

Indagine teorica sulla bullonatura di gallerie

II. Metodo per l'analisi di stabilità

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

SOMMARIO: Si illustra un metodo per l'analisi delle sollecitazioni attorno a vuoti sotterranei bullonati. Considerato l'ammasso come omogeneo, isotropo e linearmente elastico, si determinano con metodi analitici gli sforzi dovuti ai bulloni; le tensioni dovute allo scavo sono invece valutate ricorrendo al metodo degli elementi finiti. Sovrapponendo opportunamente i due campi di sforzi si conduce un'analisi di stabilità basata su un confronto tra le zone di frattura prima e dopo la bullonatura. Viene considerata sia la roccia omogenea, sia la roccia avente giunti di diversa inclinazione per due tipi di scavo: galleria a sezione rettangolare; galleria a sezione bicentrica. Si valuta l'influenza, sulle condizioni di stabilità, dei diversi parametri caratteristici della bullonatura: spaziatura, lunghezza e tiro.

Introduzione

Dopo aver esaminato nella prima parte di questa indagine [BARLA *et al.*, 1972] la distribuzione delle sollecitazioni nell'intorno di un bullone singolo, ancorato all'interno di un ammasso roccioso in direzione normale alla superficie di scavo, si presenta di seguito un metodo di calcolo che consente di valutare l'influenza dei diversi parametri che intervengono nella scelta dello schema di bullonatura di gallerie di cui sia nota la sezione. Si estendono i concetti teorici sviluppati nella prima parte e si applica la tecnica, introdotta originariamente da McNIVEN e EWOLDSSEN [1969] nello studio di gallerie aventi sezioni circolari, a gallerie di sezione qualsiasi: questo si ottiene adottando il metodo degli elementi finiti per il calcolo delle tensioni esistenti intorno allo scavo prima della bullonatura.

Si studia l'azione congiunta di uno schema di bullonatura (consistente in un certo numero di bulloni posti ad una distanza costante, dei quali sia precisata la lunghezza ed il tiro applicato), in quanto generante uno stato di tensione localizzato, con la distribuzione delle tensioni attorno allo scavo dovute a forze naturali, sia gravitazionali che tettoniche, considerate costanti ed uguali a quelle preesistenti allo scavo, al centro della galleria.

E' noto che i bulloni modificano la distribuzione delle tensioni nel mezzo circostante la galleria, limitatamente ad una zona prossima al contorno; per valutare la loro efficacia, si propone di condurre un'analisi di stabilità, che consiste

sia nella determinazione dello stato di sollecitazione preesistente che di quello indotto dalla bullonatura, sia in un confronto delle zone di frattura indotte nei due casi nell'ammasso roccioso, che potrà essere considerato omogeneo o stratificato.

Le ipotesi introdotte nel calcolo possono così riassumersi in breve: *a)* il mezzo deve essere elastico; *b)* si deve adottare in ciascun caso una geometria specifica della bullonatura; *c)* l'intervento della bullonatura deve seguire immediatamente lo scavo in modo da potere garantire un'effettiva azione di sostegno; *d)* non si considera l'effetto del tempo relativamente alla legge di variazione delle tensioni indotte.

Definizione del problema e metodo di soluzione

Analisi della distribuzione delle tensioni

Si consideri, con riferimento alla figura 1, che illustra in (c) la sezione trasversale di una galleria bullonata di forma geometrica data, il problema di determinare lo stato di tensione risultante (σ_{ij}) nel punto P, dovuto sia all'azione dei bulloni che all'apertura dello scavo. Questo problema può essere risolto secondo lo schema di calcolo della stessa figura 1, valutando separatamente i due effetti: *a)* lo stato di tensione dovuto allo scavo (σ_{ij})_g e *b)* lo stato di tensione indotto dai bulloni (σ_{ij})_b, e poi sovrapponendoli in modo appropriato in base a criteri che vengono discussi qui di seguito.

a) Lo stato di tensione dovuto allo scavo.

Rimanendo nel campo dei metodi teorici, lo stato di tensione intorno alla galleria può essere

* Prof. Dott. Ing. Giovanni BARLA, Dott. Ing. Pierfranco BRIZIO e Dott. Ing. Masantonio CRAVERO, Istituto di *Arte Mineraria*, Politecnico di Torino.

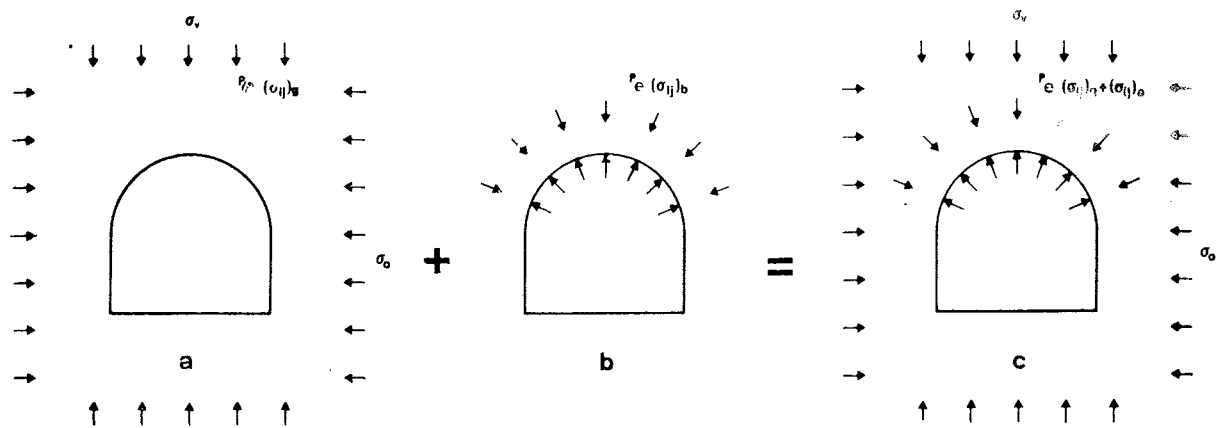


Fig. 1. — Definizione del problema.

determinato ricorrendo sia a metodi analitici che numerici. I primi presentano il vantaggio di fornire una soluzione in forma chiusa ed i risultati che se ne possono derivare danno le sollecitazioni con dettaglio pressoché illimitato. Essi presentano però lo svantaggio di essere applicabili soltanto per forme di gallerie regolari e geometricamente semplici. I metodi numerici, e tra questi il metodo degli elementi finiti, consentono in particolare di ovviare a questa difficoltà, sacrificando limitatamente la precisione conseguita ed il dettaglio dell'analisi; conseguentemente questo metodo verrà impiegato nel presente lavoro in modo che la valutazione dello schema di bullonatura, secondo i criteri qui esposti, sia possibile indipendentemente dalla geometria della galleria.

Mediante il metodo degli elementi finiti si determina lo stato di tensione $(\sigma_{ij})_g$ nel punto P di figura 1; questo è fatto una volta che siano state scelte, secondo i criteri ormai noti [BARLA, 1970], precise condizioni da imporre sul contorno della struttura, in modo che lo stato di sollecitazione preesistente allo scavo della galleria (definito da σ_v e σ_0) sia convenientemente riprodotto. Per semplicità di lavoro, i modelli per elementi finiti qui impiegati sono piani e le tensioni nel punto P sono definite dal calcolo delle seguenti componenti del tensore delle sollecitazioni $\{\sigma\}_g$, riferito al sistema di coordinate $(0, x, y, z)$ solidale con la galleria (fig. 2):

$$\{\sigma\}_g = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

La tensione σ_z nella direzione dell'asse della gal-

leria, definita dalla condizione di deformazione piana, è data da:

$$\sigma_x = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2)$$

dove ν è il rapporto di Poisson della roccia.

b) Lo stato di tensione indotto dai bulloni.

La determinazione del tensore delle sollecitazioni $(\sigma_{ij})_b$ nello stesso punto P richiede invece la scelta di un procedimento di calcolo da considerare in dettaglio volendo tener conto, nella sua valutazione, dell'effetto di quei bulloni, appartenenti alla galleria, che determinano questo stato di tensione.

Si incominci con il considerare l'effetto di un solo bullone $0'_k 0''_k$ di figura 2 (k indica il numero del bullone). L'azione di quest'ultimo può essere rappresentata con due forze, di verso opposto e di uguale intensità T , applicate in $0'_k$ (piastra) e $0''_k$ (ancoraggio). Si trascuri l'influenza della curvatura in prossimità di $0'_k$ e si supponga che il bullone sia applicato in direzione normale alla superficie di scavo. Lo stato di tensione nel punto P può essere calcolato, con riferimento al sistema di coordinate cilindriche (r, θ, z) , scelto con l'asse z coincidente con l'asse del bullone, ricorrendo alle formule teoriche utilizzate nella prima parte della presente nota [BARLA *et al.*, 1972]. Si introduca, come è stato fatto in figura 2, un sistema di coordinate cartesiane rettangolari $(0'_k, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ con origine nel punto $0'_k$.

Siano $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ e τ_{rz} le tensioni non nulle dovute al bullone, calcolate mediante le (9), (10), (11) e (12) riportate nella prima parte. Il passaggio da queste tensioni alle $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{xz}$ e $\bar{\tau}_{yz}$, riferite al sistema $(0'_k, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, è dato dalle seguenti equazioni di trasformazione:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_x = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta \\ \bar{\sigma}_y = \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta \\ \bar{\sigma}_z = \sigma_z \\ \bar{\tau}_{xy} = (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin \theta \cos \theta \\ \bar{\tau}_{xz} = (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin \theta \\ \bar{\tau}_{yz} = \tau_{rz} \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

dove

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\bar{x}_p}{\sqrt{\bar{x}_p^2 + \bar{y}_p^2}} \quad (4)$$

Sia $(0, x, y, z)$ il sistema di coordinate rettangolari di figura 2, scelto solidalmente con la galleria ed in modo che il punto P appartenga al piano xy e che l'asse z coincida con l'asse della galleria. Si osservi che in tal modo le tensioni $\{\sigma_{ij}\}_e$, calcolate con il metodo degli elementi finiti, sono riferite a questo stesso sistema di coordinate. Poiché la sovrapposizione dei due effetti viene convenientemente eseguita con riferimento

Da considerazioni sulla figura 2 si ottiene

$$\begin{cases} \bar{x}_p = (x_p - x_{o'}) |i \times | \bar{i} + (y_p - y_{o'}) |j \times | \bar{j} + (z_p - z_{o'}) |k \times | \bar{k} \\ \bar{y}_p = (x_p - x_{o'}) |i \times | \bar{j} + (y_p - y_{o'}) |j \times | \bar{j} + (z_p - z_{o'}) |k \times | \bar{j} \\ \bar{z}_p = (x_p - x_{o'}) |i \times | \bar{k} + (y_p - y_{o'}) |j \times | \bar{k} + (z_p - z_{o'}) |k \times | \bar{k} \end{cases} \quad (5)$$

dove i prodotti scalari sono definiti dalla seguente tabella di coseni direttori:

	i	j	k
$ \bar{i}$	$-\cos \alpha \sin \gamma$ a_{11}	$\sin \alpha$ a_{12}	$-\cos \gamma \cos \alpha$ a_{13}
$ \bar{j}$	$-\cos \gamma$ a_{21}	θ a_{22}	$\sin \gamma$ a_{23}
$ \bar{k}$	$\sin \alpha \sin \gamma$ a_{31}	$\cos \alpha$ a_{32}	$\sin \alpha \cos \gamma$ a_{33}

e gli angoli α e γ usati sono quelli indicati ancora in figura 2.

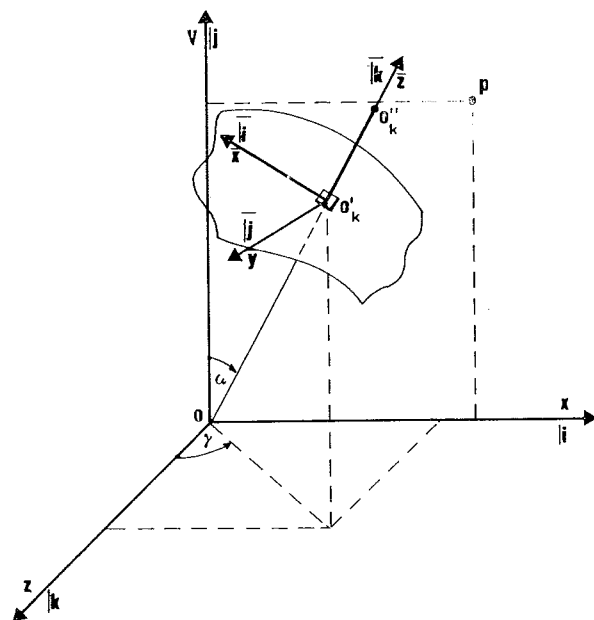


Fig. 2. — Sistemi di riferimento impiegati.

al sistema $(0, x, y, z)$, sarà necessario ritrovare le equazioni di trasformazione dal sistema $(0', \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ a quello $(0, x, y, z)$.

Si ha quindi:

$$\begin{cases} \bar{x}_p = (x_p - x_{o'}) (-\cos \alpha \sin \gamma) + (y_p - y_{o'}) \sin \alpha + (z_p - z_{o'}) \cos \gamma \sin \alpha \\ \bar{y}_p = (x_p - x_{o'}) (-\cos \gamma) + (z_p - z_{o'}) \sin \gamma \\ \bar{z}_p = (x_p - x_{o'}) \sin \alpha \sin \gamma + (y_p - y_{o'}) \cos \alpha + (z_p - z_{o'}) (-\sin \alpha \cos \gamma) \end{cases} \quad (7)$$

per cui il passaggio dal tensore $(\bar{\sigma}_{ij})$, riferito al sistema $(0', \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, a quello (σ_{ij}) riferito a $(0, x, y, z)$, è definito dalla seguente equazione di trasformazione:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{21}^2 & a_{31}^2 & 2a_{21}a_{31} & 2a_{11}a_{31} & 2a_{11}a_{21} \\ a_{12}^2 & a_{22}^2 & a_{32}^2 & 2a_{22}a_{32} & 2a_{12}a_{32} & 2a_{12}a_{22} \\ a_{13}^2 & a_{23}^2 & a_{33}^2 & 2a_{33}a_{23} & 2a_{13}a_{33} & 2a_{13}a_{23} \\ a_{12}a_{13} & a_{22}a_{23} & a_{32}a_{33} & (a_{22}a_{33} + a_{32}a_{23}) & (a_{12}a_{33} + a_{32}a_{13}) & (a_{12}a_{23} + a_{22}a_{13}) \\ a_{11}a_{13} & a_{21}a_{23} & a_{31}a_{33} & (a_{21}a_{33} + a_{31}a_{23}) & (a_{11}a_{33} + a_{31}a_{13}) & (a_{11}a_{23} + a_{21}a_{13}) \\ a_{11}a_{12} & a_{22}a_{21} & a_{31}a_{32} & (a_{21}a_{32} + a_{31}a_{22}) & (a_{11}a_{32} + a_{31}a_{12}) & (a_{11}a_{22} + a_{21}a_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\sigma}_z \\ \bar{\tau}_{yz} \\ \bar{\tau}_{xz} \\ \bar{\tau}_{xy} \end{bmatrix}$$

dove i coseni direttori a_{ij} sono dati ancora nella tabella (6).

Si distinguono ora con l'indice k le tensioni nel punto considerato, dovute soltanto al k -esimo bullone. Le sollecitazioni $\{\sigma\}_b$ nel punto P saranno così date da:

$$\{\sigma\}_b = \sum_{k=1}^N \{\sigma\}_k \quad (9)$$

dove la sommatoria deve essere estesa ai bulloni che generano correttamente lo stato di tensione in P . L'indice N , variabile in funzione del punto, viene stabilito secondo un criterio che permette la valutazione corretta dell'effetto dei bulloni che influenzano lo stato di tensione in P . Nel corso del calcolo è quindi necessario stabilire dei criteri che consentano di tenere conto dell'effetto dei soli bulloni che influenzano correttamente lo stato di tensione nel punto P .

c) Lo stato di tensione risultante

Essendosi ricavato in *b*) lo stato di tensione indotto dai bulloni, sarà ora necessario sovrapporlo a quello $\{\sigma\}_g$ derivante, in seguito allo scavo della galleria, dai carichi naturali gravanti sull'ammasso e calcolato in *a*) mediante il metodo degli elementi finiti. Si ha per lo stesso punto P e con riferimento al sistema $(0, x, y, z)$:

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= \{\sigma\}_g + \{\sigma\}_b = \\ &= \{\sigma\}_g + \sum_{k=1}^N \{\sigma\}_k. \end{aligned} \quad (10)$$

La somma dei due termini indicati in (10) deve essere eseguita con una certa cautela. Infatti si osservi che, mentre il calcolo dello stato di tensione dovuto ai bulloni può essere eseguito con notevole dettaglio, anche molto vicino ai punti di applicazione dei carichi, la determinazione delle tensioni dovute alla galleria può essere effettuata solo in punti, il cui numero è in ogni caso limitato dal reticolo scelto nel modello con elementi finiti. D'altra parte, l'impiego qui fatto di elementi triangolari con tre nodi ai vertici che danno tensioni costanti all'interno di ciascun elemento, fa sì che sia impossibile conseguire in ogni caso la precisione ottenuta nella determinazione delle tensioni in prossimità di zone ad elevato gradiente mediante il calcolo analitico che dà $\{\sigma\}_b$.

Lo schema di calcolo prospettato in *a*), *b*), e *c*) può così riassumersi in breve:

(1) calcolo di $\{\sigma\}_g$, mediante il metodo degli elementi finiti, in tutti i punti della sezione in

cui interessa determinare lo stato di tensione risultante;

(2) calcolo per ciascun punto P , mediante le (7), delle sue coordinate riferite al sistema di coordinate $(0'_k, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, solidale al bullone considerato e loro trasformazione, mediante le (13) della prima parte e la (4) precedente, in coordinate cilindriche (r, θ, z) ;

(3) determinazione nello stesso punto P delle tensioni $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ e $\tau_{r\theta}$ mediante le (9), (10), (11), (12) della prima parte e passaggio con

la (3) alle $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{xz}$ e $\bar{\tau}_{yz}$ da cui infine, con la (8) e (6), si passa alle $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ e τ_{yz} ;

(4) ripetizione del procedimento da (2) a (3) per tutti i bulloni N e determinazione, in ciascun punto P , di $\{\sigma\}_b$ con la (9);

(5) sovrapposizione, punto per punto, mediante la (10) dello stato di tensione determinato in (1) e (4).

d) Galleria con sezione rettangolare

Le formule dei paragrafi precedenti possono essere ricavate in due casi particolari con riferimento a gallerie di sezione avente forma geometrica di interesse in applicazioni di diverso tipo: quella rettangolare e quella a volta bicentrica. In particolare, si tornerà, nei due casi, al calcolo della (9) relativamente alla estensione della sommatoria.

Si incominci col considerare la galleria con sezione rettangolare riportata in figura 3. Nel-

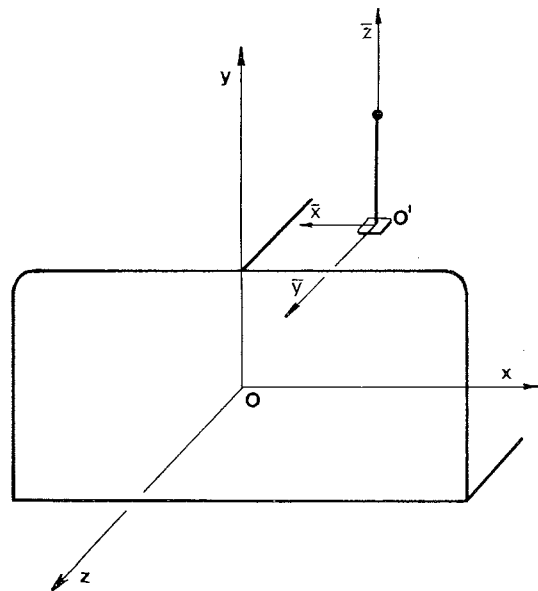


Fig. 3. — Sezione della galleria rettangolare - Sistemi di riferimento.

l'ipotesi che i bulloni siano applicati in direzione normale al tetto della galleria, si ha:

$$\begin{aligned} |i| &= -|\bar{i}|; \quad |j| = |\bar{k}|; \quad |k| = |\bar{j}| \\ \alpha &= 0; \quad \gamma = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

per cui le equazioni (7) diventano:

$$\begin{cases} \bar{x}_p = (x_{o'} - x_p) \\ \bar{y}_p = (z_p - z_{o'}) \\ \bar{z}_p = (y_p - y_{o'}) \end{cases} \quad (12)$$

Le sollecitazioni dovute a ciascun bullone si considerano localizzate entro un cilindro di raggio noto R_c (raggio d'influenza del bullone); infatti il confronto tra le tensioni $\{\sigma\}_b$, prodotte in un punto P, calcolate con questa ipotesi, e quelle calcolate considerando l'effetto di tutti i bulloni, non mostra sensibili variazioni. Questa limitazione permette di abbreviare il tempo di calcolo e la sommatoria (9) è estesa solo agli N bulloni i cui cilindri contengono il punto di indagine P. L'appartenenza di P al cilindro si deduce dal confronto tra il raggio R_c e la distanza (in pianta) di P dall'asse del bullone secondo la: $R_c^2 \geq \bar{x}_p^2 + \bar{y}_p^2$.

Si ottiene invece per la (8):

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_z \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\tau}_{yz} \\ \bar{\tau}_{xy} \\ \bar{\tau}_{xz} \end{pmatrix} \quad (13)$$

e) Galleria con sezione a due centri di curvatura
Si consideri successivamente la galleria di

Le equazioni (8) diventano in questo caso:

$$\begin{cases} \sigma_x = \bar{\sigma}_x \begin{cases} \cos^2\alpha \\ \sin^2\beta \end{cases} - \bar{\tau}_{xz} \begin{cases} 2\sin\alpha \cos\alpha \\ 2\sin\beta \cos\beta \end{cases} + \bar{\sigma}_z \begin{cases} \sin^2\alpha \\ \cos^2\beta \end{cases} \\ \sigma_y = \bar{\sigma}_x \begin{cases} \sin^2\alpha \\ \cos^2\beta \end{cases} + \bar{\tau}_{xz} \begin{cases} 2\sin\alpha \cos\alpha \\ 2\sin\beta \cos\beta \end{cases} + \bar{\sigma}_z \begin{cases} \cos^2\alpha \\ \sin^2\beta \end{cases} \\ \tau_{yz} = \bar{\tau}_{xy} \begin{cases} \sin\alpha \\ \cos\beta \end{cases} + \bar{\tau}_{yz} \begin{cases} \cos\alpha \\ \sin\beta \end{cases} \\ \tau_{zx} = \bar{\tau}_{yz} \begin{cases} \sin\alpha \\ \cos\beta \end{cases} - \bar{\tau}_{xy} \begin{cases} \cos\alpha \\ \sin\beta \end{cases} \\ \tau_{xy} = -\bar{\sigma}_x \begin{cases} \cos\alpha \sin\alpha \\ \sin\beta \cos\beta \end{cases} + \bar{\tau}_{yz} \begin{cases} 2\sin^2\alpha - 1 \\ 2\cos^2\beta - 1 \end{cases} + \bar{\sigma}_z \begin{cases} \sin\alpha \cos\alpha \\ \sin\beta \cos\beta \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

figura 4 dove si suppone che la volta possieda due centri di curvatura O_1 ed O_2 . Si ha ora (figura 2):

$$|i| \neq |\bar{i}|; \quad |k| = |\bar{j}|; \quad |j| \neq |\bar{k}|; \quad \gamma = \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

In questo caso le (7) danno:

$$\begin{cases} \bar{x}_p = (x_p - x_{o'}) \cdot \begin{cases} -\cos\alpha \\ -\sin\beta \end{cases} + (y_p - y_{o'}) \cdot \begin{cases} -\sin\alpha \\ -\cos\beta \end{cases} \\ \bar{y}_p = z_p - z_{o'} \\ \bar{z}_p = (x_p - x_{o'}) \cdot \begin{cases} \sin\alpha \\ \cos\beta \end{cases} + (y_p - y_{o'}) \cdot \begin{cases} \cos\alpha \\ \sin\beta \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

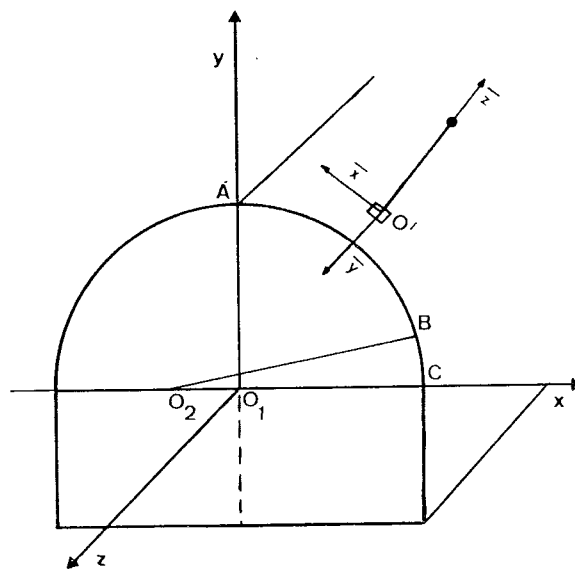


Fig. 4. — Sezione della galleria bicentrica - Sistemi di riferimento.

dove si sceglie caso per caso l'espressione contenente α o β , a seconda che il bullone cui si riferisce il calcolo sia situato nella porzione AB (con centro O_1) o in quella BC (con centro O_2) della volta.

Come per la galleria a sezione rettangolare, si inienda ora considerare il problema di determinare un criterio valido per la definizione del raggio della sommatoria nella equazione (9). Si supponga che per ciascun bullone sia possibile considerare uno stato di tensione localizzato in un cono circolare coassiale al bullone, con vertice nel centro della galleria e con angolo di apertura ω , e che al di fuori di questo cono le tensioni abbiano valori pressoché trascurabili⁽¹⁾.

Ne segue che nel corso del calcolo di $\{\sigma\}_p$ nel punto P, secondo il procedimento descritto nei paragrafi precedenti, la sommatoria dovrà comprendere soltanto gli N bulloni i cui coni contengono nel loro interno il punto P.

Si noti poi che nella valutazione dello stato di tensione risultante in P si deve tener conto non solo dell'effetto dei bulloni posti nella sezione cui P appartiene, ma anche di quelli delle sezioni che la precedono e la seguono.

Si consideri, come è illustrato in figura 5, il cono con vertice in O_1 , ed avente per asse il bullone $O_k' O_k''$ appartenente alla sezione generica $z = z_0$. Se il punto P (x_p, y_p, z_p) appartiene al cono, esso deve trovarsi su una retta per lo stesso punto e per il vertice del cono, avente intersezioni reali con la sfera inscritta nel cono e centro in O_k'' .

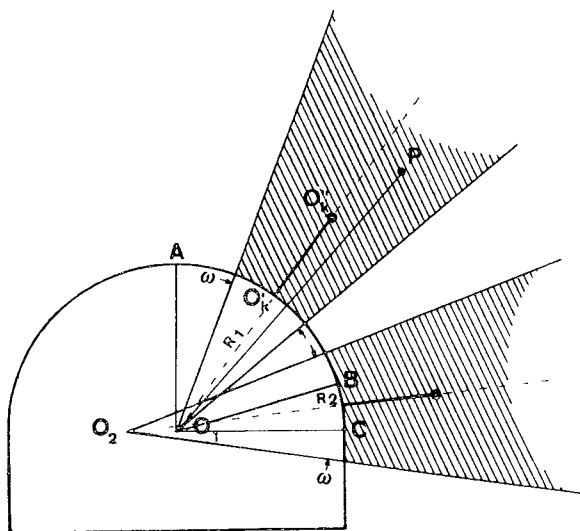


Fig. 5. — Zona d'influenza di un bullone.

(1) Si tratta in ciascun caso di fissare il valore dell'angolo ω . Ciò è possibile mediante lo studio della distribuzione delle tensioni nell'intorno di un bullone singolo, di cui sia nota la lunghezza. Negli esempi di calcolo che seguono si è posto $\omega/2 = 20^\circ$, ottenendo così risultati soddisfacenti.

(2) Il simbolo (1, 2) si riferisce ai due centri di curvatura.

Si ha per la retta OP⁽²⁾.

$$\frac{x - x_p}{x_p - x_0(1,2)} = \frac{y - y_p}{y_p - y_0(1,2)} = \frac{z - z_0}{z_p - z_0(1,2)} \quad (17)$$

La sfera con centro in O_k' ($R \sin \psi, R \cos \psi, z_0$) e tangente al cono ha per equazione

$$(x - R \sin \psi)^2 + (y - R \cos \psi)^2 + (z - z_0)^2 = R^2 \sin^2 \omega \quad (18)$$

La (17) consente di scrivere tralasciando il simbolo (1,2)

$$y = \frac{x(y_p - y_0)}{x_p - x_0} + \frac{x_p y_0 - x_0 y_p}{x_p - x_0} \quad (19)$$

$$z = \frac{x(z_p - z_0)}{x_p - x_0} + \frac{x_p z_0 - x_0 z_p}{x_p - x_0}$$

che sostituite nella (18) danno:

$$x^2(A^2 + C^2 + 1) + 2x(AB - AE - CF + CD - G) + (B^2 + D^2 + E^2 + F^2 + G^2 - 2BE - 2DF - N) = 0 \quad (20)$$

dove si è posto:

$$A = \frac{y_p - y_0}{x_p - x_0}$$

$$B = \frac{x_p y_0 - x_0 y_p}{x_p - x_0}$$

$$C = \frac{z_p - z_0}{x_p - x_0}$$

$$D = \frac{x_p z_0 - z_p x_0}{x_p - x_0} \quad (21)$$

$$E = R \cos \psi$$

$$F = R \sin \psi$$

$$G = z_0$$

$$N = R^2 \sin^2 \omega$$

Questa equazione di secondo grado ammetterà per un ben determinato valore delle sue costanti e cioè per valori dati delle coordinate del punto P e del vertice del cono, radici reali soltanto se è:

$$(AB - AE + CD - CF - G)^2 - (A^2 + C^2 + 1)(E^2 + G^2 + B^2 + D^2 + F^2 - 2BE - 2DF - N) = 0 \quad (22)$$

Il ragionamento condotto sopra è valido anche per i raggi di curvatura variabili sul contorno della galleria; risultano allora variabili nella stessa sezione i seguenti parametri; O_1 , centro di curvatura; R = raggio di curvatura; ψ = angolo sot-

teso da archi di uguale raggio. In particolare, per la galleria a due centri, qui studiata, il raggio di curvatura assume due valori distinti, indicati in figura 5 con R_1 ed R_2 , a seconda che il bullone considerato sia situato lungo AB o lungo BC, mentre all'angolo ψ vengono dati in corrispondenza i valori α e β .

Esempi di calcolo

Il procedimento prima descritto viene utilizzato per ricavare lo stato tensionale e la configurazione delle zone di rottura al contorno di due particolari sezioni di scavo: *a*) sezione rettangolare (figura 6 a), *b*) sezione a due centri di curvatura (figura 6 b). Si considerano per le due schematizzazioni sia il caso di roccia omogenea sia quello di roccia con giunti; viene pure esaminata l'influenza dei singoli parametri della bullonatura. I calcoli vengono condotti mediante il programma « GALBC » scritto per l'elaboratore IBM/1800 del Politecnico di Torino(*); esso utilizza per l'analisi di stabilità, le tensioni, preventivamente calcolate con un programma per elementi finiti [BARLA, 1970] e memorizzate su disco.

a) Sezione rettangolare.

Con riferimento alla sezione di figura 6 a) si è costruito un modello ad elementi finiti triangolari (379 triangoli, 218 nodi); parte di questo modello è riportata in figura 7 dove è mostrato sovrapposto al reticolo a maglie quadrate ($\Delta x = \Delta y = 0,1$ m) di 725 punti utilizzato per il calcolo di $\{\sigma\}_g$. Lo schema di bullonatura utilizzato (fig. 8) prevede l'uso di bulloni di lunghezza L , disposti secondo una maglia quadrata di lato S e serrati con un tiro T .

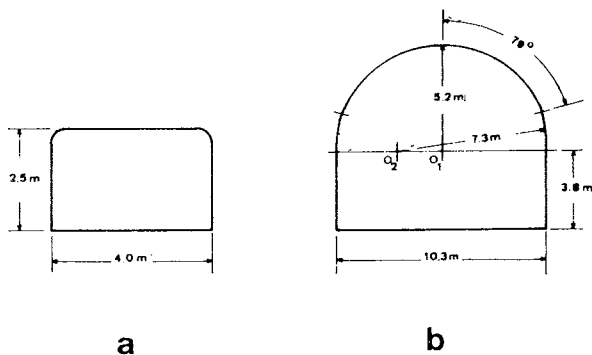


Fig. 6. — Tipi di gallerie considerate: a) galleria rettangolare; b) galleria bicentrica.

(*) La lista di questo programma non viene riportata per motivi di spazio. Essa è comunque disponibile presso il Politecnico di Torino, Meccanica delle Rocce - Applicazioni geonumeriche.

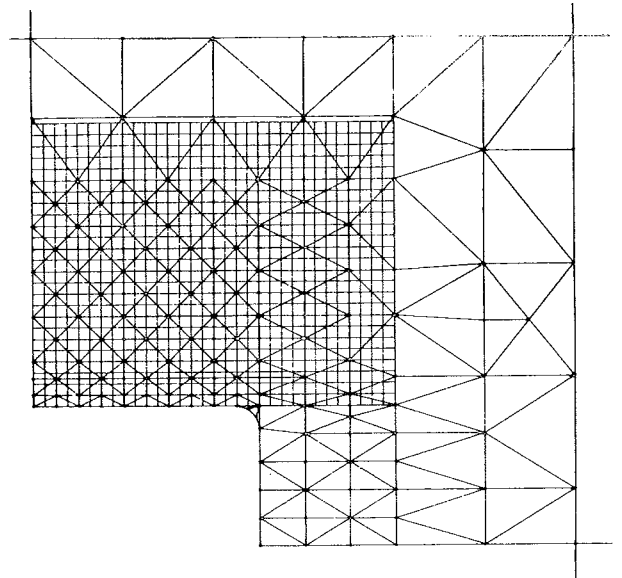


Fig. 7. — Galleria rettangolare: parte del modello ad elementi finiti nell'intorno della galleria e reticolo d'indagine a maglie quadrate.

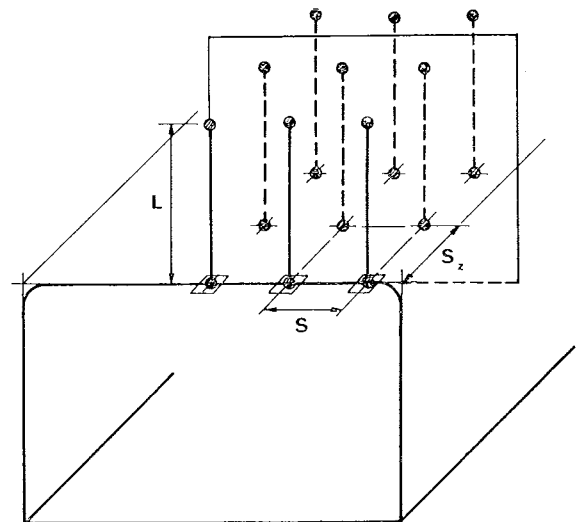


Fig. 8. — Schema di bullonatura nella galleria rettangolare.

Definito con $\sigma_v = 50$ kg/cm² e $\sigma_o = 15$ kg/cm² lo stato di tensione naturale nell'ammasso indisturbato in condizione di deformazione piana e stabiliti per i parametri della bullonatura: $L = 2,0$ m, $S = 0,8$ m, $T = 15,0$ t si è condotta la determinazione delle sollecitazioni $\{\sigma\}_g$ e $\{\sigma\}_b$ in una sezione trasversale contenente cinque bulloni.

La figura 9 illustra in a, b e c gli andamenti della tensione verticale σ_v , della tensione orizzontale σ_x e di quella di taglio massimo τ_{MAX} , dovute alla bullonatura; si può notare come l'azione dei bulloni produca un elevato gradiente delle tensioni nei punti di applicazione dei carichi in accordo con i risultati ottenuti nella parte I.

Se si considera in particolare l'effetto di trazione, si nota che esso è localizzato con diverso

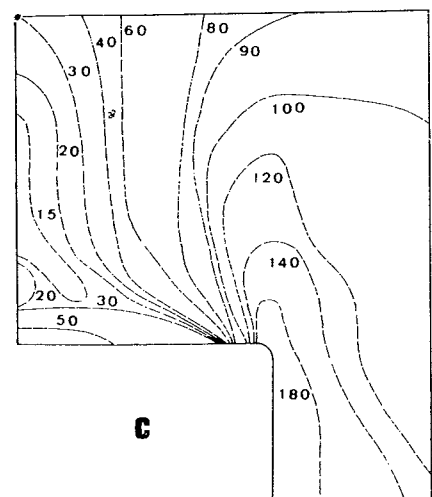
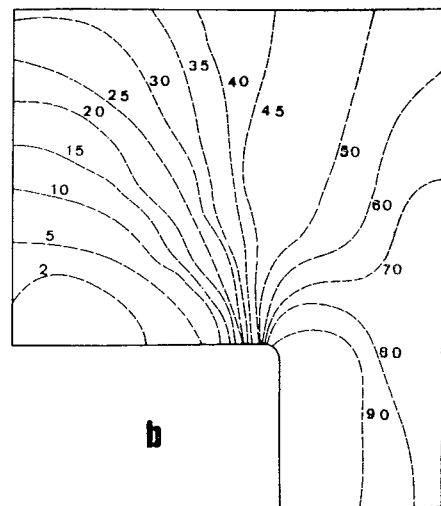
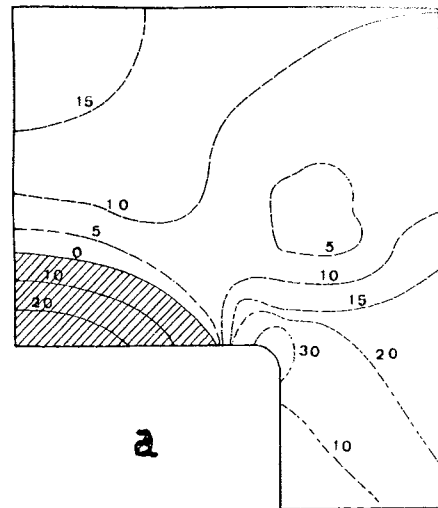
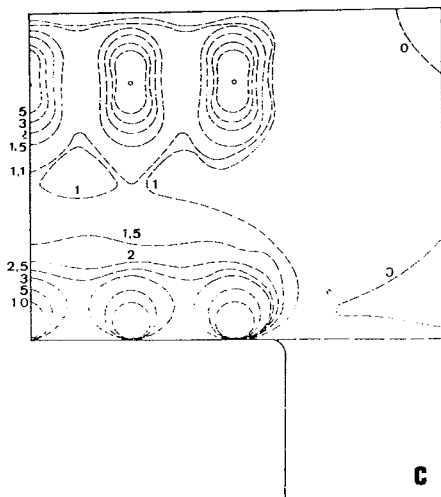
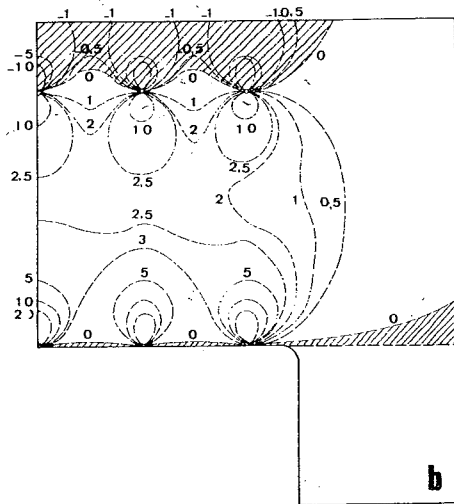
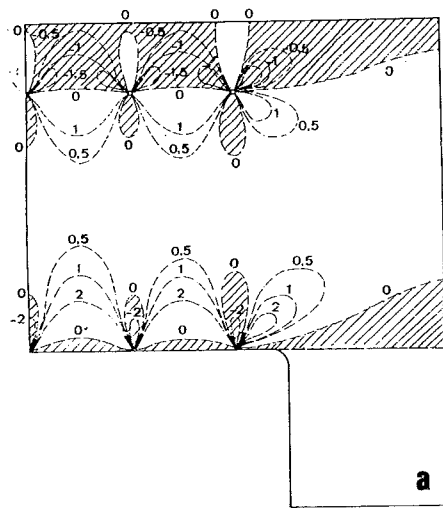


Fig. 9. — Tensioni dovute alla bullonatura: a) tensione orizzontale σ_x ; b) tensione verticale σ_y ; c) tensione di massimo taglio τ_{max} .

sviluppo in alcune zone (tratteggiate); in modo esteso al di sopra dell'ancoraggio; limitato alla zona corticale in prossimità delle piastre di ripar-

Fig. 10. — Tensioni dovute alla gravità: a) tensione orizzontale σ_x ; b) tensione verticale σ_y ; c) tensione di massimo taglio τ_{max} .

tazione del carico; con modesta entità lungo l'asse del bullone. Considerando quindi l'effetto prodotto dallo scavo (fig. 10 a, b e c) si individuano zone

di trazione in calotta e concentrazione delle tensioni in corrispondenza al raccordo parete-volta.

Dalle tensioni così ricavate è possibile definire, nell'ambito delle ipotesi fatte, lo stato di tensione risultante $\{\sigma\} = \{\sigma\}_g + \{\sigma\}_b$ (fig. 1); da utilizzare poi nelle considerazioni di stabilità prodotte sulla base dei criteri di resistenza già descritti nella parte I.

Fissate per la roccia le seguenti caratteristiche: resistenza a trazione $T_0 = 5 \text{ kg/cm}^2$; coesione $\tau_0 = 10 \text{ kg/cm}^2$; angolo di attrito $\varphi = 30^\circ$; angolo di rugosità $\varphi_r = 20^\circ$; si definiscono le zone di rottura in presenza ed in assenza della bullonatura.

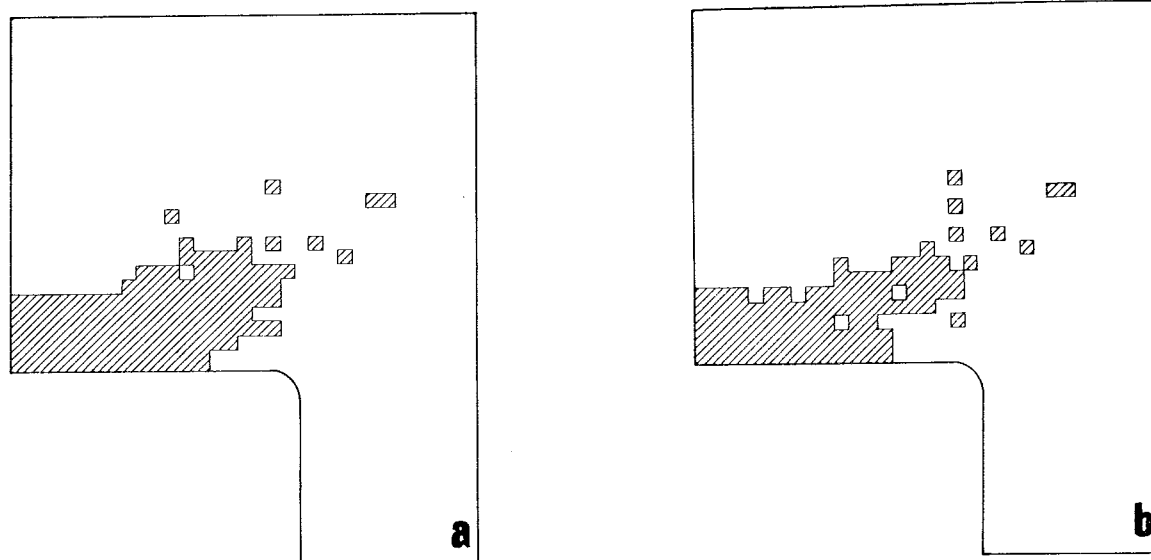


Fig. 11. — Zona di rottura in roccia omogenea: a) prima; b) dopo la bullonatura.

tura. In roccia omogenea (fig. 11 a e b) la frattura avviene solo in accordo al criterio della massima resistenza a trazione e, nella sua forma, la zona di frattura segue pressapoco l'andamento delle isobare di trazione. Se l'ammasso contiene giunti (figg. 12 a e b, 13 a e b), il loro orientamento ha invece una notevole incidenza sullo sviluppo delle zone di frattura: per $\alpha = 0^\circ$ (fig. 12), giunti verticali, prevalgono le rotture per scorrimento e la frattura per trazione normale al giunto è individuata in prossimità della volta; per $\alpha = 90^\circ$ (fig. 13), giunti orizzontali, l'estensione e la disposizione delle zone di frattura, è decisamente mutata a favore della stabilità. L'azione dei bulloni, determinante per giunti orizzontali, non porta pratici vantaggi per quelli verticali; in entrambi

i casi i bulloni inducono sopra l'ancoraggio frattura per trazione normale al piano dei giunti.

b) Sezione a due centri di curvatura.

La sezione trasversale della galleria considerata (figura 6 b) ha le seguenti caratteristiche geometriche: centri di curvatura allineati sull'orizzontale; raggio di curvatura maggiore 7,26 m; raggio di curvatura minore 5,20 m; angolo sotteso all'arco di curvatura minore $79^\circ,4$; altezza di parete 3,75 m. Il modello ad elementi finiti utilizzato nel calcolo è costituito da 498 triangoli e 289 nodi ed è illustrato in parte nella figura 14. La stessa

 Scorrimento sul giunto

figura riporta il reticolo di indagine impiegato per il calcolo di $\{\sigma\}_b$; questo reticolo, per meglio adeguarsi al contorno, utilizza due maglie polari per un totale di 893 punti nella parte curva ed una maglia quadrata di 190 punti in parete. I rispettivi passi di incremento sono $\Delta r = 26,5 \text{ cm}$; $\Delta\theta = 1,9^\circ$ e $\Delta x = \Delta y = 26,5 \text{ cm}$.

La disposizione dei bulloni è normale alla superficie di scavo ed è definita nell'esempio considerato dai parametri: lunghezza bulloni, $L = 3,0 \text{ m}$; passo tra due bulloni consecutivi, $S = 2,6 \text{ m}$; distanza tra due sezioni bullonate, $S_s = 0,5 \text{ m}$; tiro applicato, $T = 25,0 \text{ t}$ (figura 15). Gli andamenti della tensione circonferenziale σ_θ , radiale σ_r e di massimo taglio τ_{MAX} , vengono riportati nei diagrammi di figura 16 a, b e c. Le

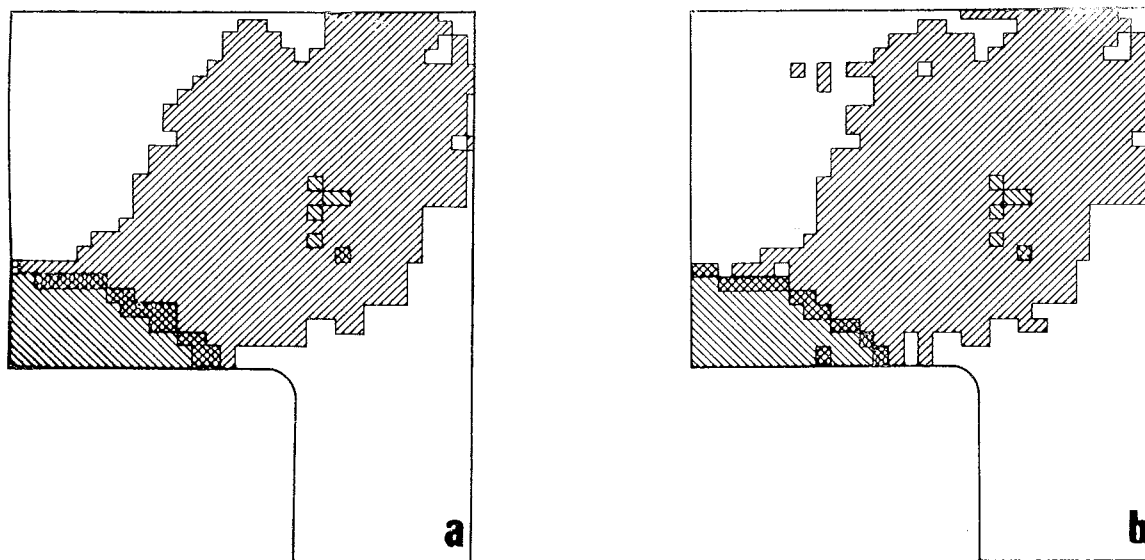


Fig. 12. — Zone di rottura in roccia con giunti (inclinazione $\alpha = 0^\circ$): a) prima; b) dopo la bullonatura.

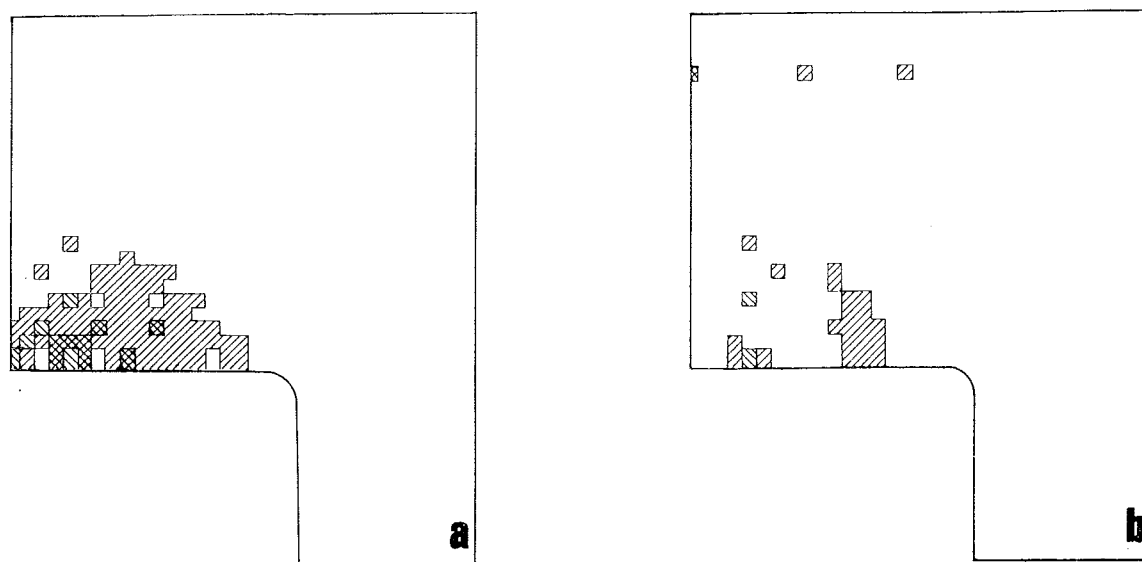


Fig. 13. — Zone di rottura in roccia con giunti (inclinazione $\alpha = 90^\circ$): a) prima; b) dopo la bullonatura.

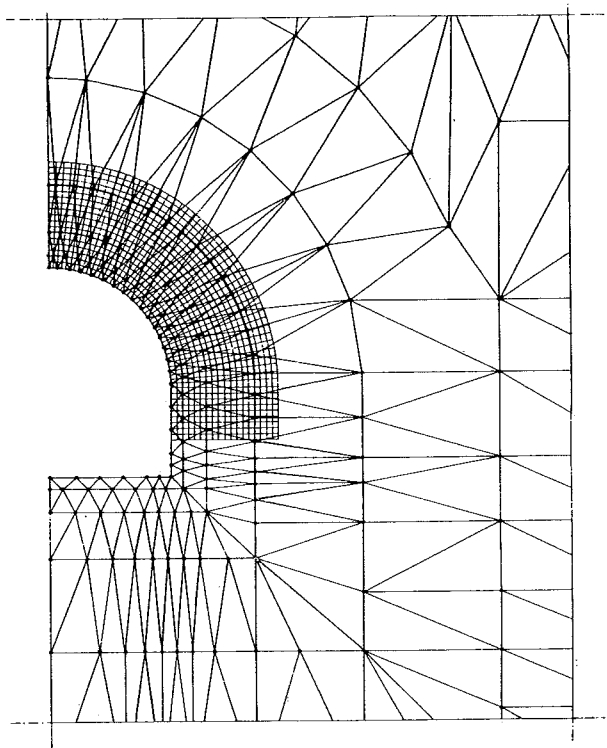


Fig. 14. — Galleria bicentrica parte del modello ad elementi finiti nell'intorno della galleria e reticolo d'indagine a maglie quadrate e a maglie polari.

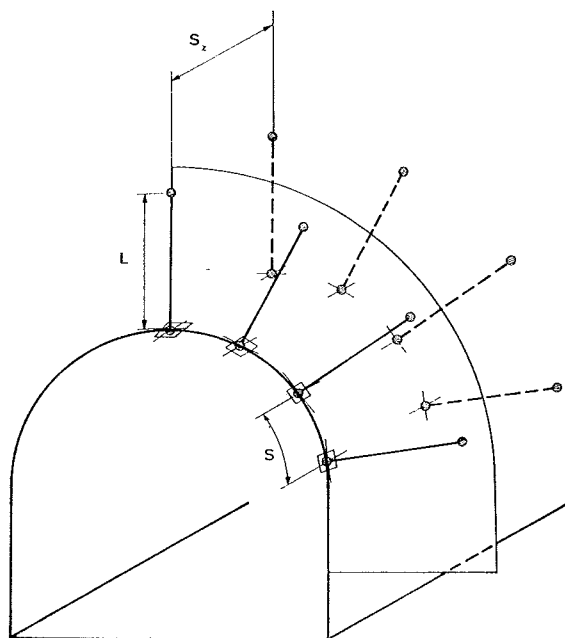


Fig. 15. — Schema di bullonatura nella galleria bicentrica.

stesse tensioni dovute poi ad una situazione di carichi naturali, fissata in $\sigma_v = 40 \text{ kg/cm}^2$ e $\sigma_o = 4 \text{ kg/cm}^2$, sono riportate in figura 17 a, b e c. Per entrambe le serie di diagrammi sono possibili considerazioni analoghe a quelle fatte nel caso di scavo rettangolare.

Attribuendo alla roccia le stesse caratteristiche

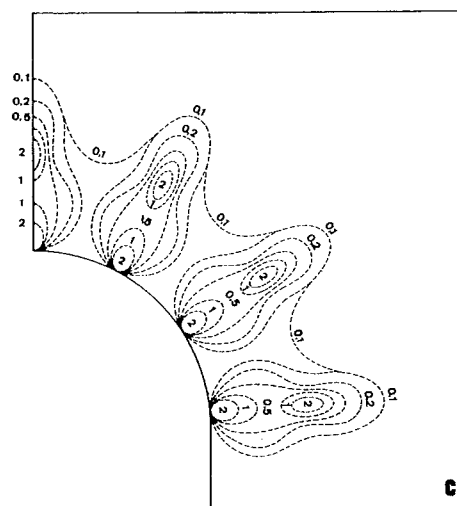
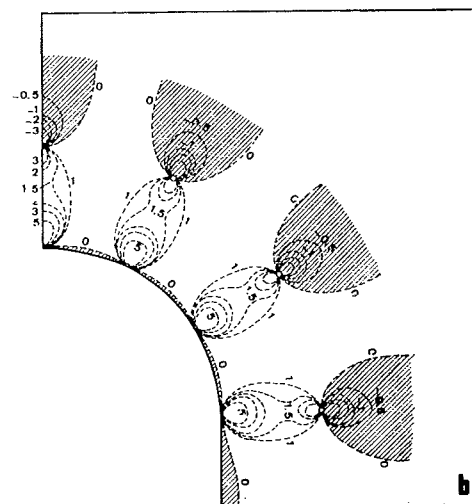
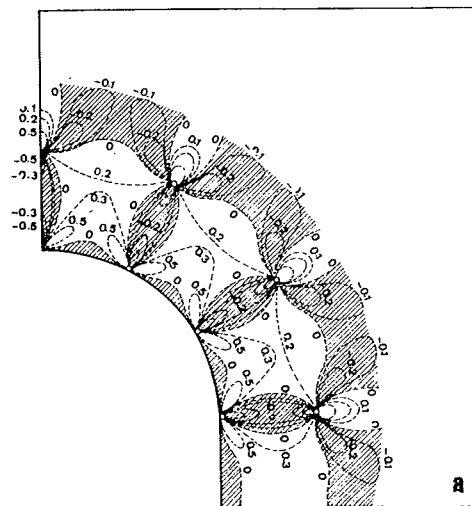


Fig. 16. — Tensioni dovute alla bullonatura: a) tensione tangenziale σ_θ ; b) tensione radiale σ_r ; c) tensione di massimo taglio τ_{\max} .

di resistenza del caso a) si è condotto, con riferimento all'ammasso roccioso omogeneo e all'ammasso contenente giunti, un confronto tra le zone di frattura per sezione priva di bulloni e per

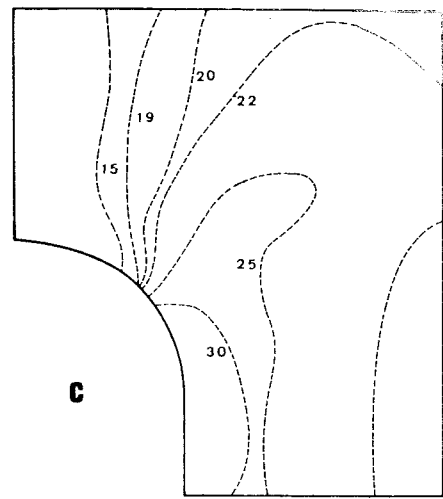
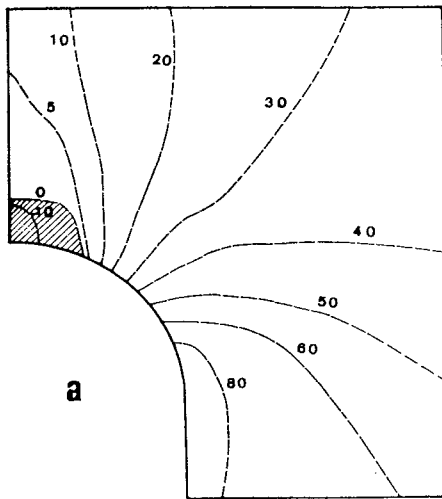
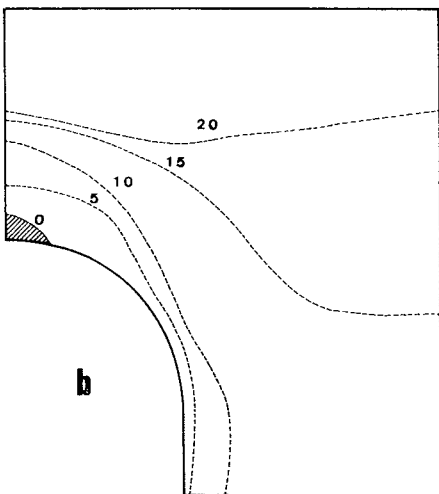
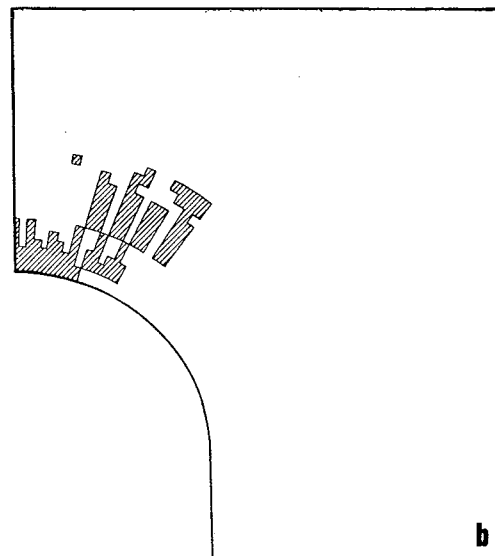
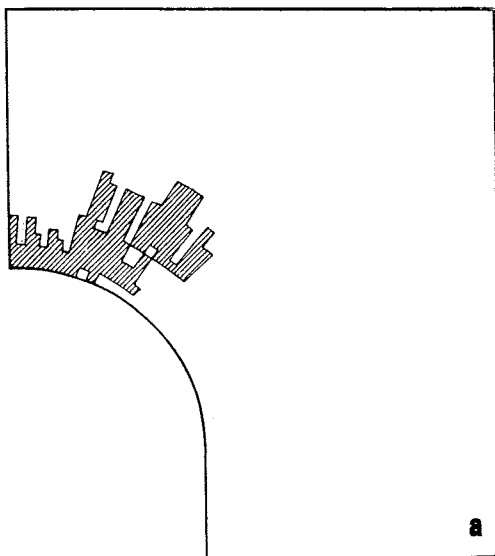


Fig. 17. — Tensioni dovute alla gravità: a) tensione tangenziale σ_{θ} ; b) tensione radiale σ_r ; c) tensione di massimo taglio τ_{\max} .

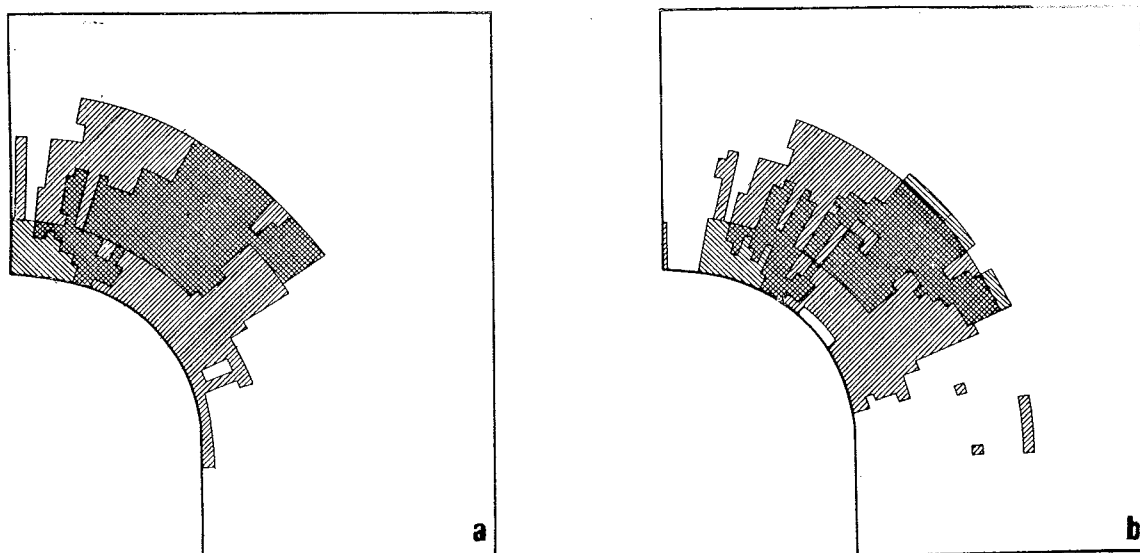


sezione bullonata. La figura 18 a e b si riferisce alla roccia omogenea; quelle 19 a e b e 20 a e b riguardano la roccia con giunti aventi rispettivamente orientazione $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$. Per l'ammasso omogeneo la frattura avviene solo secondo i criteri di trazione e l'azione dei bulloni riesce a limitarne l'estensione. Per giunti verticali, $\alpha = 0^\circ$, si genera una rottura molto estesa sia per trazione normale che per scorrimento, ma l'azione dei bulloni ne limita l'ampiezza riducendo il cedimento nella zona di corona. La disposizione orizz-



 Trazione

Fig. 18. — Zone di rottura in roccia omogenea: a) prima; b) dopo la bullonatura.





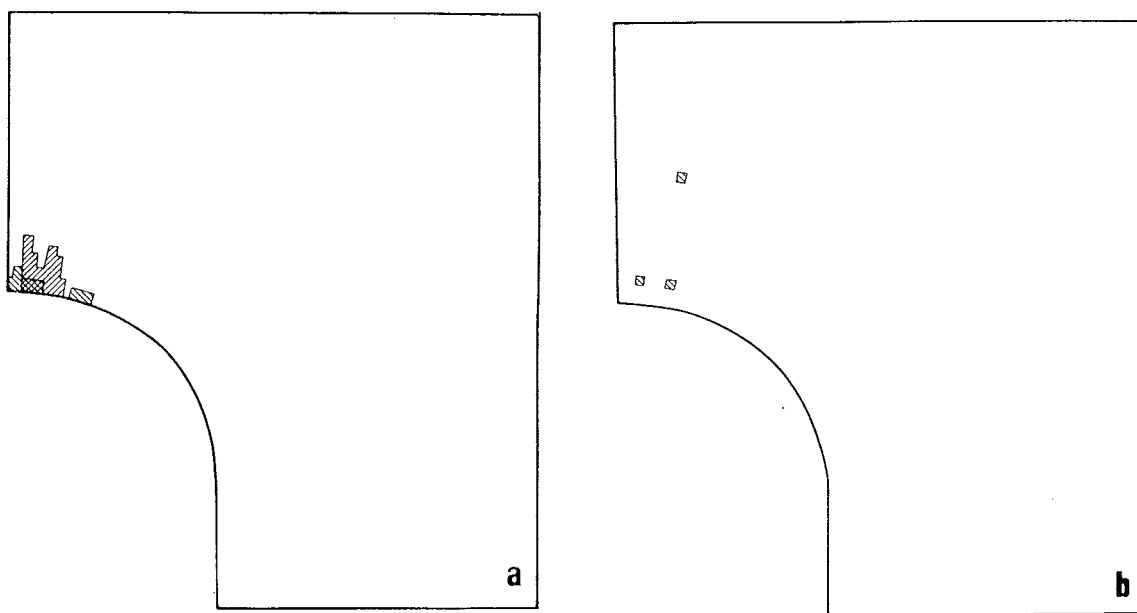
 Scorrimento sul giunto
 Trazione normale al giunto

Fig. 19. — Zone di rottura in roccia con giunti (inclinazione $\alpha = 0^\circ$): a) prima; b) dopo la bullonatura.





 Scorrimento sul giunto
 Trazione normale al giunto

Fig. 20. — Zone di rottura in roccia con giunti (inclinazione $\alpha = 90^\circ$): a) prima; b) dopo la bullonatura.

zontale dei giunti, $\alpha = 90^\circ$, va chiaramente a favore della stabilità, che è ulteriormente migliorata dai bulloni, i quali eliminano del tutto le zone di scorrimento.

c) Influenza dei parametri della bullonatura che intervengono sulle condizioni di stabilità.

Per valutare quantitativamente l'effetto che la bullonatura produce sulla stabilità di uno scavo è

opportuno introdurre il rapporto A_t/A_0 tra l'area di materiale fratturato A_t e l'area del vuoto A_0 . Questo rapporto dipende dalla geometria della sezione e dalle caratteristiche dell'ammasso, nonché dalle modalità della bullonatura; tuttavia un legame funzionale con queste grandezze rimane da definire. L'analisi parametrica applicata ad un caso specifico può però portare ad uno schema di bullonatura ottimale.

Utilizzando il metodo di calcolo precedentemente esposto si è condotta per le due sezioni di galleria prima considerate un'analisi di stabilità variando di volta in volta i singoli parametri. Considerando in particolare l'effetto che la spaziatura produce sulla stabilità sarà opportuno ricordare, in base alla stretta dipendenza tra tensioni e stabilità, come il campo di tensioni indotte diventi più uniforme al suo diminuire [BARLA, CRAVERO, 1972].

c. 1) Galleria rettangolare.

1) Roccia omogenea (tabelle 1 e 2, figg. 21 e 22).

Agli effetti della stabilità sembrano determinanti, in ordine di importanza, i seguenti parametri: la spaziatura S , il tiro applicato T e la lunghezza del bullone L . Si possono fare le seguenti osservazioni: il rapporto A_t/A_0 decresce notevolmente al diminuire della spaziatura; lo

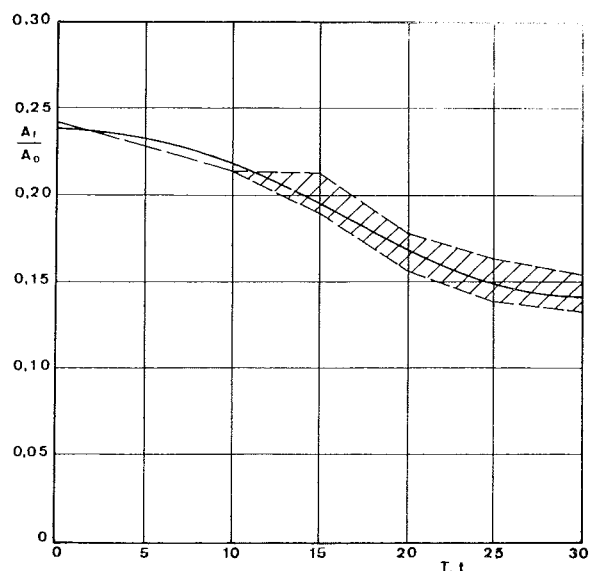


Fig. 21. — Influenza del tiro applicato e della lunghezza del bullone in roccia omogenea e galleria rettangolare (spaziatura $S = 0,8$ m).

stesso effetto si osserva, entro certi limiti, aumentando il tiro applicato e tende a stabilizzarsi in corrispondenza ai valori più elevati; l'incremento di lunghezza produce in misura limitata miglioramenti nella stabilità.

2) Roccia contenente giunti (tabelle da 3 a 10; figg. 23 e 24).

Il fattore determinante nelle condizioni di stabilità è l'orientamento dei giunti; infatti la stabilità diviene via via più precaria con l'aumentare dell'inclinazione di questi rispetto all'orizzontale. L'azione dei bulloni per i valori di $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ diventa sempre più debole e addirittura negativa; per i valori di $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ l'aumento del tiro applicato va a favore della stabilità; in ogni caso la diminuzione di interasse e l'aumento di lunghezza influiscono positivamente anche se in lieve misura.

TABELLA N. 1

Galleria rettangolare - Roccia omogenea
Interasse tra i bulloni 0,8 m

Lun- ghezza bulloni [m]	Valore di $\frac{A_t}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
1,5	0,240	0,228	0,218	0,212	0,174	0,162	0,150
2,0	0,240	0,228	0,216	0,194	0,166	0,158	0,140
2,5	0,240	0,228	0,216	0,197	0,154	0,140	0,130
3,0	0,240	0,228	0,216	0,194	0,154	0,138	0,130

TABELLA N. 2

Galleria rettangolare - Roccia omogenea
Lunghezza bulloni 2,0 m

Inte- rasse bulloni [m]	Valore di $\frac{A_t}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
0,4	0,240	0,220	0,170	0,136	0,136	0,124	0,124
0,6	0,240	0,226	0,202	0,168	0,156	0,146	0,126
0,8	0,240	0,228	0,216	0,194	0,166	0,158	0,150
1,0	0,240	0,236	0,228	0,222	0,210	0,196	0,180

TABELLA N. 3

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 0^\circ$
Lunghezza bulloni 2,0 m

Inte- rasse bulloni [m]	Valore di $\frac{A_t}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
0,4	1,024	1,018	1,020	1,024	1,030	1,034	1,032
0,6	1,024	1,026	1,032	1,034	1,028	1,032	1,042
0,8	1,024	1,026	1,028	1,028	1,032	1,034	1,042
1,0	1,024	1,028	1,028	1,026	1,034	1,038	1,038

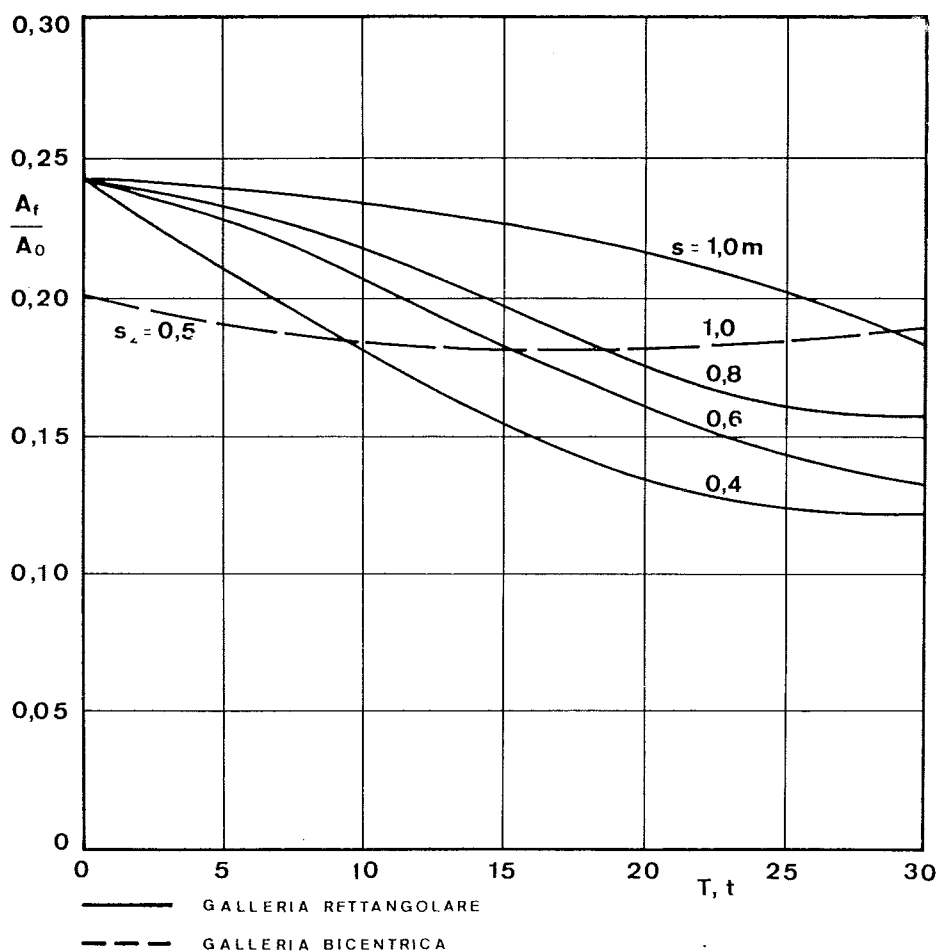


Fig. 22. — Influenza del tiro applicato e della spaziatura tra i bulloni in roccia omogenea per gallerie rettangolare e bicentrica (lunghezza $L = 2,0$ m).

TABELLA N. 4

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 30^\circ$
Lunghezza bulloni 2,0 m

Inte- rasse bulloni [m]	Valore di $\frac{A_r}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
0,4	1,022	1,010	1,000	1,000	1,012	0,998	0,996
0,6	1,022	1,012	1,016	1,018	1,020	1,022	1,010
0,8	1,022	1,020	1,014	1,012	1,014	1,014	1,012
1,0	1,022	1,024	1,020	1,026	1,024	1,024	1,018

TABELLA N. 5

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 60^\circ$
Lunghezza bulloni 2,0 m

Inte- rasse bulloni [m]	Valore di $\frac{A_r}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
0,4	0,590	0,582	0,564	0,546	0,522	0,494	0,486
0,6	0,590	0,592	0,578	0,578	0,568	0,556	0,526
0,8	0,590	0,596	0,586	0,588	0,582	0,572	0,560
1,0	0,590	0,596	0,598	0,604	0,602	0,602	0,592

TABELLA N. 6

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 90^\circ$
Lunghezza bulloni 2,0 m

Inte- rasse bulloni [m]	Valore di $\frac{A_r}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
0,4	0,162	0,074	0,058	0,054	0,050	0,046	0,048
0,6	0,162	0,074	0,058	0,054	0,050	0,046	0,048
0,8	0,162	0,084	0,058	0,054	0,048	0,036	0,034
1,0	0,162	0,110	0,078	0,054	0,052	0,040	0,040

TABELLA N. 7

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 0^\circ$
Interasse tra i bulloni 0,8 m

lun- ghezza bulloni [m]	Valore di $\frac{A_r}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
1,5	1,024	1,030	1,032	1,038	1,034	1,042	1,034
2,0	1,024	1,026	1,028	1,028	1,032	1,034	1,042
2,5	1,024	1,026	1,018	1,018	1,010	1,008	1,006
3,0	1,024	1,020	1,008	1,004	0,998	0,994	0,996

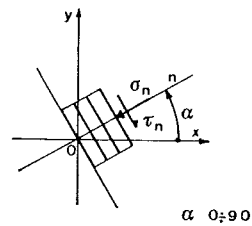
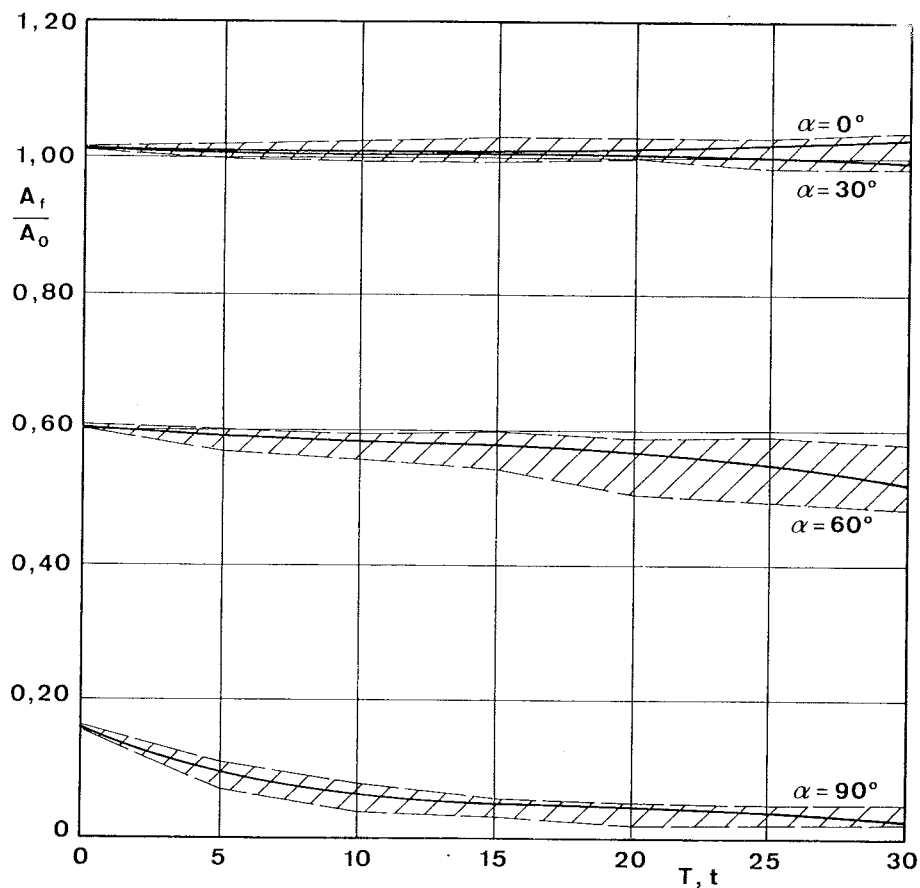


Fig. 23. — Influenza del tiro applicato e della spaziatura tra i bulloni in roccia contenente giunti (inclinazione $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90°) e galleria rettangolare (lunghezza $L = 2,0$ m).

TABELLA N. 8

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 30^\circ$
Interasse tra i bulloni 0,8 m

lun- ghezza bulloni [m]	Valore di $\frac{A_t}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
1,5	1,022	1,018	1,012	1,020	1,026	1,028	1,022
2,0	1,022	1,020	1,014	1,012	1,014	1,014	1,012
2,5	1,022	1,012	1,012	1,006	1,002	0,996	0,994
3,0	1,022	1,010	1,002	0,992	0,982	0,976	0,964

TABELLA N. 9

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 60^\circ$
Interasse tra i bulloni 0,8 m

lun- ghezza bulloni [m]	Valore di $\frac{A_t}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
1,5	0,590	0,592	0,594	0,588	0,574	0,576	0,560
2,0	0,590	0,596	0,586	0,588	0,582	0,572	0,560
2,5	0,590	0,576	0,562	0,550	0,534	0,522	0,486
3,0	0,590	0,576	0,560	0,546	0,522	0,508	0,464

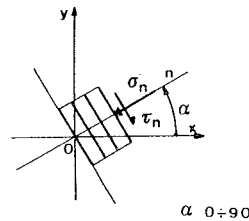
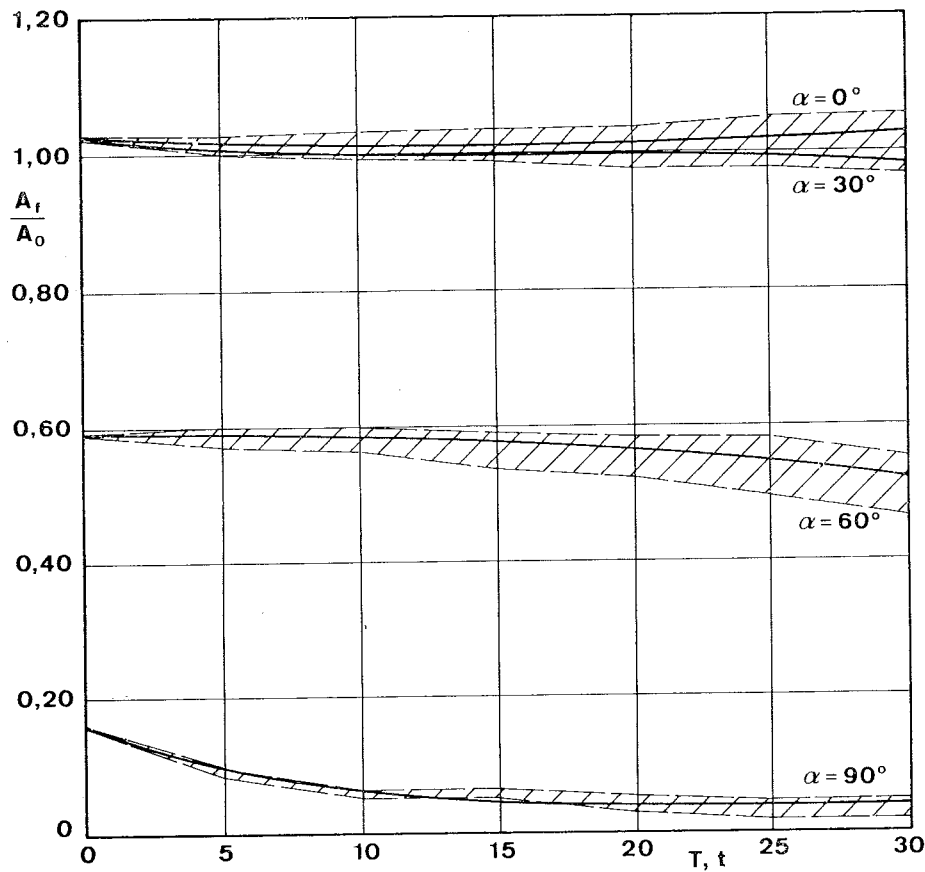


Fig. 24. — Influenza del tiro applicato e della lunghezza del bullone in roccia contenente giunti (inclinazione $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90°) e galleria rettangolare (spaziatura $S = 0,8$ m).

TABELLA N. 10

Galleria rettangolare - Roccia con giunti: $\alpha = 90^\circ$
Interasse tra i bulloni 0,8 m

Lun- ghezza bulloni [m]	Valore di $\frac{A_r}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
1,5	0,162	0,086	0,052	0,052	0,052	0,042	0,038
2,0	0,162	0,084	0,058	0,054	0,048	0,036	0,034
2,5	0,162	0,084	0,060	0,048	0,042	0,030	0,026
3,0	0,162	0,084	0,060	0,048	0,038	0,030	0,028

c. 2) Galleria con sezione a due centri di curvatura.

Roccia omogenea e roccia contenenti giunti.

Il procedimento di calcolo relativo alla galleria a due centri è stato impiegato in un solo esempio

di cui i parametri e i risultati sono specificati nella tabella 11 e nelle figure 22, 25.

Tanto la geometria della sezione che l'orientamento dei giunti hanno influenza determinante

TABELLA N. 11

Galleria a due centri - Ammasso omogeneo e con giunti
Lunghezza bulloni 3,0 m - Interasse tra i bulloni 1,0 m

ammasso omogeneo e con giunti $\alpha = 0^\circ \div 90^\circ$	Valore di $\frac{A_r}{A_0}$ per i seguenti tiri [t]						
	0	5	10	15	20	25	30
omogeneo	0,198	0,171	0,148	0,150	0,156	0,163	0,162
$\alpha = 0^\circ$	0,803	0,785	0,779	0,771	0,759	0,746	0,738
$\alpha = 30^\circ$	0,946	0,939	0,904	0,862	0,844	0,830	0,817
$\alpha = 60^\circ$	0,433	0,430	0,401	0,386	0,379	0,371	0,370
$\alpha = 90^\circ$	0,034	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	0,045

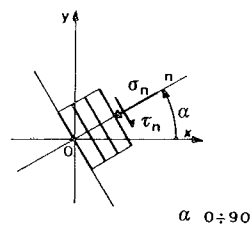
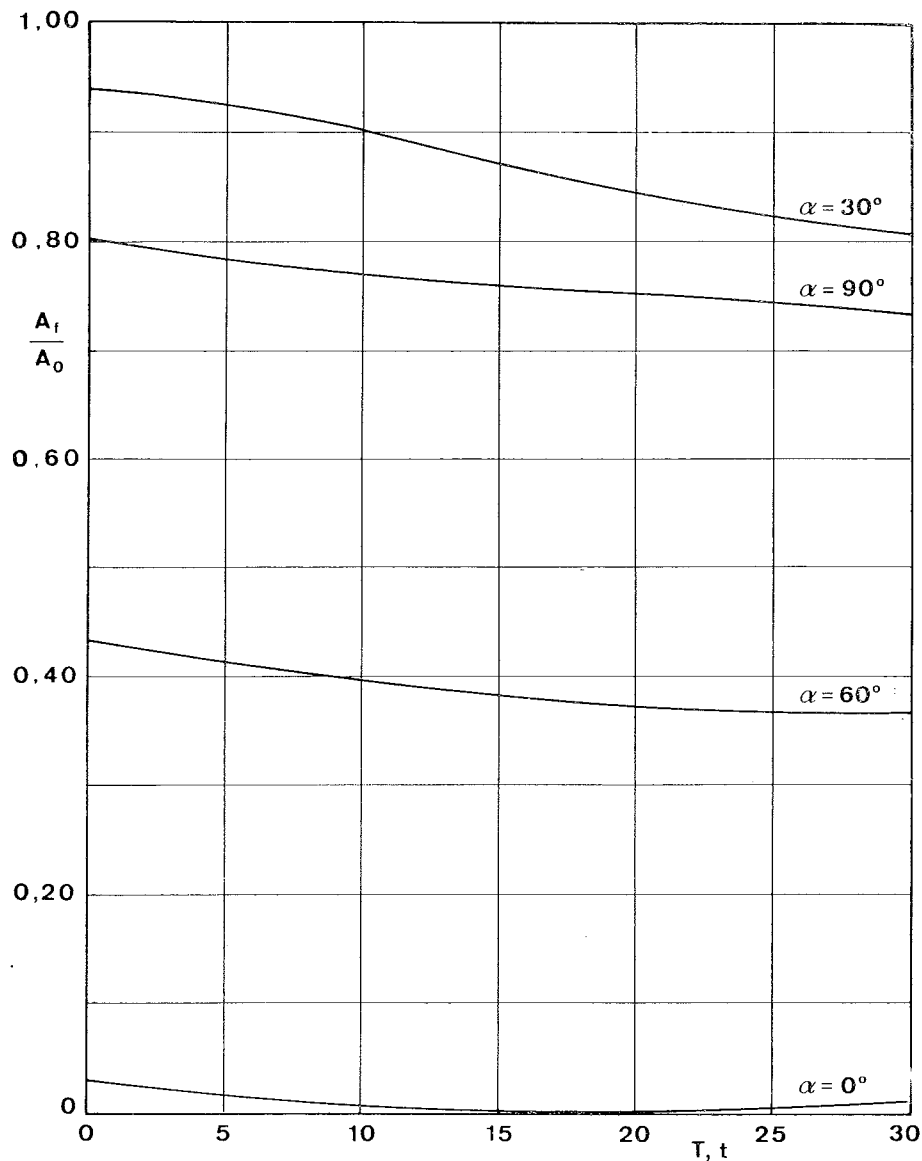


Fig. 25. — Influenza del tiro applicato in roccia contenente giunti (inclinazione $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90°) e galleria bicentrica (lunghezza $L = 3,0$ m e spaziatura $S = 1,0$ m).

sui valori assunti dal rapporto A_t/A_0 (tale rapporto deve essere riferito ora a metà sezione, tenendo presente che non sempre è mantenuta la simmetria ammasso-sezione bullonata). Sono possibili ulteriori osservazioni: se l'ammasso è omogeneo il rapporto A_t/A_0 presenta un minimo in corrispondenza al tiro di 10 t; per roccia contenente giunti l'incremento del tiro applicato produce effetti positivi di stabilità.

La variazione dell'angolo α non provoca una

variazione comunque concorde nei risultati di stabilità; questo fatto potrebbe essere dovuto all'influenza del particolare schema di bullonatura adottato rispetto all'orientamento dei giunti.

Conclusioni

Le ipotesi ed i procedimenti, utilizzati nel corso del presente studio, possono essere applicati ad ammassi rocciosi il cui comportamento sia rap-

presentabile con quello di un materiale omogeneo, isotropo e linearmente elastico; qualora questi ammassi non presentino dette caratteristiche, il procedimento impiegato introduce approssimazioni di entità non ancora valutabile. Poiché si esclude a priori l'influenza del fattore tempo, si trascurano i fenomeni di rilassamento dei materiali e si deve perciò considerare la bullonatura come immediatamente susseguente l'operazione di scavo.

L'applicazione delle formule di Boussinesq e di Mindlin, valide per carichi verticali, determina la scelta di uno schema di bullonatura normale alla superficie di scavo; queste stesse formule impongono inoltre che le zone di indagine siano tali da limitare l'effetto di curvatura, essendo esse valide solo per semispazi. Riducendo la bullonatura ad un sistema di forze applicate si trascurano sia le modalità esecutive, sia la presenza nell'ammasso dei bulloni; ciò comporta l'impossibilità di tenere conto tanto dell'azione svolta da questi nel meccanismo di rottura, quanto della diminuzione nel tempo delle tensioni indotte.

Sono opportune ulteriori indagini per introdurre modelli più realistici di configurazione dell'ammasso roccioso in modo da poter considerare in modo completo l'azione dei bulloni e per poter

applicare schemi di bullonatura adatti alle singole situazioni. Lo schema di calcolo applicato nel presente studio può essere tuttavia già impiegato in casi di interesse pratico. Per quanto molte e talvolta assai restrittive siano le ipotesi introdotte nel corso del calcolo, gli orientamenti che si possono trarre nelle applicazioni possono risultare di estremo interesse e meritano comunque adeguata attenzione nella scelta degli schemi di bullonatura.

BIBLIOGRAFIA

- BARLA G. (1970) - *On the distribution of stress around openings located in a rock mass*. Doctoral Dissertation, Columbia University, School of Engineering and Applied Science, New York.
- BARLA G., CRAVERO M. (1972) - *Analysis of stress around underground openings reinforced with rock bolts*. International Symposium on Underground Openings, Lucerna.
- BARLA G., BRIZIO P., CRAVERO M. (1972) - *Indagine teorica sulla bullonatura di gallerie. I. La distribuzione delle tensioni nell'intorno di un bullone*. Rivista Italiana di Geotecnica, n. 2.
- MC NIVEN N. D., EWOLDSSEN H. M. (1969) - *Rock bolting for structural support - Part I and II*. Int. J. Rock Mech., Min. Sci., vol. 6.

SUMMARY

A theoretical study on rock bolting of underground openings. Part II. Stability analysis.

A numerical method used in order to determine the distribution of stress around reinforced underground openings is discussed in the present paper. The rock mass being considered as a homogeneous, isotropic and linearly elastic material, the stresses due to the bolts are computed by analytical means. The stresses induced by the excavation of the opening are evaluated by the

finite element method. By superposition of the two stress fields a stability analysis of the rock structure is carried on by comparing the fracture zones which arise prior to and after rock bolting. To this end the rock mass is considered as either a homogeneous or a jointed medium. Two openings are analysed: a rectangular drift and a tunnel with arched roof. The influence on the stability of the opening is discussed by considering the role of the different parameters which enter rock bolt design: spacing, length and load.