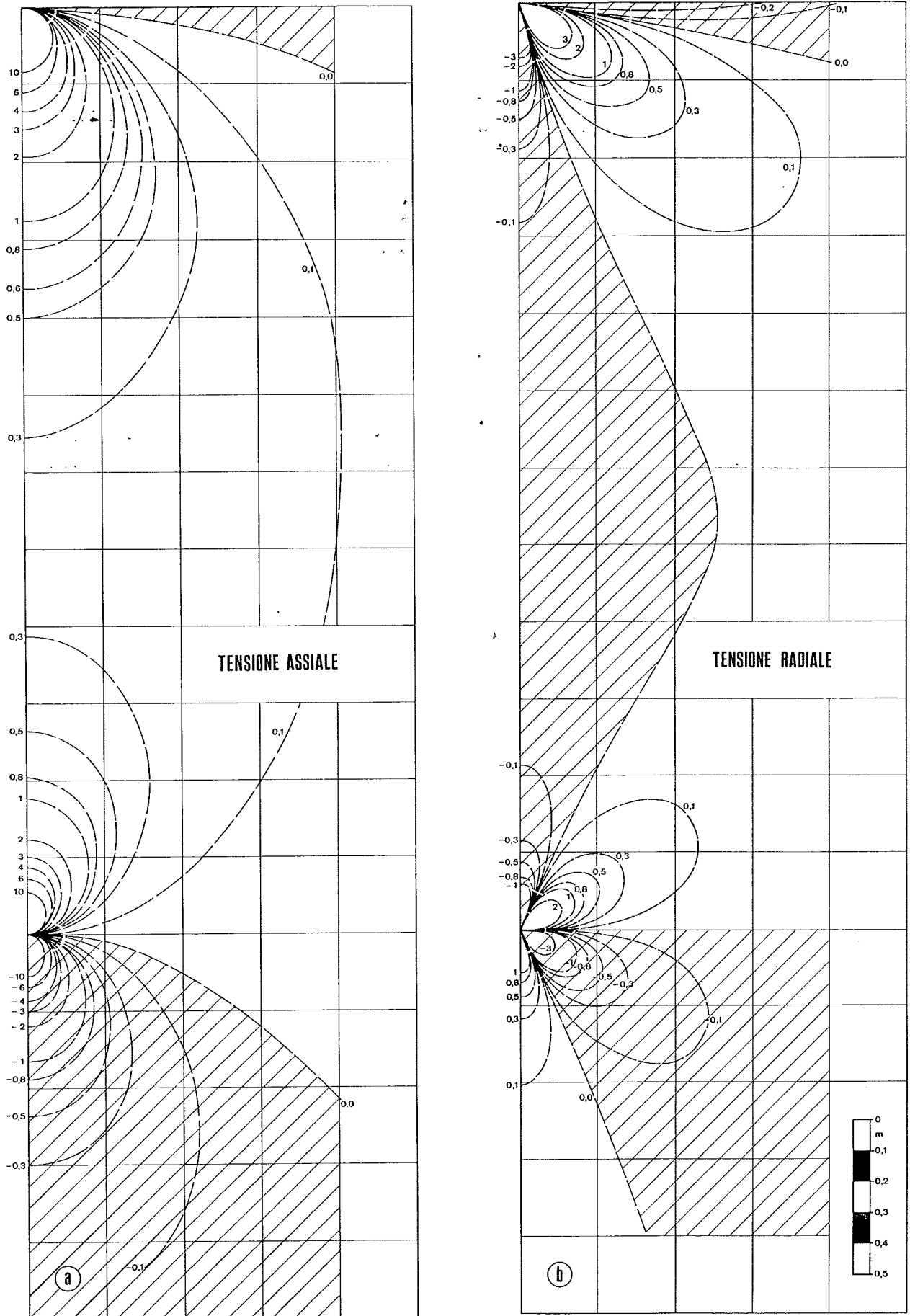


Fig. 3. - Isobare riferite al tiro applicato per un bullone di lunghezza 3,0 m: (a) tensione assiale, (b) tensione radiale.

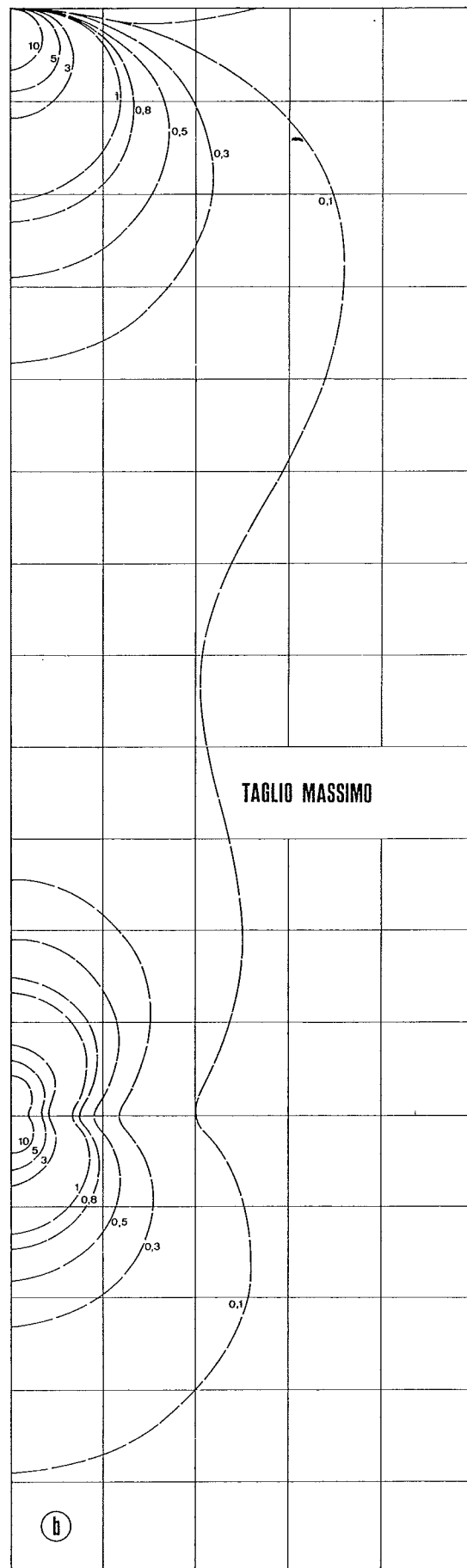
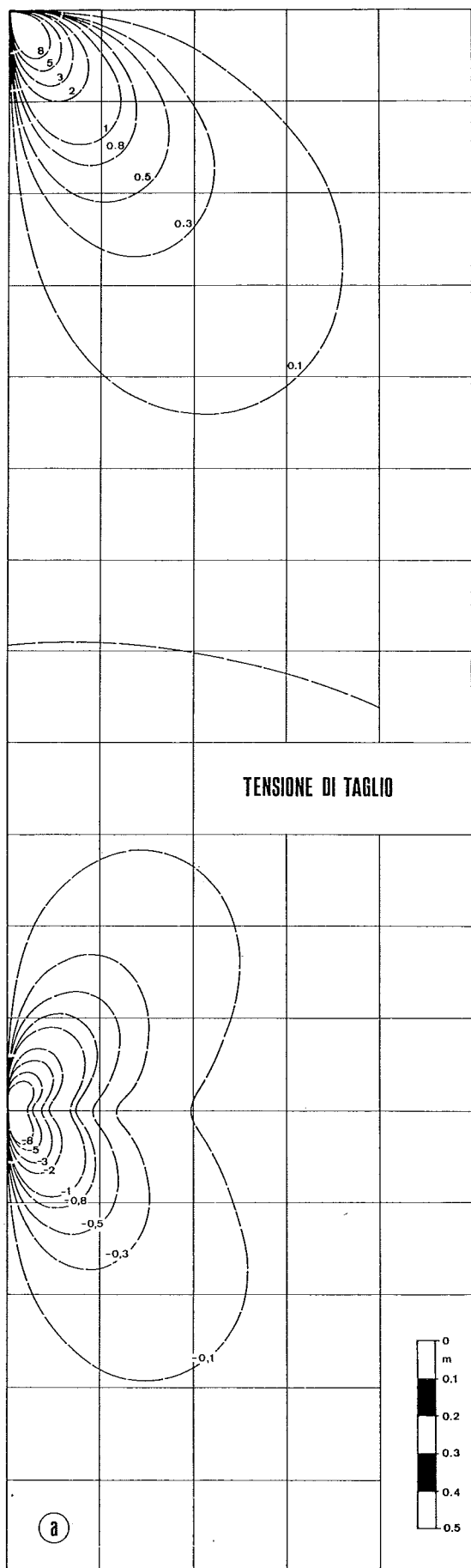


Fig. 4. - Isobare riferite al tiro applicato per un bullone di lunghezza 3,0 m: (a) tensione di taglio, (b) tensione di massimo taglio.

l'elevato gradiente delle tensioni in corrispondenza della piastra e dell'ancoraggio: questo gradiente si riduce molto rapidamente di intensità lontano dai punti di applicazione del carico.

b) Analisi di stabilità.

Sulla base dei risultati ottenuti per la distribuzione delle sollecitazioni, si possono definire, ricorrendo a diversi criteri di resistenza, le zone di rottura attorno ad un singolo bullone. Questo viene qui fatto con riferimento alla morfologia dell'ammasso roccioso e si considerano i due casi di ammasso: 1) omogeneo e 2) con giunti di stratificazione. Si può subito notare che mentre le tensioni calcolate mediante le equazioni (9), (10), (11) e (12) sono valide soltanto per un mezzo omogeneo, esse vengono qui usate anche nel caso di ammasso con giunti di stratificazione, sia perché mancano soluzioni teoriche in forma chiusa per un carico applicato all'interno di un ammasso stratificato, sia perché, pur tenendo conto delle approssimazioni che si introducono in questo studio, si pensa di fornire un'indagine di prima approssimazione assai realistica.

In tutti gli esempi che seguono si assumono, per il bullone, lunghezza e tiro costanti, uguali rispettivamente a 3,0 m e 15.000 kg. La zona di indagine intorno al bullone è limitata, come è illustrato in fig. 5, a 1,0 m a lato dell'asse del bullone e 1,0 m sopra l'ancoraggio: si usa una maglia quadrata di lato $\Delta x = \Delta y = 0,02$ m per l'ammasso roccioso omogeneo e con $\Delta x = \Delta y = 0,05$ m per quello con giunti di stratificazione.

b.1) Ammasso roccioso omogeneo.

I criteri di resistenza usati in questo caso sono i seguenti:

$$(a) \quad \sigma_s \leq - |T_o| \quad (14)$$

(criterio della trazione semplice)

$$(b) \quad \tau_{ott} \geq N + D \sigma_{ott} \quad (15)$$

(criterio della τ ottaedrica)

essendo [GOODMAN, 1968]:

$$N = 2 \sqrt{2} \tau_o \frac{\tan(45^\circ + \varphi/2)}{2 + \tan^2(45^\circ + \varphi/2)} \quad (16)$$

$$D = \frac{\sqrt{2} [\tan^2(45^\circ + \varphi/2) - 1]}{2 + \tan^2(45^\circ + \varphi/2)} \quad (17)$$

dove: σ_s , τ_{ott} e σ_{ott} sono rispettivamente la tensione principale minima e quelle ottaedriche di taglio e normale nell'ammasso, calcolate mediante le (9), (10), (11) e (12); $|T_o|$ è il valore assoluto

della resistenza a trazione monoassiale della roccia; τ_o e φ sono la resistenza al taglio per tensione normale nulla e l'angolo di attrito interno della roccia determinati mediante prove sperimentali a compressione triassiale.

Assumendo per la roccia $|T_o| = 5 \text{ kg/cm}^2$ (3), $\tau_o = 100 \text{ kg/cm}^2$ e $\varphi = 30^\circ$, si è ottenuto il diagramma di fig. 6 che riporta le zone di rottura attorno al bullone, distinte in base ai criteri sopra esposti. E' possibile osservare come la rottura sia in questo caso decisamente circoscritta attorno alla piastra ed all'ancoraggio (si tenga conto della

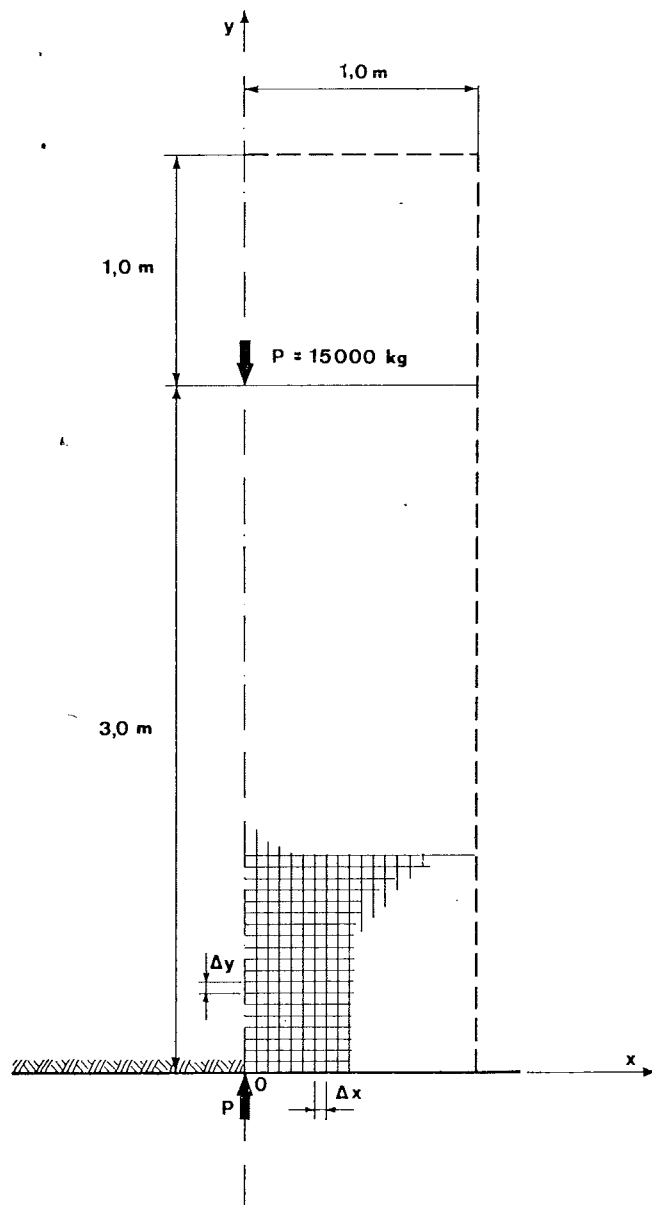


Fig. 5. - Zona di indagine intorno al bullone e maglie utilizzate nel calcolo.

(3) La bassa resistenza a trazione qui ipotizzata per la roccia ha lo scopo di mettere in luce l'azione del bullone su un ammasso roccioso fratturato.

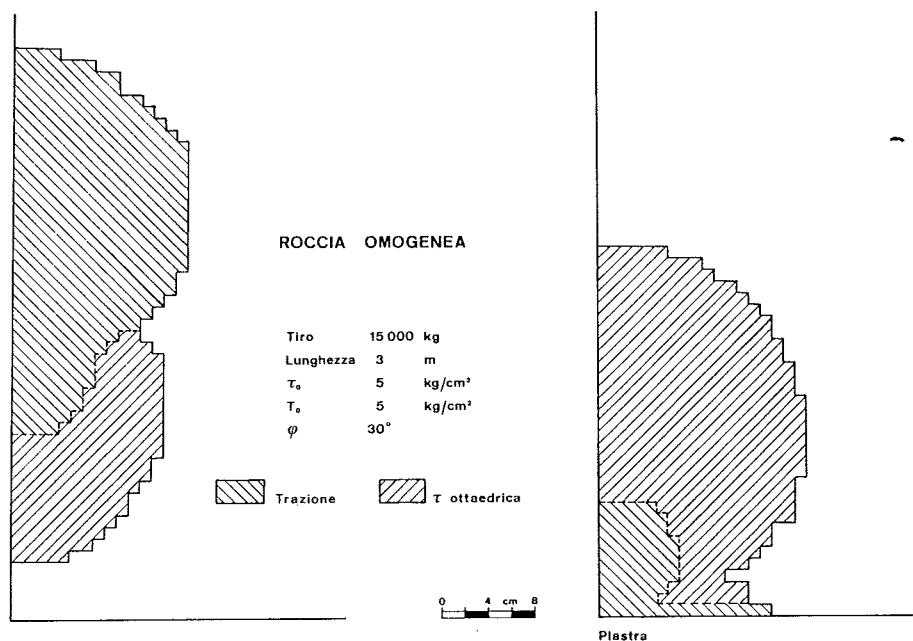


Fig. 6. - Zone di rottura attorno ad un bullone lungo 3,0 m e con un tiro di 15.000 kg — ammasso roccioso omogeneo ($|T_0| = 5 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_0 = 100 \text{ kg/cm}^2$ e $\varphi = 30^\circ$).

scala di rappresentazione usata in fig. 6 ed in evidente accordo con quanto si può presumere osservando i diagrammi precedenti per la distribuzione delle tensioni: le zone di rottura in base alla (15) sono situate nella regione prossima alla piastra ed in quella sotto l'ancoraggio; si ha rottura secondo la (14) sopra l'ancoraggio ed in corrispondenza della superficie dell'ammasso.

b.2) Ammasso contenente giunti di stratificazione.

La possibilità di scorrimento lungo i giunti di stratificazione viene esaminata ricorrendo al seguente criterio:

$$(c) \quad \tau_n \geq \sigma_n \operatorname{tg} \beta \quad (18)$$

(criterio di scorrimento lungo i giunti)

dove τ_n e σ_n sono la tensione di taglio e quella normale sui giunti (fig. 7), calcolate sempre ricorrendo alle (9), (10), (11) e (12); $\beta = \bar{\varphi} + \psi_r$ è un angolo ottenuto come somma dell'angolo di attrito $\bar{\varphi}$ lungo il giunto e dell'angolo di rugosità ψ_r [EWOLDSSEN e McNIVEN, 1969].

Oltre allo scorrimento lungo i giunti si è anche considerata la rottura di trazione in direzione normale ad essi valendosi, quando la tensione normale σ_n sia di trazione, dell'equazione

$$(d) \quad \sigma_n = 0 \quad (19)$$

(criterio di trazione sui giunti)

che postula per i giunti nessuna resistenza a trazione in direzione normale alla loro giacitura.

Allo stesso tempo si è anche tenuta presente la possibilità di rottura nella matrice di roccia com-

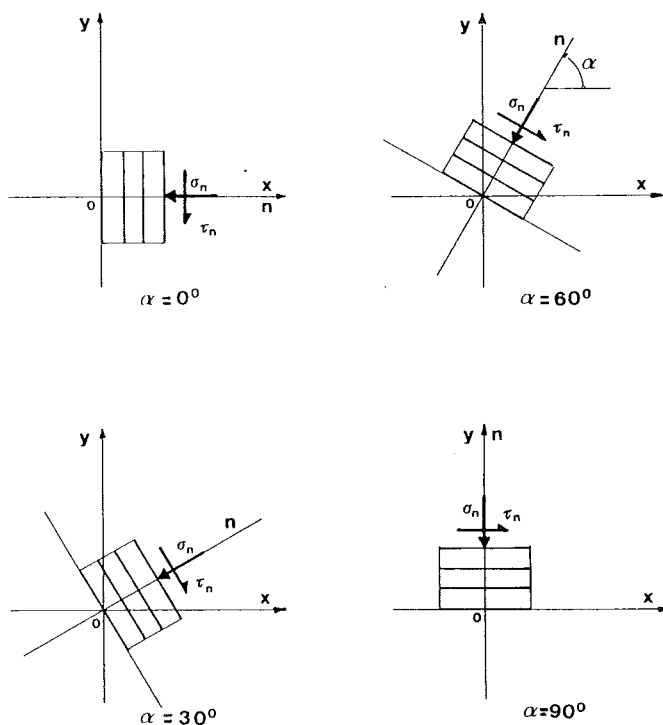


Fig. 7. - Casi esaminati per l'ammasso contenente giunti di stratificazione.

presa tra i giunti ricorrendo ancora alla (14), per le sole zone in cui non siano verificate le equazioni (18) e (19).

Nell'ipotesi che siano: $\bar{\varphi} = 30^\circ$, $\psi_r = 20^\circ$ e $|T_0| = 5 \text{ kg/cm}^2$ si sono esaminati i quattro casi schematizzati in fig. 7. I risultati così ottenuti sono illustrati nei diagrammi di figg. 8 e 9 dove si riportano le zone di rottura intorno al bullone. Co-

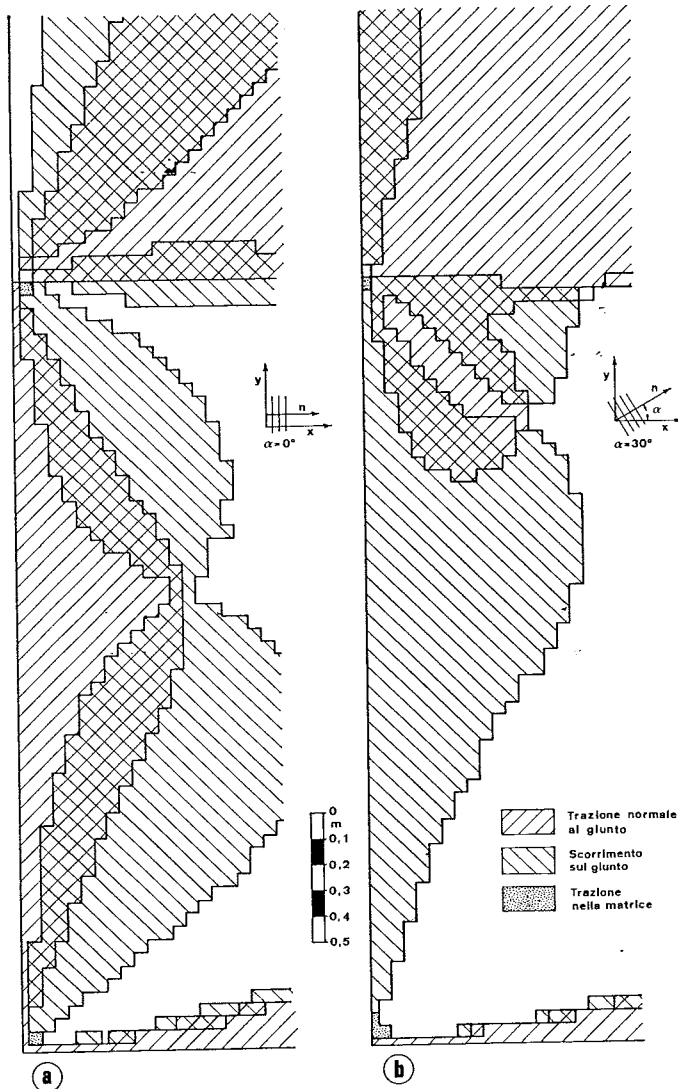


Fig. 8. - Zone di rottura attorno ad un bullone lungo 3,0 m e con un tiro di 15.000 kg — ammasso roccioso contenente giunti di stratificazione ($\bar{\varphi} = 30^\circ$, $\psi_r = 20^\circ$, per i giunti; $|T_o| = 5 \text{ kg/cm}^2$, per la matrice; resistenza a trazione nulla in direzione normale alla giacitura dei giunti): (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 30^\circ$.

me risulta da questi diagrammi, l'orientamento dei giunti influisce considerevolmente sull'ampiezza e sulla configurazione delle regioni in cui si ha rottura.

Esaminando questi diagrammi con maggiore dettaglio è possibile notare come per $\alpha = 0^\circ$ (figura 8 a) si abbia lungo l'asse del bullone e sopra l'ancoraggio, in accordo con l'andamento della tensione radiale (fig. 3), una zona di rottura, per tensioni di trazione in direzione normale al piano dei giunti. Lo scorrimento lungo i giunti sembra non interessare la roccia in prossimità dell'asse del bullone e si propaga lateralmente sino al margine fissato per l'indagine. In prossimità della superficie si osservano invece sia rotture per trazione che per scorrimento. Il diagramma di fig. 8 b, ottenuto per $\alpha = 30^\circ$, presenta una rottura per

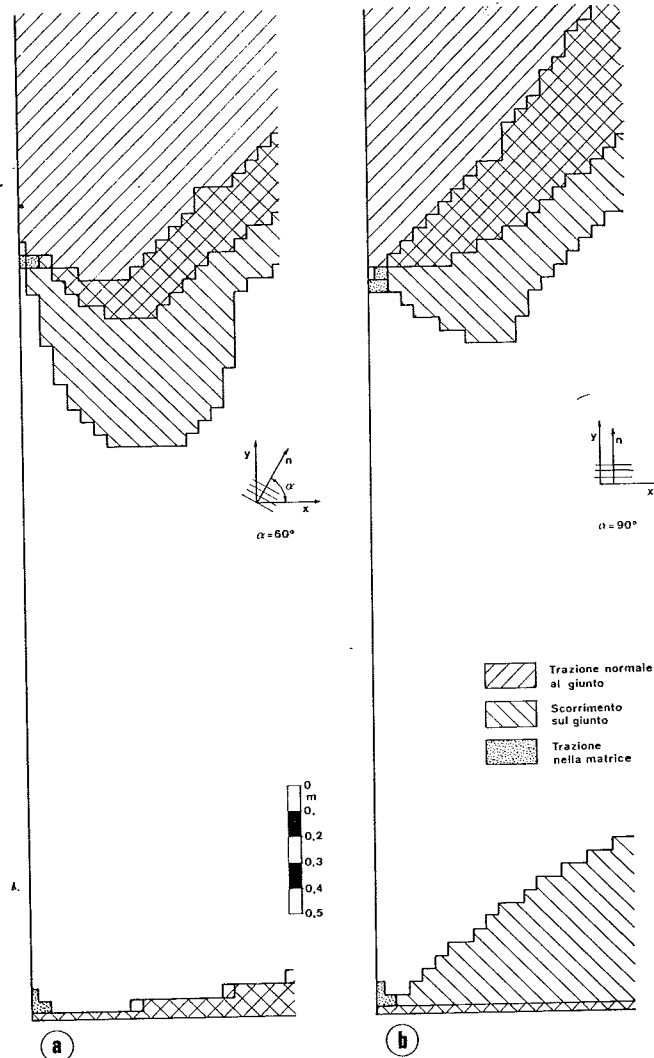


Fig. 9. - Zone di rottura attorno ad un bullone lungo 3,0 m e con un tiro di 15.000 kg — ammasso roccioso contenente giunti di stratificazione ($\bar{\varphi} = 30^\circ$, $\psi_r = 20^\circ$, per i giunti; $|T_o| = 5 \text{ kg/cm}^2$, per la matrice; resistenza a trazione nulla in direzione normale alla giacitura dei giunti): (a) $\alpha = 60^\circ$, (b) $\alpha = 90^\circ$.

scorrimento lungo i giunti che interessa tutta la roccia prossima all'asse del bullone ed una rottura di trazione che tende a spostarsi verso l'ancoraggio. Le rotture in vicinanza della superficie sono ora analoghe a quelle ottenute per $\alpha = 0^\circ$.

Il diagramma di fig. 9 (a) mostra come per $\alpha = 60^\circ$ le aree di rottura si restringano notevolmente rispetto ai due casi precedenti e rimangano circoscritte all'ancoraggio, tanto nel caso di scorrimento lungo i giunti quanto per trazione in direzione normale. La rottura in prossimità della superficie è in questo caso limitata e continua. Anche per $\alpha = 90^\circ$ (fig. 9 b) si osservano zone di rottura prossime all'ancoraggio; in particolare, è interessante notare come la rottura di trazione sia tutta isolata sopra il bullone in accordo con l'andamento della σ_z (fig. 3 b), che

d'altra parte giustifica anche la presenza di rottura della stessa natura alla superficie. Inoltre, in questo caso si hanno rotture per scorrimento in prossimità della piastra, che si estendono anche per una certa profondità.

In tutti i casi esaminati le zone di rottura per trazione nella matrice sono molto ridotte in estensione ed interessano soltanto le regioni prossime alla piastra ed all'ancoraggio.

Conclusioni.

Lo stato di tensione attorno ad un bullone in roccia è stato esaminato schematizzando la sua azione con due forze applicate in due punti distinti sulla superficie ed all'interno di un semispazio. Le soluzioni teoriche impiegate nel calcolo sono state ottenute sovrapponendo quelle note di BOUSSINESQ, che danno le tensioni in un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, sottoposto ad un carico normale alla superficie, e quelle di MINDLIN, valide per lo stesso carico agente con verso opposto in un punto all'interno del semispazio.

I diagrammi delle tensioni rivelano un effetto di concentrazione che si attenua allontanandosi dai punti di applicazione del carico; in particolare, i valori ottenuti nel caso esaminato consentono di affermare che, in presenza di tensioni preesistenti, l'effetto del bullone è significativo soltanto se queste tensioni non sono troppo elevate.

L'esame delle condizioni di rottura, condotto sia per un ammasso roccioso omogeneo avente bassa resistenza a trazione che per uno contenente giunti di stratificazione, consente di osservare come la rottura per trazione sia sempre circoscritta attorno all'ancoraggio e ad una zona superficiale presso la piastra. Si è notato, nel caso di ammasso stratificato, che l'orientamento dei giunti influisce considerevolmente sull'ampiezza e configurazione delle zone in cui si ha rottura per scorrimento.

Lo schema di calcolo adottato non tiene conto né delle condizioni di ancoraggio né dell'azione

della piastra; tuttavia, esso si rivelerà utile nelle applicazioni dove sarà sufficiente tenere conto dell'effetto globale prodotto dalla bullonatura.

BIBLIOGRAFIA

- BARLA G. (1970) - *On the distribution of stress around openings located in a rock mass*. Doctoral Dissertation, Columbia University, New York.
- BARLA G. (1971) - *Risultati di analisi con modello assial-simmetrico per elementi finiti*. Note non pubblicate del Laboratorio di Meccanica delle rocce, Politecnico, Torino.
- BOUSSINESQ J. (1885) - *Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Gauthier-Villars, Parigi.
- COATES D. F., COCHRANE T. S. (1970) - *Development of design specifications for rock bolting from research in Canadian mines*. 6th International Mining Congress, Madrid.
- CULVER R. S., JORSTAD T. (1967) - *Fracturing around a rock bolt anchor*. Ninth Symposium on Rock Mechanics, Golden.
- EWOLDSSEN H. M., MCNIVEN H. D. (1969) - *Rock bolting for structural support*. Part I and II. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6.
- GOODMAN R. E., EWOLDSSEN H. M. (1969) - *A design approach for rock bolt reinforcement in underground galleries*. International Symposium on Large Permanent Underground Openings, Oslo.
- LANG T. A. (1957) - *Rock behavior and rock bolt support in large excavations*. Underground Pozer Stations Symposium, A.S.C.E., Power Div.
- MINDLIN R.D. (1936) - *Force at a point in the interior of a semiinfinite solid*. Physics 7.
- OUDEHOOVEN M. S., OSEN L. (1967) - *Theoretical stress distribution near explosively expanded rock bolt anchors*. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 6890.
- PANEK L. A. (1962 a) - *The effect of suspension in bolting bedded mine roof*. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 6138.
- PANEK L. A. (1962 b) - *The combined effects of friction and suspension in bolting bedded mine roof*. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 6139.
- PANEK L. A. (1964) - *Design for bolting stratified roof*. A.I.M.E. Annual Meeting, New York.
- SINGH M. M., CHUGH Y. P. (1967) - *Design of roof installation in stratified deposits*. A.I.M.E. Annual Meeting, Los Angeles.
- STEFANKO R. (1962) - *Static anchorage efficiency of roof bolts*. A.I.M.E. Annual Meeting, New York.
- WESTERGAARD H. M. (1964) - *Theory of elasticity and plasticity*. Dover, Londra.

S U M M A R Y

A theoretical study on rock bolting of underground openings - Part. I. The distribution of stress around a single bolt.

A brief review of the present knowledge on rock bolting of underground openings is given. The state of stress around a single bolt is studied by known solutions of the classical theory of elasticity. Different strength criteria

are used in order to analyze the rupture zones around a bolt located either in a homogeneous or stratified rock mass. Numerical results are reported for known rock strength properties. The present contribution is a part of a research work carried on with the main purpose of evaluating the influence of the parameters which enter the analysis of rock bolting schemes for underground openings of given shapes.