SULLA COSTRUZIONE DELLE GALLERIE IN ROCCIA

CON PARTICOLARE RIGUARDO AL SOSTEGNO DELLA VOLTA ED AL RIVESTIMENTO

C. LOTTI (*)

SOMMARIO: Si dimostra, con una trattazione generale che viene poi riferita ad alcuni casi particolari di lavori eseguiti, la dipendenza fra modalità di esecuzione dello scavo, mezzi di sostegno della volta e tipo di rivestimento nella costruzione delle gallerie in roccia.

Vengono separatamente esaminate le gallerie in pressione in rocce resistenti e non resistenti, con particolare riferimento alla statica del rivestimento ed all'impiego di centine metalliche per il sostegno dello scavo. Un diagramma mette in evidenza i limiti economici di impiego per tale tipo di sostegno.

Vengono poi trattate le gallerie di altro tipo, di piccola, media e grande sezione: per quest'ultime, da un diagramma, risultano i limiti economici dell'impiego dei sostegni metallici.

Dopo brevi cenni sull'impiego di bulloni per il sostegno della volta, vengono sviluppati in appendice alcuni esempi numerici relativi alle gallerie in pressione.

1 - Generalità

Nella costruzione delle gallerie in *roccia* (1) sono stati di recente conseguiti sostanziali progressi [1].

I nuovi tipi di acciaio per la perforazione, l'uso di martelli con maggiori velocità di rotazione e percussione, la rapida rimozione del materiale con le pali caricatrici, i vagoni di trasporto di grande capacità, il progredire dei mezzi di ventilazione e tanti altri minori perfezionamenti, hanno trasformato il lavoro di scavo e la sua economia.

La costruzione di una galleria, pur mantenendo caratteristiche « artigiane », può essere organizzata industrialmente: nel senso che l'organizzazione industriale, basata sul controllo e sulla economia delle varie fasi di lavoro, ha un largo peso sulla bontà della produzione la quale resta pur sempre affidata all'abilità della mano d'opera.

Di conseguenza anche i sistemi di avanzamento hanno avuto notevoli cambiamenti [2] in quanto i mezzi di scavo entrati nell'uso comune da poco più di un decennio, consentono di abbattere e rimuovere i fronti di avanzamento con modalità e tempi ben diversi.

I sistemi di avanzamento attualmente più comunemente usati sono i seguenti:

— avanzamento a piena sezione (fig. 1 a);
— avanzamento contemporaneo in calotta e allo strozzo (fig. 1 b);
— avanzamento in calotta (fig. 1) c);
— avanzamento a cunicoli laterali (fig. 1 d);
— avanzamento a cunicoli multipli (fig. 1 e);

Risultano quindi completamente abbandonati i sistemi di avanzamento con cunicoli superiori ed inferiori: naturale conseguenza dei mezzi di rimozione del materiale i quali consentono e richiedono sezioni più ampie per il loro utile impiego.

I vantaggi dei sistemi sopraddetti sono troppo chiari per quanti abbiano qualche nozione sul lavoro di galleria e non è quindi necessario indugiarsi a descriverli.

Con tali sistemi di avanzamento, unitamente a mezzi di scavo ben proporzionati, si possono raggiungere risultati ragguardevoli; è recente la notizia di un avanzamento raggiunto in Italia in una galleria del diametro di m. 3,50 scavata in roccia calcarea (2): 408 metri in 26 giorni con un massimo di m. 96,72 in sei giorni pari a m. 16,12 al giorno. Tale avanzamento è molto

(*) - Dott. Ing. Carlo LOTTI - Direttore Tecnico della Impresa Pietro CIDONIO - Roma, e redattore della nostra Rivista.

(1) - In genere, nel campo della pratica, si intende come *scavo in roccia* quello scavo che, pur richiedendo una armatura di sostegno, anche a ridosso dell'avanzamento, è tuttavia praticato in materiale che consenta di effettuare liberamente tutte le successive operazioni di scavo. Mentre per *scavo in terra* si intende uno scavo per il quale vi è assoluta necessità di armatura immediata che sostituisca il materiale asportato. [3]

(2) - Galleria Ponte Pià-S. Massenza - Società Idroelettrica Sarca-Molveno - Costruttrice: Impresa Ito del Favero.

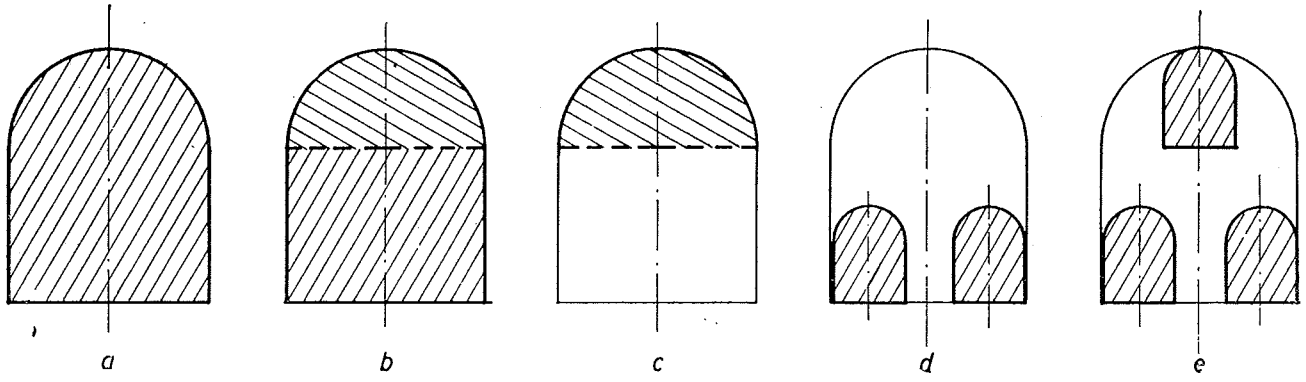


Fig. 1 - Sistemi di avanzamento

vicino all'ultimo record di recente ottenuto in Scozia: 130 mt. in sette giorni pari a 18,6 mt/giorno; esso dimostra l'alto grado di livello organizzativo e di addestramento raggiunto nei nostri cantieri.

Nel rapido progresso costruttivo delle gallerie in roccia si sono inseriti, in tempi ancora più recenti, notevoli mutamenti e miglioramenti delle modalità di esecuzione dei rivestimenti.

Il rivestimento di una galleria, ad uso qualsiasi, deve essere, per quanto possibile, monolitico e costituito di materiale a resistenze elevate, con superfici sufficientemente lisce e conguagliate, tali da non richiedere applicazione di intonaci. Tali esigenze, maggiormente sentite nelle gallerie idrauliche, si dimostrano utili in ogni tipo di galleria.

Un rivestimento siffatto può ottenersi con l'impiego di calcestruzzo a dosaggio sufficientemente elevato (280-300 kg. di cemento per mc.), messo in opera con pompe, di norma pneumatiche, su casseforme metalliche di tipo telescopico [1] e può essere realizzato, sia pure con gli accorgimenti di cui più avanti diremo, in tutte le gallerie in roccia; cioè in tutte quelle gallerie le quali, pur avendo necessità di eventuali armature di sostegno, non sono scavate in terreni sciolti; l'uso della pompa e delle casseforme telescopiche può essere esteso anche alle gallerie in terreni sciolti, ma in questo caso gli oneri di esecuzione possono divenire troppo importanti e non idonei ad ogni economia.

Si è detto che il tipo di pompa da usare è di norma pneumatico; si può aggiungere che, specie nelle gallerie idrauliche in pressione, è consigliabile un tipo di pompa a tubo di lancio immerso nel calcestruzzo e tale da consentire un getto continuo e senza separazione. In tal modo si otterranno calcestruzzi di elevate resistenze ed una perfetta saldatura alla roccia circostante. I consumi specifici per le iniezioni di saldatura saranno minori e si potrà anzi rilevare, specie nelle roccie fratturate, che una parte della malta fina del calcestruzzo, sarà risalita nelle diaclasi della roccia, operando un efficace consolidamento.

La esecuzione di un rivestimento su casseforme metalliche di tipo telescopico, mediante l'uso di pompa pneumatica, richiede una serie di accorgimenti e di vincoli che, ad una valutazione troppo sommaria, possono risultare tanto gravosi da sconsigliare tale sistema esecutivo. La nostra esperienza ci ha finora dimostrato il contrario: ma ci ha anche insegnato che gli accorgimenti esecutivi devono essere studiati con molta cura.

L'impiego economico delle casseforme telescopiche e della pompa di lancio, completa di treno beton, richiedono:

— che la sezione della galleria, nella tratta di getto, non inferiore ai 30 metri, sia completamente libera da ogni armatura di sostegno;

— che la galleria sia di norma completamente forata. Tale condizione, indispensabile per le gallerie di piccola e media dimensione, non è necessaria nelle grandi gallerie, potendosi disporre le attrezzature in modo che sia consentito, anche durante il getto, il transito dei mezzi provenienti dal fronte di avanzamento: nelle gallerie idrauliche in pressione nelle quali, per evitare serraglie, il getto deve essere eseguito su tutta la sezione, è tuttavia sempre consigliabile che sia sospeso l'avanzamento;

— un calcestruzzo bene studiato e confezionato con cura, ed una accurata messa a punto dell'impianto da cui dipende la buona riuscita del getto.

L'ultimo punto non presenta gravi difficoltà: la buona qualità dei calcestruzzi è oggi una esigenza di tutti i cantieri e la messa a punto degli impianti, per il loro generalizzarsi, diviene sempre più facile.

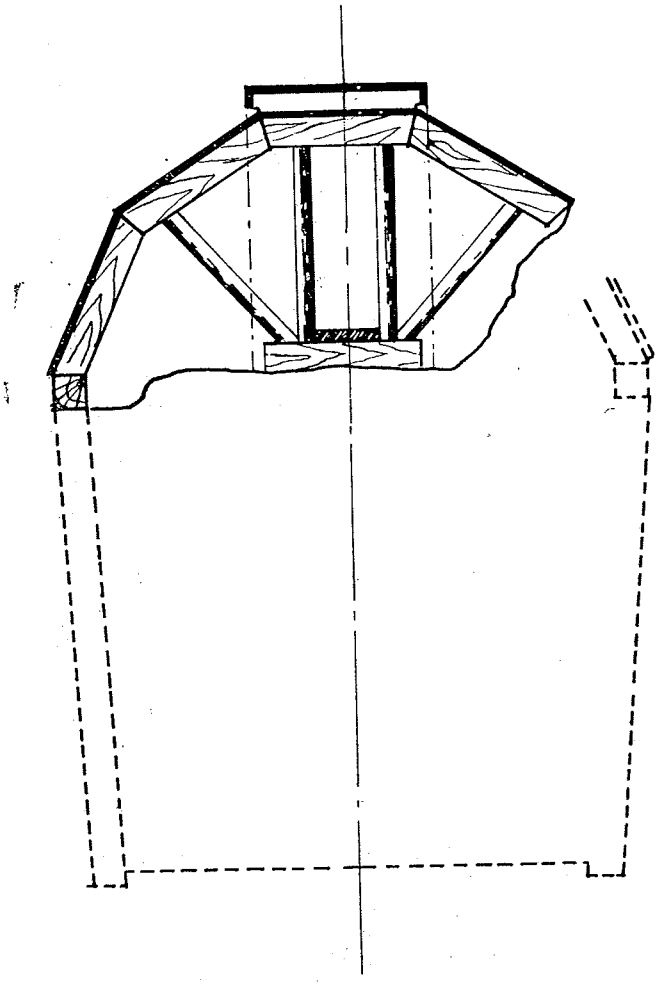


Fig. 2 - Armature a « quadro » tipo americano

Sui primi due punti, si incontrano invece le maggiori difficoltà; indipendentemente dalla pompa, le casseforme telescopiche hanno necessità di muoversi in una sezione libera da ogni ingombro mentre è consigliabile che il getto, per evitare il transito sulla parte già gettata, proceda in regresso dall'avanzamento verso l'imbocco, rendendo in tal modo anche più agevole il rifornimento della pompa, specie nelle gallerie di sezione limitata.

In conclusione, è necessario che la galleria sia scavata a sezione completa, che sia libera da armature di sostegno e che sia di preferenza perforata prima dell'inizio dei getti.

Vi è quindi un legame diretto tra le modalità di esecuzione del rivestimento ed il sistema di scavo e di armatura di sostegno.

Negli Stati Uniti il problema è stato risolto [1] con l'adozione di un'armatura a *quadro* (fig. 2) sistemata al difuori della linea esterna del rivestimento stesso. Tale sistema, derivato da una economia ricca, non può essere accettato così semplicemente nei nostri più modesti cantieri, non tanto per il legame perduto (un'attenta analisi sui costi di recupero, con l'attuale costo della mano d'opera specializzata e qualificata di galleria, potrebbe dare indicazioni non del tutto negative) quanto per i maggiori volumi di scavo ed i conseguenti maggiori spessori che si determinano nei rivestimenti.

Occorre quindi attuare accorgimenti diversi e più economici, ricercando altresì la migliore utilizzazione del rivestimento onde ottenere una riduzione negli oneri conseguenti al sistema di esecuzione: solo da tale indagine, che deve comprendere il metodo di scavo, le condizioni di stabilità del rivestimento e le sue modalità di esecuzione, potranno risultare i vantaggi completi del sistema.

In quanto segue si faranno alcune considerazioni generali sul problema e si esporranno alcuni concetti particolari che ci hanno guidato in soluzioni di qualche interesse, descrivendone le modalità di esecuzione. Tratteremo separatamente:

— le gallerie in pressione scavate in rocce resistenti (collaboranti);

— le gallerie in pressione scavate in rocce non resistenti (non collaboranti);

— le gallerie senza pressioni interne (idrauliche a pelo libero, stradali, ferroviarie).

2 - Gallerie in pressione scavate in rocce resistenti

E' noto che una galleria può considerarsi scavata in roccia resistente, quindi tale da collaborare alla stabilità del rivestimento, quando la roccia si comporti come un mezzo omogeneo, isotropo, con modulo elastico di qualche entità. E' anche noto che tali qualità della roccia possono ottenersi o comunque migliorarsi mediante iniezioni di cemento le quali non solo operino la efficace saldatura fra calcestruzzo di rivestimento e roccia circostante, ma provvedano anche a consolidare un anello di roccia intorno alla galleria.

In tal senso il consolidamento della roccia equivale ad un accrescimento del modulo elastico di un anello di roccia intorno alla galleria e quindi il problema può essere analiticamente trattato [4] considerando il sistema anello di calcestruzzo-anello di roccia iniettata e anello indefinito di roccia non iniettata ed applicando a tale sistema le note formule di congruenza fra spostamenti e sollecitazioni principali.

In appendice — nella nota 1 — abbiamo sviluppato un esempio numerico: dal risultato del calcolo, sia pur condotto nelle ipotesi ideali di cui sopra, derivano il dimensionamento e le conseguenti sollecitazioni del rivestimento: sollecitazioni di trazione, più o meno elevate, a secon-

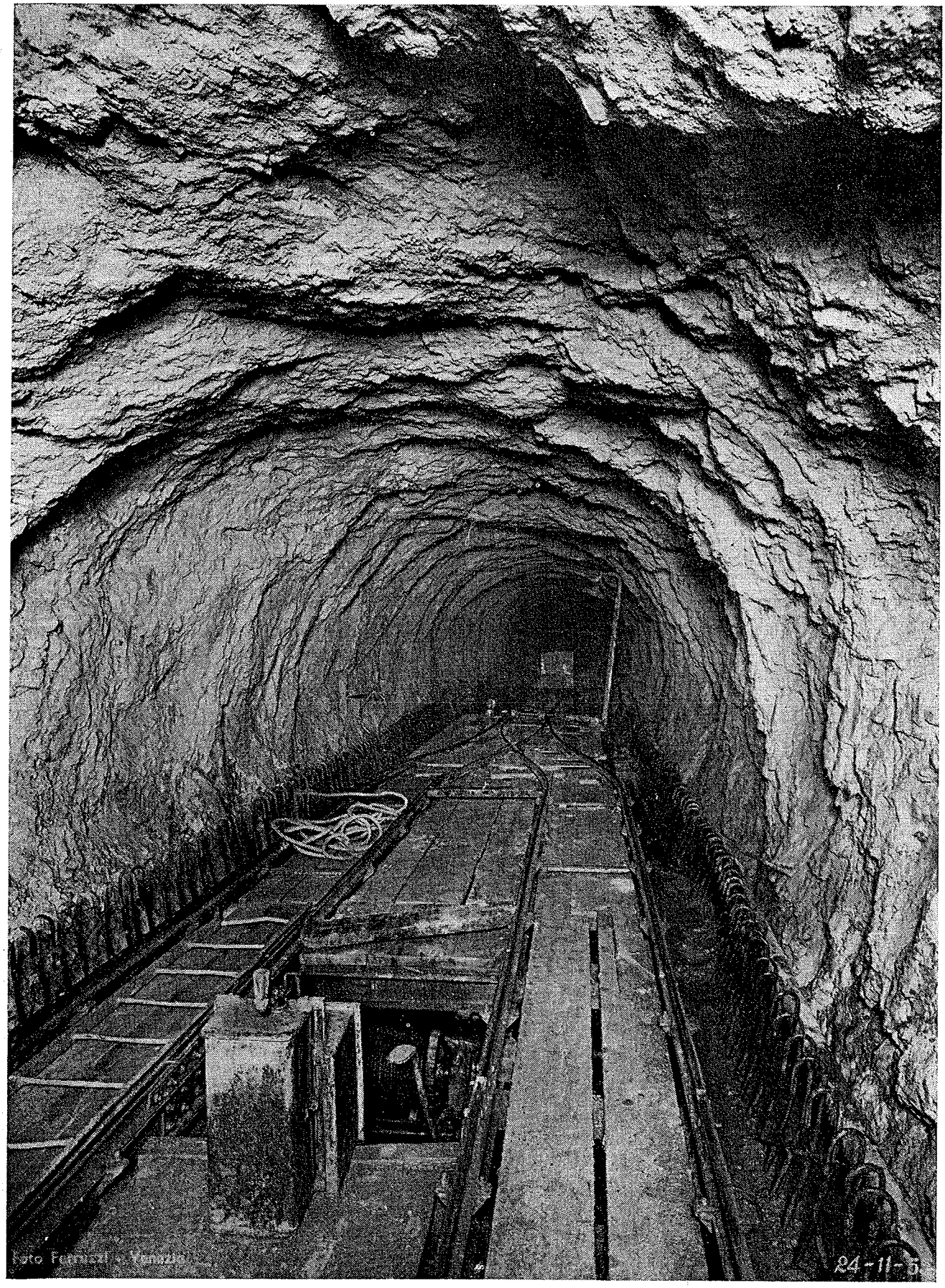


Fig. 3 - Galleria Senaiga-Arsié (S.I.I.A.) - Rivestimento

da del modulo elastico e dello spessore dell'anello di roccia iniettata e del modulo elastico dell'anello indefinito. Ne consegue la necessità di costruire un anello di calcestruzzo monolitico, di norma non armato ma resistente, di per se stesso, alla trazione.

E' noto che in calcestruzzi di elevate qualità si possono raggiungere valori di trazione superiori ai 30 kg/cm² [8]; potendo contare su tali valori, sia pur ridotti nel rapporto di sicurezza, e facendo anche affidamento sulla collaborazione della roccia, è sempre possibile realizzare un rivestimento monolitico senza armatura metallica: è però necessario mettere in opera calcestruzzi

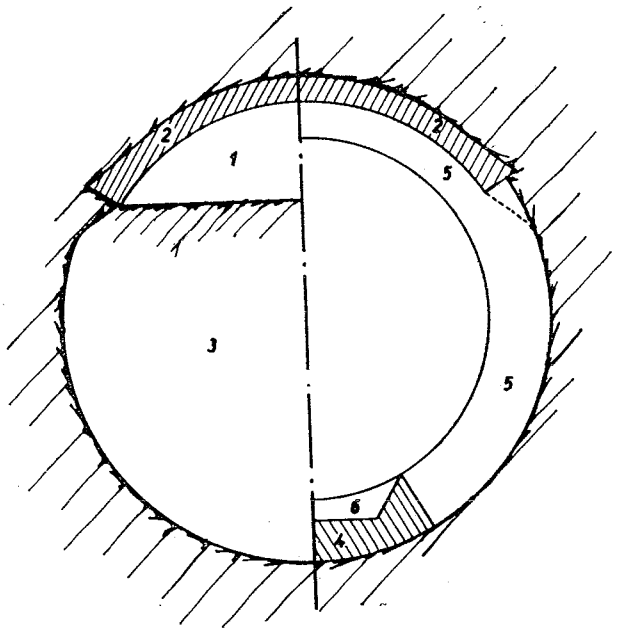


Fig. 4 - Galleria di Narni (Soc. TERNI) - Fasi di scavo e di rivestimento

di elevata resistenza, a getto continuo, senza serraglie.

Di norma tali rivestimenti non presentano difficoltà alcuna perchè la roccia, per sua natura, non ha necessità di armature di sostegno: può essere realizzata la completa perforazione ed il rivestimento può procedere in regresso nelle condizioni migliori.

Così è stato fatto nella galleria Senaiga-Arsiè, negli Impianti del Basso Cismon, costruita dalla Impresa Pietro CIDONIO per conto della S.I.I.A. negli anni 1950-1953, della lunghezza di km. 5260 e del diametro di m. 3,60, di cui si è già detto in questa medesima rivista [10]: la roccia attraversata era costituita da un calcare marnoso, fratturato, con sottili strati di argilla, il quale, fatta eccezione per alcuni brevi tratti ove fu necessario un pre-anello di rivestimento, si sosteneva naturalmente. La galleria fu interamente forata a piena sezione e per il rivestimento, dello spessore di cm. 30, fu usata una pompa tipo *press-weld* con 36 m. di casseforme telescopiche. La messa a punto dell'impianto, uno dei primi a funzionare in Italia, fu laboriosa, ma i risultati tecnici ed esecutivi, furono della massima soddisfazione (fig. 3).

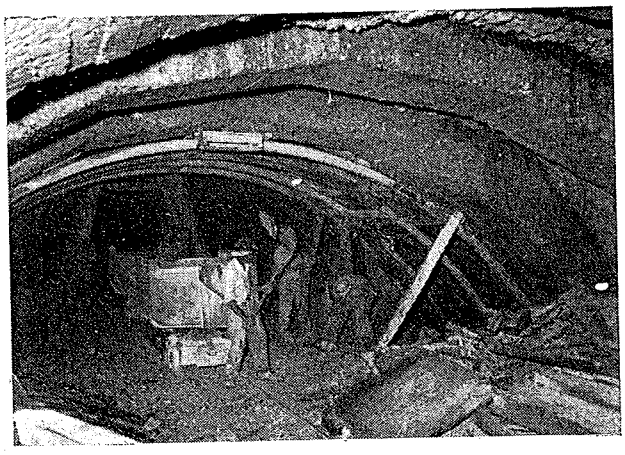


Fig. 5 - Galleria di Narni (Soc. TERNI) - Scavo della calotta con pre-anelli di calcestruzzo

Oltre alla elevata qualità del calcestruzzo (prove eseguite con martello SCHMIDT dopo un anno di stagionatura hanno dato risultati medi di 420 kg/cm² in calotta e 390 kg/cm² nei piedritti) si è riscontrata una notevole economia nelle iniezioni di saldatura fra rivestimento e roccia: il consumo medio, nei primi due km. di galleria, è stato di 170 kg. di cemento per metro lineare contro 600 kg. riscontrati in un galleria dello stesso sistema di impianti, scavata in terreni della medesima natura ma con rivestimento gettato a mano e vibrato [10].

Situazione diversa è invece quella della galleria forzata dell'impianto di Narni attualmente in corso di esecuzione per conto della Soc. TERNI (costruttrice: Impresa Pietro CIDONIO).

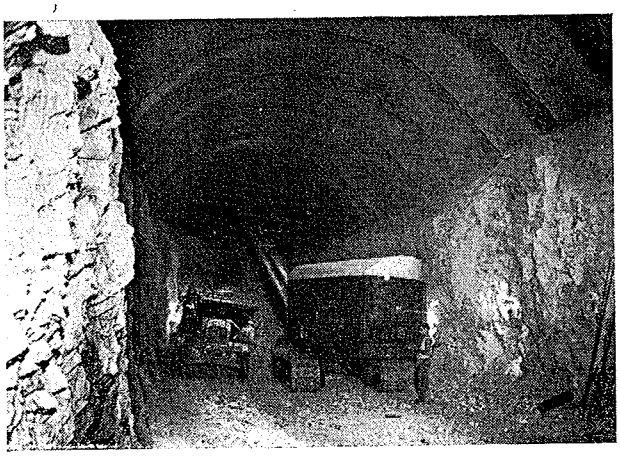


Fig. 6 - Galleria di Narni (Soc. TERNI) - Scavo dello strozzo

Trattasi di una galleria del diametro finito di m. 8,20 (diametro dello scavo m. 9,60) che attraversa una formazione di calcare, in parte marnoso in *facies umbra* (scaglia rosa), con qualche leggera stratificazione di argilla e presenza di acqua. La galleria può ascriversi solo impropriamente alle gallerie in pressione in quanto tale pressione si limita a qualche metro al di sopra dell'estradosso; cosicchè, pur essendo in presenza di roccia molto fratturata, si è potuto considerare che questa collaborasse con il rivestimento e quindi si è evitata ogni armatura metallica. Era tuttavia opportuno, per l'esercizio della galleria, che il rivestimento fosse il più possibile monolitico e non richiedesse applicazione di intonaco.

Sembrò non facile realizzare tale soluzione in quanto la natura della roccia non consentiva lo scavo a piena sezione senza armature di sostegno. Si procedette allora allo scavo di un calottino della sezione di 19 m.^{2} (fig. 4) che talvolta su necessario armare fino alla *terza*; seguì la muratura di un arco di sostegno dello spessore di cm. 30 limitato alle zone in cui si rendeva necessario e parzialmente impostato fuori della zona di scavo (fig. 5): in particolare, nelle zone marnose, l'arco fu eseguito in modo continuo, nelle zone calcaree fratturate fu eseguito a campioni ed in alcune zone di calcare buono fu limitato a punti singolari che richiedevano manifestamente un sostegno; successivamente fu dato inizio allo scavo dello strozzo e dell'arco rovescio con l'impiego di due pale caricatrici da 600 e da 300 litri ed autocarri tipo *dumpers* da 3m^3 (fig. 6); si procedette a qualche sottomurazione (circa il 10%) e, dopo aver gettato un pre-arco rovescio si introdussero le casseforme telescopiche e si dette inizio al rivestimento (spessore cm. 60) mentre lo scavo dello strozzo era ancora in esecuzione (fig. 7). I risultati sono stati della massima soddisfazione ed anche l'economia del lavoro ne ha avuto un vantaggio: la soluzione del problema fu dovuto all'accorgimento dell'arco *di sostegno,* più o meno continuo, il quale senza eccessivi maggiori oneri, ha consentito di aprire la galleria a piena sezione.

Il rivestimento delle gallerie in pressione in rocce salde non presenta evidentemente alcun problema; il caso della galleria di Narni costituisce una eccezione. Di norma si può procedere con tranquillità allo scavo a piena sezione ed al successivo rivestimento senza oneri o vincoli di sorta.

3 - Gallerie in pressione in rocce non resistenti

Quando la roccia non è omogenea ed isotropa ed il modulo elastico dell'ammasso roccioso è sensibilmente inferiore a quello del calcestruzzo, non è consigliabile contare sulla collaborazione della roccia per evitare fessurazioni nel rivestimento: la tenuta deve quindi basarsi sulla resistenza del rivestimento stesso.

Prendiamo quindi in esame una galleria nella quale, per le elevate pressioni di esercizio e la natura della roccia circostante, non sia possibile contare sulla sicura collaborazione di questa: ne conseguono considerevoli sollecitazioni di trazione nel rivestimento. Dal punto di vista costruttivo, dobbiamo tener presente che la roccia deve essere sostenuta in qualche modo dopo lo scavo.

Dai molti studi, condotti sull'argomento e convalidati dalla sperimentazione si possono desumere i seguenti punti fondamentali sulla statica dei rivestimenti di calcestruzzo armato [5-6-7]:

— nel rivestimento costituito da un pre-anello di calcestruzzo semplice e da un anello di calcestruzzo armato, la funzione statica rispetto alle pressioni interne è interamente affidata all'anello di cemento armato mentre il pre-anello serve soltanto di sostegno alla roccia consentendo una più facile esecuzione dell'anello interno. In taluni casi, per pressioni più elevate, si aggiunge un terzo anello costituito da intonaco su rete o su pacchetti di rete per meglio assicurare la tenuta della condotta [7];

— l'anello interno viene calcolato come un tubo sciolto e le sollecitazioni sono determinate con le formule di congruenza fra spostamenti e sollecitazioni, applicate ai vari anelli concentrici formati dal calcestruzzo e dalla armatura di ferro, trasformata in lamierino di spessore ideale. Nella determinazione della armatura di ferro non si considera la resistenza a trazione del calcestruzzo e si affida per intiero il compito statico alla armatura metallica la quale viene prevista per sollecitazioni moderate (1000 kg/cm^2) se manca il contributo roccia ed alquanto più elevate (2000 kg/cm^2) se tale contributo, pur non entrando nel calcolo, viene ritenuto efficace. Le sollecitazioni determinate con le formule di congruenza derivano pertanto dai rapporti dei moduli elastici di trazione del calcestruzzo e del ferro e la sollecitazione massima del calcestruzzo, all'intradosso del rivestimento, ,non dovrebbe di norma superare il massimo carico di sicurezza attribuibile al calcestruzzo [5];

— la presenza del ferro di armatura determina nel calcestruzzo alcuni adattamenti plastici che sono tali da ridurre le sollecitazioni nel ferro medesimo e nel calcestruzzo e, quando la condotta è interamente plasticizzata, le deformazioni massime all'intradosso sono all'incirca doppie di quelle ammissibili in limite elastico. Si è ancora accertato che, a parità di deformazione, la condotta è in grado di sopportare la

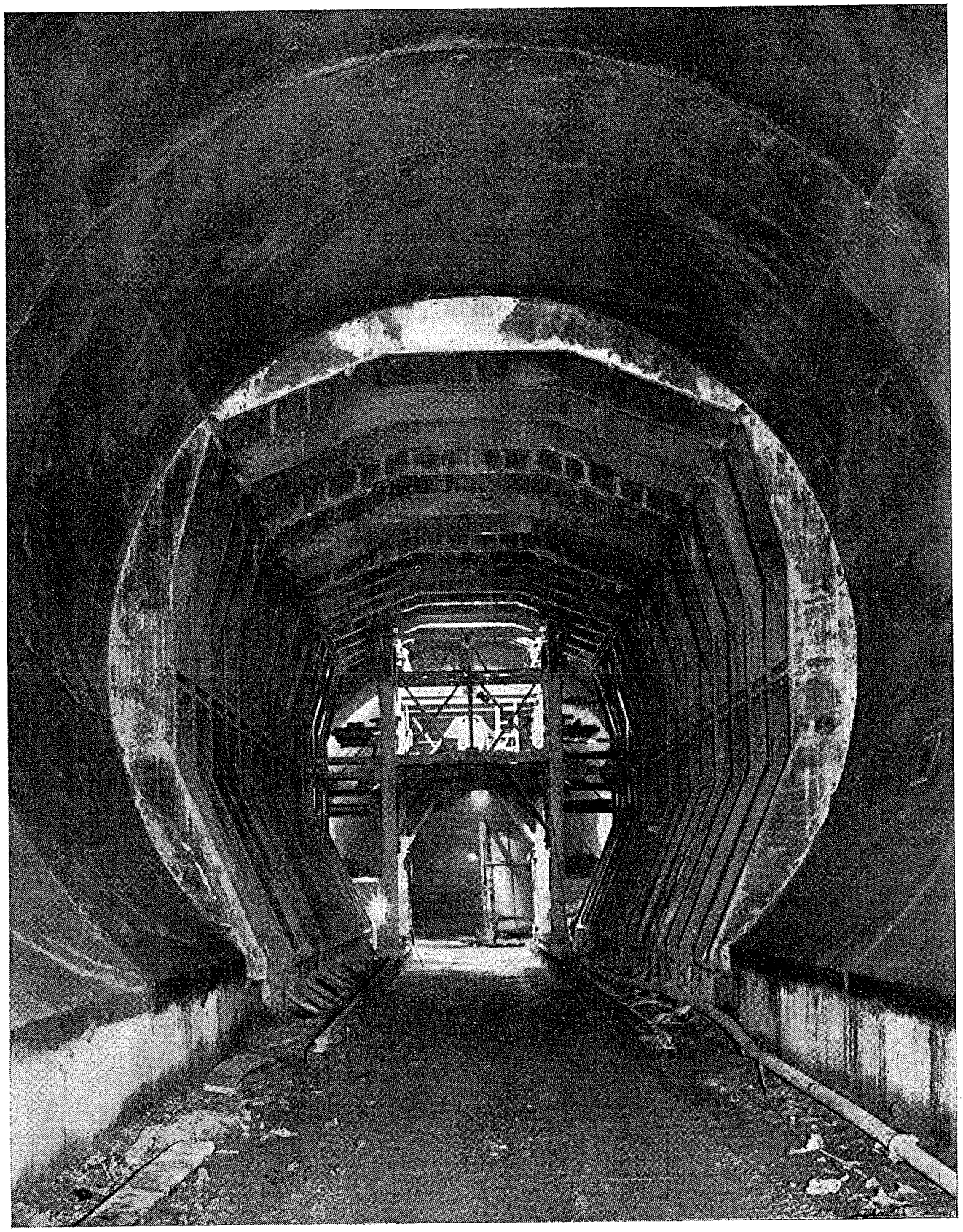


Fig. 7 - Galleria di Narni (Soc. TERNI) - Rivestimento

stessa pressione per qualsiasi posizione dell'armatura: considerazioni economiche consiglierebbero quindi di porre l'armatura all'intradosso. In realtà ciò può essere difficoltoso e può rendere meno efficiente il calcestruzzo all'intradosso proprio laddove deve sopportare le maggiori sollecitazioni. Inoltre la esperienza dimostra che la disposizione dell'armatura all'estradosso è più utile quando il calcestruzzo si sia lesionato. In definitiva appare più opportuno disporre all'estradosso la maggior parte delle armature, lasciando all'introdosso una leggera armatura atta a consentire al calcestruzzo le più ampie dilatazioni possibili [6];

— l'efficacia del contributo della roccia è di grande utilità, per cui è opportuno migliorare tale contributo o farlo nascere ove manchi, anche se nel calcolo non se ne tiene conto: il contatto fra rivestimento e roccia deve essere il più intimo possibile perchè qualunque distacco, quando superi un certo valore determinabile ma comunque molto piccolo, è tale da pregiudicare la collaborazione della roccia [9]; ed inoltre, con iniezioni di consolidamento, è anche opportuno rendere efficiente un cospicuo anello di roccia concentrico alla galleria per assicurarne la collaborazione: in tal modo le sollecitazioni nel calcestruzzo possono, in effetti, essere utilmente ridotte, come del resto si è dimostrato nel citato esempio numerico in appendice — nota 1.

Da tali considerazioni risulta che il pre-anello deve considerarsi come opera pressochè provvisionale in quanto, almeno teoricamente, non collabora, agli effetti delle pressioni interne, con la struttura definitiva. In pratica ciò è solo parzialmente vero ed in qualche calcolo si tiene conto, sia pure in forma ridotta, della collaborazione del pre-anello, specie se iniettato: comunque la sua eliminazione può portare un vantaggio economico oltrechè esecutivo.

In secondo luogo risulta che deve essere posta la massima attenzione nella esecuzione dell'anello armato il quale deve essere costituito di calcestruzzo di elevate qualità (resistenza — modulo elastico — ritiro), monolitico (senza serraglie e con efficienti riprese longitudinali) e con ferro di armatura in quantità tale da resistere per intero alla pressione interna, sia pure con elevati carichi di sicurezza e disposto in massima parte all'estradosso.

Ed infine viene confermato quanto sia necessario ottenere una efficace saldatura del rivestimento alla roccia sia mettendo in opera il calcestruzzo a pressione sia con successive iniezioni.

Posto in tali termini il problema esecutivo, esaminiamo separatamente i due casi limiti per i quali devono attuarsi due diverse soluzioni:

a) rivestimento di calcestruzzo armato nel quale, per diametro e pressione interna, le sollecitazioni all'intradosso, con convenienti spessori, non superino le massime sollecitazioni ammissibili in limite elastico per la trazione dei calcestruzzi;

b) rivestimento di calcestruzzo armato nel quale tali sollecitazioni siano superate, almeno in linea storica e sempre in campo elastico (3).

Nel primo caso è sufficiente eseguire un buon anello di rivestimento capace di assorbire, per trazione, le sollecitazioni dovute alle pressioni interne senza fessurarsi: abbiamo visto che tale anello può realizzarsi facilmente con un getto di calcestruzzo a pressione su casseforme metalliche.

La esecuzione di tale getto richiede che la galleria sia scavata a piena sezione e che non vi sia ingombro di armature di sostegno nel tratto in lavorazione: potranno essere utilmente impiegate a tale scopo centine metalliche di profilato normale, ottenute trasformando il ferro di armatura che, necessariamente, trattandosi di gallerie in rocce non collaboranti, deve essere messo di sicurezza nel calcestruzzo. Tali centine potranno essere messe alla distanza di 50 cm. circa.

Per il dimensionamento si procede quindi nel modo seguente:

— si calcola la quantità di ferro per ml. di galleria, considerando di assorbire tutta la trazione, sia pure con carico di sicurezza 2000 kg/cm² e trasformando l'armatura ideale così ottenuta in profilato di profilo normale;

— si determina lo spessore del rivestimento, tenendo conto della presenza del ferro e partendo dalla sollecitazione di trazione limite al l'intradosso [12]; poiché, come si è già detto, non è difficile ottenere calcestruzzi che diano 30 kg/cm² a trazione pura, si può assegnare a tale limite il valore di 15-20 kg/cm²; è tuttavia opportuna una sperimentazione preliminare.

---

(3) - Le nuove teorie di calcolo, basate sulle deformazioni plastiche, che avranno indubbie applicazioni nel campo del cemento armato normale [11] non ci sembra possano applicarsi al nostro particolare tipo di cemento armato nel quale il calcestruzzo deve resistere a trazione ed il ferro ha solo funzioni di sicurezza. E' quindi preferibile applicare la classica teoria elastica, mantenendo di riserva e sia pure determinandolo analiticamente, l'eventuale comportamento plastico, almeno fino a quando la sperimentazione non ci avrà dato più sicuri elementi sui limiti delle deformazioni plastiche senza fessurazioni e sulle corrispondenti sollecitazioni. Tanto più che dalla applicazione di una diversa teoria non si trarrebbe, a differenza del cemento armato normale, quel sensibile vantaggio economico dovuto alla economia di ferro; essendosi invece già raggiunto tale scopo, come si è detto e come ci sembra lecito, riducendo i coefficienti di sicurezza del calcestruzzo e del ferro (1,5 ÷ 2).

Lo scavo può procedere a piena sezione, anche in terreni difficili, in quanto, subito a tergo dell'avanzamento, vengono messe in opera le centine metalliche costituite, come si è innanzi detto, di profilati a doppio T, di preferenza della serie rinforzata, a distanze di non molto superiori allo spessore del rivestimento. Tale sistema è largamente usato all'Estero e negli Stati Uniti ha raggiunto una diffusione pressochè totalitaria [13].

La galleria può essere in tal modo interamente perforata e successivamente rivestita con un anello di calcestruzzo nel quale restino annegate le centine metalliche come armatura definitiva.

Si può osservare che nell'anello armato manca il ferro di armatura all'intradosso e che il ferro di estradosso è concentrato in grossi elementi posti a considerevole distanza. Ma il ferro di intradosso, in piccole quantità, può essere aggiunto, detraendolo dal ferro di estradosso: la nostra esperienza sul getto con pompe ad aria compressa ci consiglia tuttavia di rinunciare anche a tale leggera armatura per avere una migliore qualità di calcestruzzo all'intradosso. Per quanto riguarda invece la concentrazione dei ferri di armatura all'estradosso, forse unico elemento negativo di tutto il sistema, si ha motivo di ritenere che la breve distanza fra le armature, in relazione allo spessore del rivestimento, non consenta che si determino alterazioni sensibili nella distribuzione delle sollecitazioni: comunque si deve sempre tener presente che il ferro ha solo funzioni di sicurezza e che invece, per quanto si è detto nelle premesse, l'intero compito statico è affidato al calcestruzzo.

A tergo delle centine è talvolta necessario inserire armature di protezione, le quali non possono per lo più essere tolte al momento del getto: saranno successivamente avvolte dalle iniezioni ma comunque costituiscono un elemento eterogeneo a tergo del rivestimento. E' noto che in molti casi si lascia il legname a tergo dei rivestimenti e che anzi la tecnica americana prevede l'abbandono completo delle armature dietro il getto [1]; in ogni caso sarà bene curare che le iniezioni possano veramente involgere tutto il legame rimasto a tergo. Qualora si volesse sostituire il legname di protezione possono trovare utile impiego elementi di cemento armato di ferro, infilati a tergo delle centine.

In appendice, nota 2, si è svolto un esempio numerico il quale conferma il vantaggio economico, oltrechè esecutivo, dell'anello monolitico gettato su centine metalliche di armatura, in confronto alla doppia struttura, costituita da un pre-anello di calcestruzzo semplice e da un anello di cemento armato.

Si è presa in esame una galleria del diametro finito di m. 3,00 con pressione di esercizio di 5 atm.; fissato in 15 kg/cm² il limite di trazione all'intradosso, si è ottenuto il seguente dimensionamento del rivestimento:

1° caso (pre-anello semplice e anello armato)

spessore dell'anello armato: $e_1 = 30$ cm.
spessore del pre-anello: $e_2 = 50$ cm.
ferro di armatura: 8 ø 24 pari a 28,5 kg. per m² di rivestimento.

2° caso (anello monolitico)

spessore dell'anello: $e_1 = 55$ cm.
ferro di armatura: 2 NP 140 per ogni ml. pari a 28,5 kg. per m² di rivestimento.

Lo spessore complessivo del calcestruzzo si riduce quindi da 80 a 55 cm. e l'elemento veramente resistente passa da 30 a 55 cm. con indubbi vantaggi per la tenuta. Il costo del ferro, tenendo conto dei vantaggi esecutivi, può ritenersi equivalente.

Nella nota 3 è stata sviluppata una trattazione più ampia, relativa ai rivestimenti monolitici ed all'impiego di centine metalliche. Si è voluto fornire qualche elemento indicativo sulle possibilità di sostegno della roccia da parte di centine metalliche, calcolate per resistere alla pressione interna della galleria.

Per la classifica della roccia e quindi per le dimensioni dell'arco di carico, si è fatto riferimento ad una nota tabella di K. Terzaghi [3] qui di seguito riportata.

Nella fig. 8 sono riportati i diagrammi conclusivi che mettono in evidenza la correlazione fra pressione interna, spessore del rivestimento, quantità di ferro e caratteristiche della roccia da sostenere.

Noto infatti il diametro finito della galleria e la pressione di esercizio, con il diagramma a) si determina lo spessore del rivestimento: se tale spessore è inferiore ad un limite superiore di economia (nel diagramma abbiamo fissato 90 cm.) il rivestimento è attuabile; in caso contrario bisogna ricorrere ad altro sistema. Il limite di 25 cm. è invece un limite inferiore di esecuzione.

Con il diagramma b) si determina la quantità di ferro, misurata in mm. di spessore di lamierino ideale, capace di resistere alla pressione interna; con la tabella unita al diagramma si determina il NP e l'interasse del profilato da usare come centina metallica di sostegno.

Infine dal diagramma c) si trova il valore corrispondente di α della formula $\alpha\,(B+H_t)$ e quin-

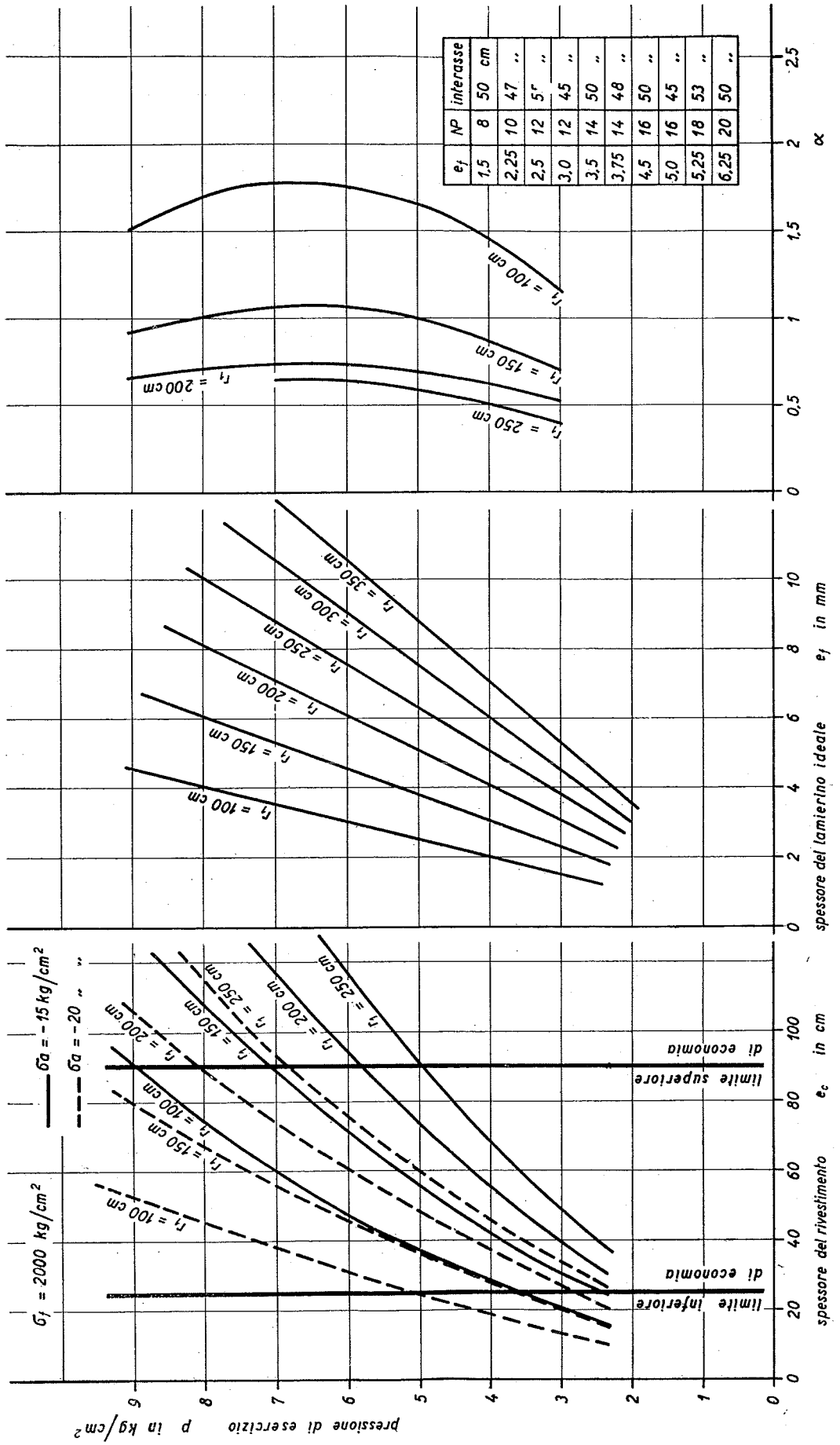


Fig. 8 - Correlazione fra pressioni interne, spessore del rivestimento, quantità di ferro e caratteristiche della roccia da sostenere nelle gallerie in pressione

CARICO DI ROCCIA H_p SULLA VOLTA DI SOSTEGNO DELLA GALLERIA DI LARGHEZZA B E DI ALTEZZA H_t A PROFONDITA' MAGGIORE DI 1,5 $(B+H_t)$

(dal TERZAGHI)

Tipo di roccia	*Carico* H_p	*Annotazioni*
1. — Dura e intatta	0	Leggero rivestimento di protezione solo se in presenza di scaglie
2. — Dura - stratificata o scistosa	da 0 a 0,5 B	Leggera armatura
3. — Massiccia - moderatamente fessurata	da 0 a 0,25 B	Il carico può cambiare irregolarmente da punto a punto
4. — A grossi blocchi o moderatamente stratificata	da 0,25 B a 0,35 $(B+H_t)$	Senza pressione laterale
5. — A piccoli blocchi o sensibilmente stratificata	da 0,35 a 1,10 $(B+H_t)$	Senza pressione laterale o quasi
6. — Completamente frantumata ma chimicamente intatta	1,10 $(B+H_t)$	Considerevole pressione laterale - Richiede continui contrasti per la estremità inferiore delle centine o centine circolari
7. — Roccia disgregata, a piccola profondità	da 1,10 a 2,10 $(B+H_t)$	Forti pressioni laterali - Si richiedono sostegni rovesci
8. — Roccia disgregata, a grande profondità	da 2,10 a 4,50 $(B+H_t)$	Si consigliano centine circolari
9. — Roccia rigonfiante	Oltre 250 piedi e indipendente dal valore di $(B+H_t)$	Sono necessarie centine circolari

di, dalla tabella del Terzaghi, il tipo di roccia che può essere sostenuta con quel tipo di centina. Giova osservare che il diagramma c) è stato costruito considerando la sola stabilità dell'arco della centina: nel caso di rocce a spinte laterali, ove non siano usate centine circolari, occorrerà verificare la stabilità dei piedritti.

Si possono quindi avere in maniera rapida, sia pure in forma del tutto indicativa ,alcuni orientamenti sul rivestimento e sulle possibilità di sostenimento della roccia. Trattasi di elementi orientatativi che devono essere confermati da un esame più rigoroso o, meglio, da esperienze *in situ,* specie per quanto concerne la possibilità di collaborazione e di sostenimento della roccia; possiamo tuttavia affermare ,per diretta esperienza, che tali elementi sono largamente sufficienti a dare un indirizzo di prima approssimazione.

Una prima applicazione su larga scala del sistema delle centine metalliche è stata fatta nelle gallerie in pressione degli Impianti del Sangro costruite dalla Azienda Comunale Elettricità ed Acque di Roma: le figure 9 e 10 mostrano due tratte in costruzione delle suddette gallerie (II lotto -- Costruttrice: Impresa Pietro CIDONIO) che attraversano formazioni antiche di argille scagliose commiste a calcari marnoso-arenacei dell'eocene.

Più complesso è il caso del rivestimento al cui intradosso, per motivi dimensionali e di pressione interna, vengono superati, per spessori ragionevoli, i limiti di trazione ammessi per il calcestruzzo. In tale evenienza le funzioni di resistenza e di tenuta verrebbero affidate ad un elemento che, specie quando manchi la collaborazione della roccia, pur con i miglioramenti derivanti dal comportamento elasto-plastico dell'insieme [6], tende inevitabilmente alla fessurazione.

Poichè in questo caso il cemento armato, sia pure con notevoli quantità di ferro, non garantisce la tenuta, è opportuno passare ad altri sistemi: uno dei migliori ci sembra quello di fare un rivestimento di gunite di considerevole spessore (7-8 cm.), armato con tondino di ferro in quantità tale da resistere a tutta la pressione interna, gettato su un pre-anello di calcestruzzo semplice o meglio leggermente armato. Non si tratta, giova osservarlo, di un intonaco di gunite ma piuttosto di un vero rivestimento sottile, dotato di caratteristiche elastoplastiche molto superiori al calcestruzzo normale [6] e quindi capace di sopportare sollecitazioni e conseguenti deformazioni di notevole entità.

Un'applicazione di tale sistema è stata fatta, con risultati soddisfacenti, nella galleria di deri-

Fig. 9 - Galleria di derivazione dal f. Sangro (A.C.E.A.) II° Lotto - armatura con centine metalliche circolari in terreni spingenti

Fig. 10 - Galleria di derivazione dal f. Sangro (A.C.E.A.) II° Lotto - armatura con centine metalliche a ferro di cavallo in terreni poco spingenti

vazione della diga di Bort [14]. Qualche recente applicazione è stata fatta anche in Italia ma non se ne conoscono, almeno fin a questo momento, i risultati tecnici.

Per la costruzione del pre-anello può essere conveniente l'uso delle centine metalliche.

Il cemento armato normale non è dunque il materiale più adatto per la esecuzione dei rivestimenti delle gallerie in pressione; tale osservazione si collega alle considerazioni sui tubi di cemento armato per i quali si ricorre al lamierino di tenuta ed alla pre-compressione trasversale.

Nelle gallerie è quindi preferibile affidare la tenuta ad un calcestruzzo di adeguato spessore e di elevate qualità e, quando le sollecitazioni di trazione superino comunque i limiti delle resistenze massime, ricorrere a rivestimenti aggiuntivi aventi migliori qualità elasto - plastiche del calcestruzzo armato normale (pacchetti di reti — gunite armate). Il ferro di armatura deve essere in ogni caso aggiunto, quando si consideri l'anello sciolto, per sicurezza ed in quantità tale da assorbire tutta la pressione interna, sia pure con elevati carichi di sicurezza (4).

(4) - Altri procedimenti, come la precompressione del rivestimento monolitico a mezzo di iniezioni o la esecuzione di rivestimenti ad elementi separati e successivamente precompressi anche essi a mezzo di iniezioni (sistema KIESER), sia pure attuati con esito positivo, sono rimasti esperimenti isolati non avendo avuto la necessaria conferma derivante da una casistica più generalizzata.

4 - Gallerie senza pressione interna

Appartengono a tale categoria di opere le gallerie idrauliche a pelo libero, le gallerie ferroviarie, le gallerie stradali: tutte opere nelle quali il rivestimento ha solo funzioni di sostenimento della roccia e subordinatamente, soltanto nelle gallerie idrauliche, di copertura della superficie rocciosa per ridurne le resistenze al moto ed aumentarne la impermeabilità: ove la roccia non abbia necessità di sostenimento, il rivestimento può limitarsi al solo contorno bagnato.

Abbiamo finora trattato di rivestimenti di calcestruzzo: osserviamo che nelle gallerie senza pressione interna non sempre viene usato il rivestimento di calcestruzzo ma talvolta si ricorre ad altri tipi di murature: mattoni pieni, blocchetti di cemento, pietrame, usate anche assieme in calotta ed ai piedritti.

Non è compito della presente nota fare l'esame critico di tali diversi tipi di rivestimento, tanto più che ad essi si ricorre, per facilità di esecuzione, maggiore articolazione e presa più rapida, di solito nei terreni sciolti, ove le gallerie richiedono maggiori armature di legname. Diremo soltanto che particolari situazioni locali di materiali o di mano d'opera o tradizioni di determinati ambienti tecnici, possono talvolta favorire tali soluzioni; ma la tecnica moderna, almeno nelle gallerie in roccia, tende al rivestimento monolitico di calcestruzzo semplice ed armato: la nostra esperienza esecutiva non ha, per altri tipi di rivestimento, elementi tanto favorevoli da esser considerati determinan-

ti. Per cui anche nelle gallerie senza pressione interna faremo riferimento al rivestimento di calcestruzzo come più economico e tecnicamente più efficiente.

Nelle gallerie di cui trattiamo devono essere esaminate separatamente, per problemi costruttivi nettamente diversi:

— le gallerie di *piccola sezione,* intendendo per tali le gallerie di minima sezione di scavo (circa 8 m².);

— le gallerie di *media sezione,* da 8 a 40 m².;

— le gallerie di *grande sezione,* oltre i 40 m².

Le gallerie di *piccola sezione,* di norma policentriche, non hanno molti problemi o incertezze costruttive: si scavano a piena sezione, si sostengono, ove necessario, con armature provvisionali, si rivestono con modesti spessori (20-25 cm.) a scavi ultimati oppure a tergo dell'avanzamento, se la roccia non si mantiene senza sostegno.

Le modeste quantità di calcestruzzo ed il tipo di galleria non determinano problemi tecnici ed economici di esecuzione: il getto può essere fatto anche a mano ma sono comunque consigliabili le casseforme metalliche per evitare, come si è anzidetto, la necessità dell'intonaco. L'arco rovescio viene gettato alla fine, in regresso.

Nemmeno in terreni con spinte laterali si hanno problemi costruttivi purchè il rivestimento segua, a breve distanza, l'avanzamento: nella galleria di derivazione del lago di San Giuliano, della lunghezza km. 3600, a sezione policentrica di 8 m²., costruita su progetto dello scrivente dalla Impresa Pietro CIDONIO per conto del Consorzio di Bonifica di Metaponto e della Media Valle del Bradano, scavata pressochè interamente in calcari fratturati del cretaceo, un passaggio di circa 500 metri in argille azzurre plioceniche è stato agevolmente superato sostituendo un turno di scavo con uno di getto (fig. 11)

I primi problemi nascono nelle gallerie di *media sezione,* specie nelle maggiori di tale categoria, cui appartengono le gallerie ferroviarie a semplice binario.

Fino a m². 20, se la roccia non ha necessità di sostegno, lo scavo può procedere a piena sezione ed il rivestimento può essere eseguito indipendentemente dallo scavo. Fuori di questo limite lo scavo deve procedere solo in calotta (sempre a piena azione) e, dopo il rivestimento di questa, si può passare allo scavo dello strozzo ed alla muratura dei piedritti.

E' infatti ormai provato che, *con normali mezzi di scavo e di sostegno,* il limite economico dello scavo a piena sezione è 20 m².: ne consegue che dividendo all'incirca per metà una galleria di 30 m². si ottengono due sezioni economiche di scavo.

In secondo luogo ben poche gallerie maggiori di 20 m². possono essere mantenute senza armature di sostegno: un eventuale scavo a piena sezione richiederebbe quindi un' armatura molto onerosa per quantità di legname e difficoltà di posa in opera.

Ultima considerazione, ma non certo meno importante, è quella che si riferisce ai maggiori spessori di scavo rispetto alla linea teorica e che, inevitabili in ogni tipo di roccia, possono ridursi con sezioni di scavo di minor entità, più facilmente profilabili.

Fig. 11 - Galleria S. Giuliano - S. Lucia (Consorzio di Bonifica di Metaponto e della Media Valle del Bradano) - Tratta in argilla

Lo scrivente ha di recente seguito la ricostruzione della ferrovia Napoli-Piedimonte d'Alife della Compagnie des Chemins de Fer du Midi de l'Italie, tutt'ora in corso di esecuzione: il tracciato della ferrovia comprende sei tratte in galleria, a semplice binario, le quali attraversano terreni di natura disparata: calcari fratturati, materiali vulcanici più o meno cementati (tessarone), argille scagliose.

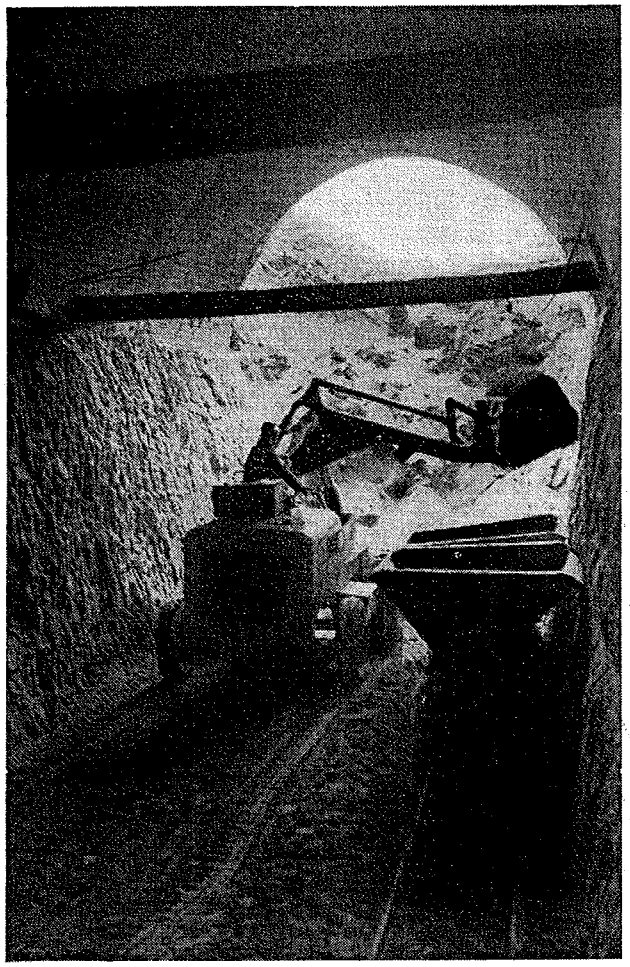


Fig. 12 - Ferrovia Napoli-Piedimonte d'Alife (Compagnie des Chemins de Fer du Midi de l'Italie) - Galleria di Triflisco

versa importanza e non può considerarsi solo in funzione del rivestimento. La possibilità di introdurre mezzi di opera straordinari, quali autocarri, pale caricatrici su cingoli, caricatori continui, perforatori su autocarri etc., dà al problema aspetti diversi: per cui la esecuzione del rivestimento a sostegno della roccia od altri sistemi di sostenimento, devono essere riguardati in relazione alle modalità esecutive dello scavo ed alla sua economia.

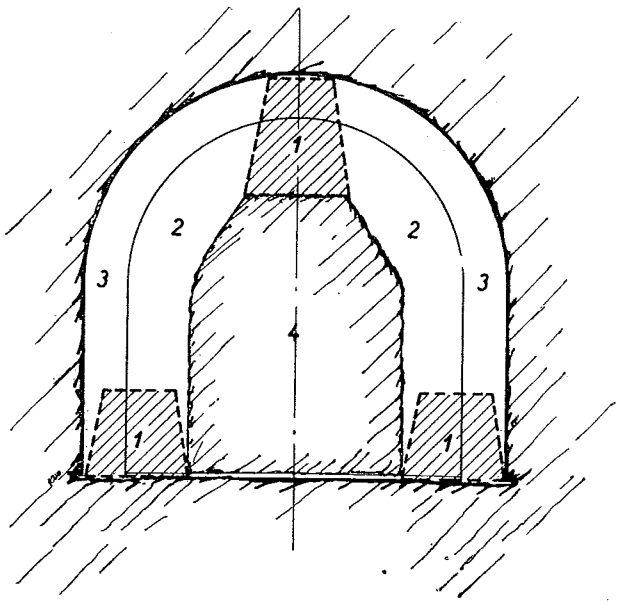


Fig. 13 - Fasi di lavoro nel sistema dei tre avanzamenti

Il metodo di esecuzione anzidetto si è dimostrato efficace in qualsiasi tipo di materiale (fig. 12); il rivestimento della calotta procedeva a distanze variabili dall'avanzamento, a seconda della natura del terreno.

Un semplice conto economico ha dimostrato, nel caso specifico, che altri sistemi di esecuzione sarebbero stati più onerosi; il costo di un eventuale sostegno con centine metalliche, comunque attuabile solo nelle gallerie in calcare e tessarone ma non in quelle in argilla, non sarebbe stato compensato dal minor costo di scavo, anche con ricupero di buona parte delle centine.

Le gallerie di *grande sezione* hanno invece notevoli problemi esecutivi: intendiamo riferirci alle gallerie ferroviarie a doppio binario, alle gallerie stradali, alle grandi gallerie idrauliche.

E' evidente che in tali categorie di opere il mezzo di sostegno della roccia, capace di consentire lo scavo alla massima sezione possibile, assume di-

A meno di eccezioni rarissime, una galleria di grande sezione non può scavarsi senza sostegno della roccia; per cui i due aspetti della questione, scavo e sostegno, sono fra loro strettamente dipendenti.

Il sistema più comune è quello dello scavo e del rivestimento della calotta e quindi scavo dello strozzo e getto dei piedritti, come nelle gallerie di media sezione; ma tale sistema non risolve il problema costruttivo in maniera del tutto soddisfacente.

Si può anzitutto rilevare che lo scavo di circa metà della galleria deve essere iniziato a livello più alto del piano di *regolamento* con un vincolo oneroso per l'organizzazione dei trasporti; in secondo luogo l'inizio dello strozzo è legato alla ultimazione dello scavo e del getto della calotta; ed infine lo scavo ed il getto dei piedritti per *campioni* e per sottomurazione comportano oneri considerevoli. Giova quindi ricorrere ad altri sistemi di esecuzione i quali, con vincoli minori, consentano maggiori velocità di costruzione.

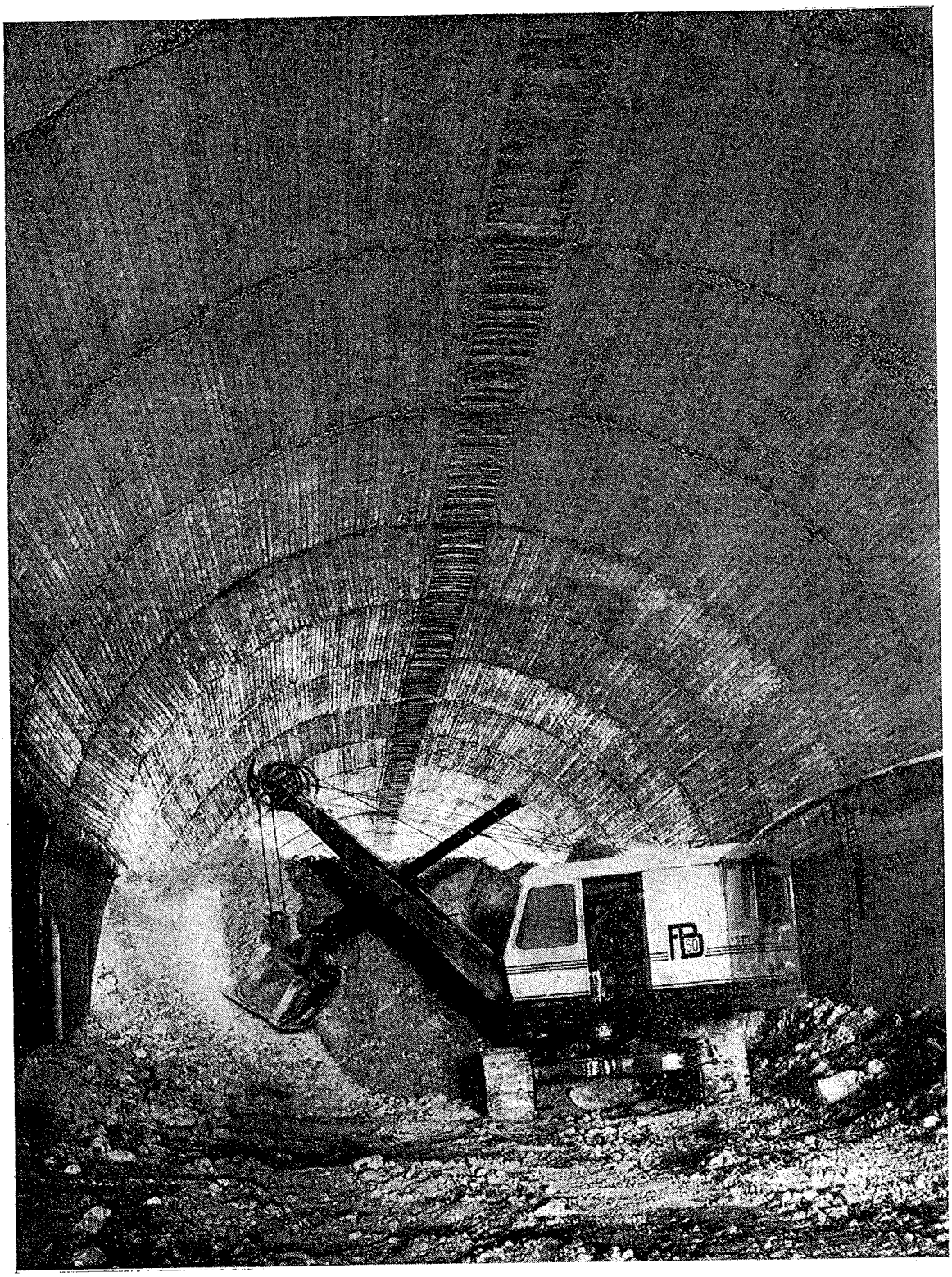


Fig. 14 - Galleria stradale sulla S. S. Frentana (A.C.E.A.)

La calotta, ove possibile, può essere ridotta ad un *calottino* di superficie più limitata, strettamente necessaria al sostenimento della volta: tale sistema è tuttavia legato, come già nel sopraccennato caso della galleria di Narni, a condizioni particolari di roccia e di getto e non può quindi essere generalizzato.

Un sistema efficace e che può essere usato in qualsiasi tipo di roccia è invece quello dei *tre avanzamenti* (fig. 13) che viene realizzato nelle seguenti fasi di esecuzione (metodo tedesco o del nucleo centrale):

1. — scavo di due avanzamenti al piede ed uno in calotta: tale lavoro, avuto riguardo alle attuali velocità che si raggiungono negli avanzamenti, può essere eseguito contemporaneamente, anche su due imbocchi, in breve tempo. La galleria risulta in tal modo forata in tutta la sua lunghezza e quindi è assicurata la ventilazione per le fasi successive di lavoro: osserviamo a tal proposito che il problema della ventilazione è di grande importanza nella esecuzione di gallerie di grande sezione, nelle quali siano impiegati numerosi mezzi con motori termici;

2. — connessione dei tre cunicoli e profilatura della sagoma della galleria: tale lavoro, sebbene oneroso, può essere fatto agevolmente e con precisione ed anche in terreni difficili non sono richieste armature di notevole entità, potendosi contare sulla collaborazione del nucleo centrale. Il materiale della profilatura viene convogliato, attraverso i cunicoli, verso un imbocco della galleria (ad es. Nord);

3. — getto dei piedritti dall'imbocco Sud, subito a tergo della profilatura e procedendo nello stesso senso Sud-Nord;

4. — getto della calotta dallo stesso imbocco Sud, sempre in senso Sud-Nord;

5. — rimozione del nucleo centrale, a tergo del rivestimento.

In tal modo il materiale delle profilature esce dall'imbocco Nord e quello del nucleo dall'imbocco Sud. Il calcestruzzo di rivestimento, se viene messo in opera con pompa, può essere introdotto da qualsiasi imbocco, con preferenza per l'imbocco Nord; mentre se viene portato a piè d'opera con mezzi normali per essere gettato a mano, deve entrare necessariamente dall'imbocco Nord, transitando a piano di avanzamento superiore.

Tale sistema è stato usato con soddisfazione in una galleria di deviazione di una strada statale, costruita nel cantiere della diga sul f. Aventino dell'Azienda Comunale Elettricità ed Acque di Roma (Costruttrice: Impresa Pietro CIDONIO di Roma) (fig. 14).

E' tuttavia evidente che i maggiori vantaggi nello scavo si hanno quando si può procedere a piena sezione. Armando la galleria con centine metalliche, a distanza ravvicinata, si può procedere a piena sezione anche in terreni molto difficili, purché l'avanzamento sia veloce e non si tenga gran conto dei sovraspessori del rivestimento. Disponendo di particolari mezzi di scavo, di pompe per il getto di calcestruzzo e di casseforme telescopiche, è sempre conveniente procedere a piena sezione, compatibilmente con la sicurezza dell'opera.

Può valere ad esempio la galleria autostradale della fig. 15, realizzata in Venezuela su progetto americano. (5)

La galleria avente una sezione totale di scavo di m². 72,00 attraversa formazioni molto varie di graniti decomposti e scisti; rocce da sostenere validamente. Lo scavo è stato eseguito a piena sezione e sostenuto con centine a doppio T ed ala larga (H=L) dell'altezza di cm. 20, del peso di 54 kg/ml., poste alla distanza di 50 cm. con un'impiego di 25,00 kg. di ferro per m³. di scavo. Il capitolato di oneri prevedeva il recupero del 50% di centine, ponendo a carico della Amministrazione le centine rimaste in opera fino alla concorrenza delle previsioni: il

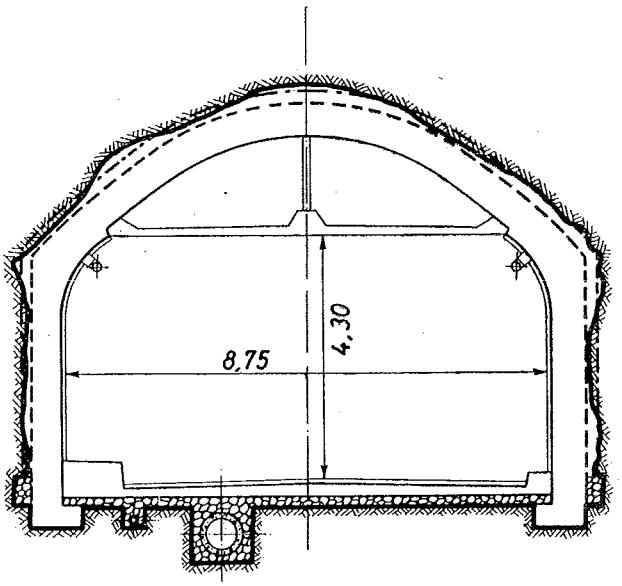


Fig. 15 - Galleria sull'autopista La Guaira - Caracas

(5) - Galleria sull'autopista Caracas-La Guaira - Costruttrice MORRIS & KNUDSEN. Lo scrivente si è interessato alle modalità di costruzione di tale galleria in occasione dello studio esecutivo di analogo lavoro nel Venezuela, per il quale fu richiesta la consulenza dell'Impresa CIDONIO.

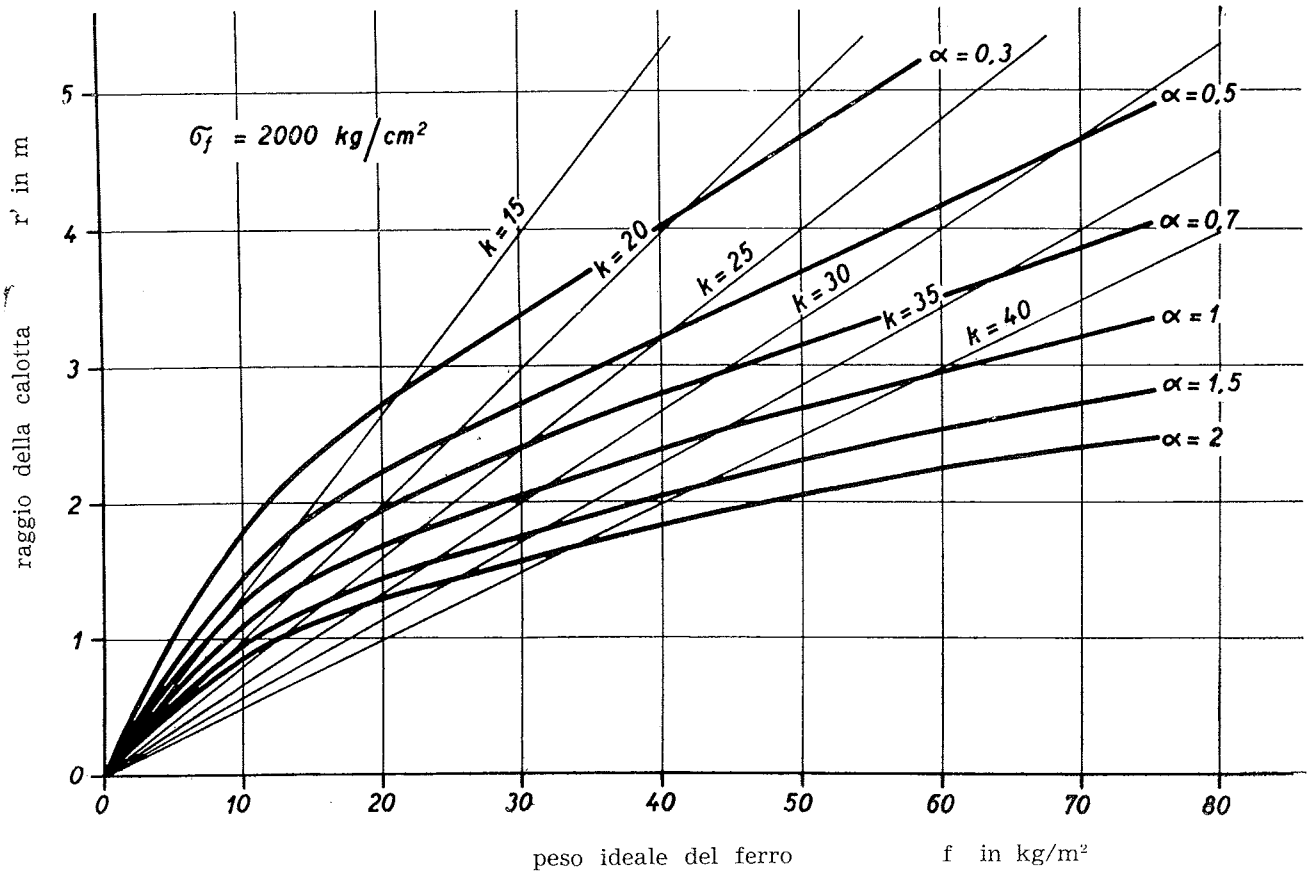


Fig. 16 - Limiti economici di impiego di centine metalliche per il sostegno della volta

supero era a carico della Impresa. Gli avanzamenti hanno raggiunto punte di 14 m. al giorno, i rivestimenti sono stati eseguiti con due pompe press-weld, anch'essi a velocità ragguardevoli.

Vale anche in questo caso, per l'uso delle centine metalliche, l'osservazione da noi fatta a proposito delle gallerie in pressione: il sistema non può essere accettato con estrema semplicità ma è doveroso tenerlo presente anche nella economia dei nostri lavori.

A titolo puramente indicativo, con il metodo grafico (trial load method) già sviluppato alla nota 2 e mediante il quale si sono costruiti i diagrammi della fig. 8 c), sempre facendo riferimento per la classifica della roccia alla sopraripportata Tabella del Terzaghi, abbiamo tracciato le curve del diagrama della fig. 16; in tale diagramma, per vari valori di α, sono riportati, in funzione del raggio di calotta (in questo caso si considera il raggio di *scavo*) i pesi ideali (f) di ferro per m². di contorno, necessari al sostenimento della volta e determinati attraverso la trasformazione del W, derivato dal calcolo di stabilità della volta, in reali profilati secondo la tabella unita al diagramma.

Abbiamo poi considerato che i vantaggi dello scavo a piena sezione e l'eliminazione di ogni armatura di legname, consentano di sacrificare un determinato peso limite di ferro (K) per ogni metro cubo di scavo. Abbiamo anche considerato che i maggiori spessori del rivestimento non riconosciuti dalla stazione appaltante (cercando di non confondere i fuori sagoma naturali da quelli provocati dal sistema di scavo) siano compensati dalla maggiore facilità di esecuzione.

Con le notazioni di cui sopra e riferendosi a centine circolari si ha:

$$K \cdot \pi \cdot r^2 = f \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

da cui

$$f = \frac{K \cdot r}{2}$$

Il tracciamento di tali rette sul diagramma della fig. 16 indica i limiti economici per l'impiego delle centine metalliche in relazione alla roccia da sostenere.

Ed infine ci sembra utile accennare ad altro sistema di sostegno della roccia che, pur pro-

venendo dalla tecnica mineraria, è stato con successo applicato ai lavori civili: il sostegno della volta ed eventualmente delle pareti, mediante infissione ed eventuale cementazione di bulloni di adeguata lunghezza e diametro.

Il principio su cui si basa tale tipo di sostegno è abbastanza semplice (fig. 17): si presume che sistema, introdotto nel 1947 per la prima volta in miniera, ha conseguito in tutti i lavori minerari (si consideri che negli S. U. nel 1951 oltre 500 miniere hanno adottato tale metodo) nonchè i favorevoli risultati ottenuti in lavori civili sia in Europa [16] che in altre parti del mondo [15] dimostrano che il sistema può essere

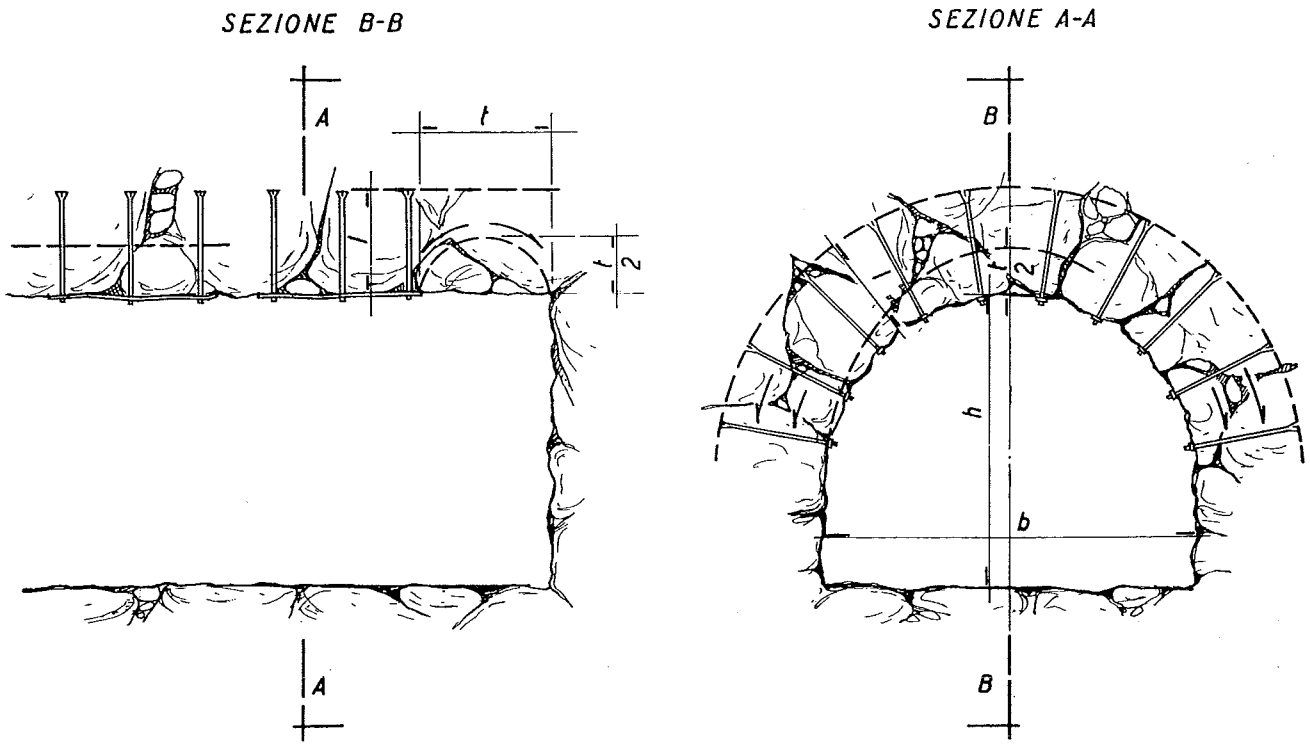


Fig. 17 - Bullonatura della roccia - Arco di scarico

il materiale appena scavato, quando non si tratti di materiale sciolto o particolarmente spingente per il quale sia richiesta un'armatura immediata (trattasi allora di gallerie *in terra* e non *in roccia*), sia capace di mantenersi per breve tempo e che comunque, al di sopra del limite di scavo, si formi un duplice arco, in senso trasversale e longitudinale, con freccia massima uguale alla metà della distanza fra l'ultima armatura ed il fronte di scavo. Ne consegue che procedendo alla infissione, subito a tergo dello scavo, di bulloni aventi una lunghezza almeno doppia della freccia massima dell'arco naturale, tali bulloni risulteranno ancorati alla roccia ferma e costituiranno tanti punti di sostegno per la volta [15].

Tale sistema non è del tutto intuitivo in quanto si ha l'impressione che il materiale del volto debba essere instabile per altezze ben maggiori di quelle indicate: ma il largo successo che il utilmente applicato, semprechè si abbiano le condizioni geologiche di cui più avanti diremo. Anche in Italia si è avuta qualche applicazione con esito favorevole [17].

Giova intanto osservare che la posizione dei bulloni è determinata dalla natura e dalla struttura della roccia, come appare dalla fig. 18.

I bulloni di ancoraggio sono normalmente di due tipi: un tipo ad estremità espansiva che si àncora direttamente alla roccia salda ed un tipo che viene cementato nel foro [18].

A titolo indicativo possiamo dire che per il sostegno di una volta nella quale si ritenga che l'arco naturale abbia una freccia massima di m. 2,50, un bullone di 1", capace di sopportare un carico di 12 ton. è sufficiente a sostenere circa 2 m^2. di superficie.

I limiti di impiego della bullonatura della roccia non possono essere facilmente determinati perchè sono troppi gli elementi che possono con-

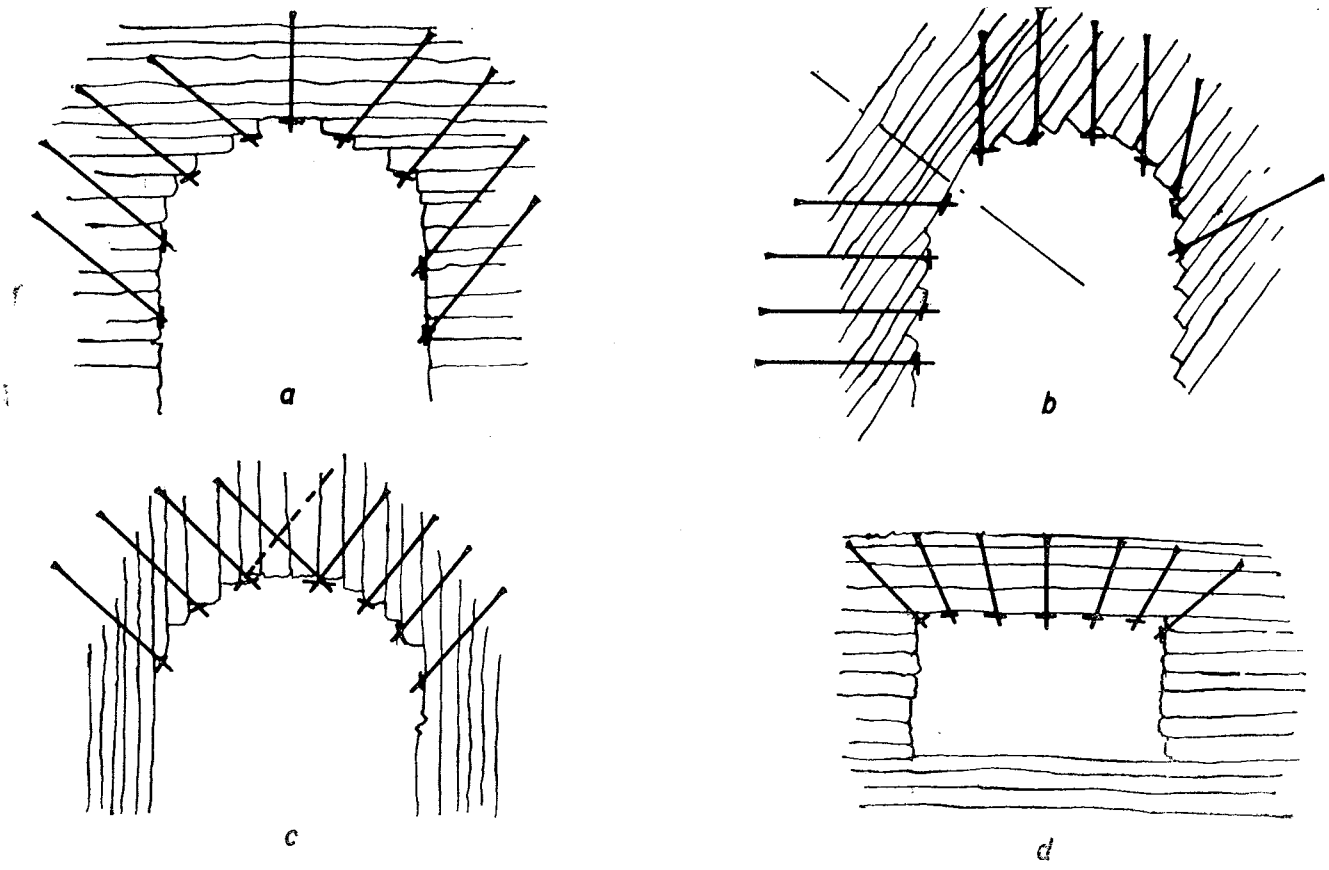


Fig. 18 - Bullonatura della roccia - Posizione dei bulloni in relazione alle stratificazioni

durre al successo od all'insuccesso del tentativo: natura della roccia, stratificazioni, fratturazioni, degradazioni od alterazioni chimiche, presenza di acqua etc. Possono tuttavia aver qualche valore le indicazioni seguenti [15]:

— nelle rocce dure, stratificate o scistose, moderatamente fessurate, a grossi blocchi o moderatamente stratificate (comprese fra i nn. 2 e 5 della soprariportata tabella di Terzaghi) la bullonatura della volta, con bulloni ed ancoraggi di ferro, ha dato in genere buoni risultati; non è invece consigliata nelle stesse rocce fortemente stratificate od a piccoli blocchi, quando in una normale armatura siano necessari i marciavanti;

— nelle rocce frantumate, disgregate, a piccola o grande profondità o rigonfianti (comprese fra i 6 e 9 della medesima tabella) è invece consigliata la bullonatura con ancoraggio di calcestruzzo semprechè non siano necessari i marciavanti: nel qual caso la bullonatura può essere fatta come misura addizionale;

— nelle argille e nelle sabbie non vi è finora alcuna esperienza sui risultati della bullonatura.

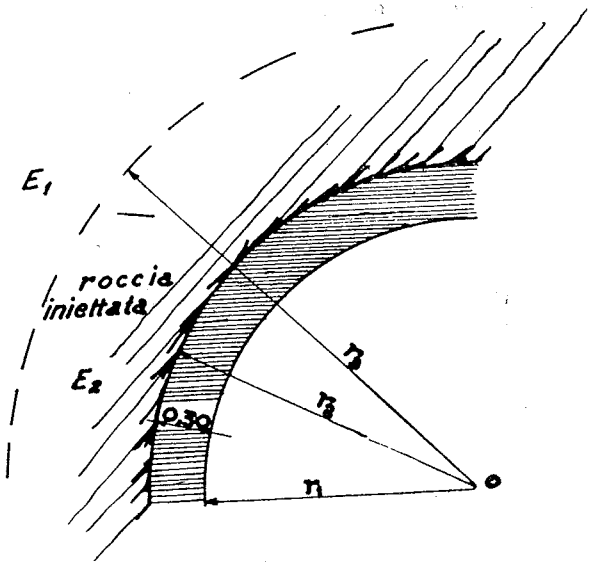


Fig. 19

APPENDICE (6)

Nota 1

Si consideri il caso di una galleria in una roccia che, essendo omogenea, isotropa e con modulo elastico di qualche entità rispetto a quello del calcestruzzo, collabori alla statica del rivestimento. Le caratteristiche della galleria siano le seguenti (fig. 19):

diametro interno finito: m. 3,00 (r_1 = 1,50)
spessore del rivestimento: cm. 30 (r_2 = 1,80)
pressione interna: 5 atm.

Si immagini di iniettare tutta una fascia a tergo del rivestimento per uno spessore di m. 2,00 (r_3=3,80) di modo che il modulo elastico della roccia passi dal valore E_1 al valore E_2. Sia in particolare:

E_1 = 20.000 kg/cm²
E_2 = 60.000 »
E_c = 200.000 »

Le varie tensioni da determinare siano:

σ_a = trazione all'intradosso del rivestimento;
σ_2 = trazione all'estradosso del rivestimento;
σ_3 = trazione nel primo strato di roccia iniettata;
σ_b = trazione nell'ultimo strato di roccia iniettata,

corrispondenti alle seguenti pressioni:

p_1 = pressione di esercizio all'interno della galleria;
p_2 = pressione residua all'esterno del rivestimento;
p_3 = pressione residua all'esterno della roccia iniettata.

Se si trattasse di anello sciolto, senza alcuna collaborazione da parte della roccia, le sollecitazioni sarebbero evidentemente (LAMÈ)

$$\sigma_a = - p_1 \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = - 27{,}73 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_2 = - p_1 \frac{2\, r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = - 22{,}73$$

$$\sigma_3 = \sigma_b = 0$$

Trattasi quindi di sollecitazioni non sostenibili ma che sostanzialmente vengono ridotte dalla collaborazione della roccia iniettata. Dalla memoria sopraindicata [4], alla quale si rimanda per la completa trattazione e per alcune utili tabelle, abbiamo tratto le formule risolutive:

Posto

$$h = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 = 1{,}44$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{r_3}{r_2}\right)^\alpha \qquad \text{da cui} \quad \alpha = \frac{\log \frac{E_2}{E_1}}{\log \frac{r_3}{r_2}} = 1{,}47$$

m (POISSON) = 8

$$\begin{matrix}\beta_1 \\ \beta_2\end{matrix} = \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} + \frac{\alpha}{m} + 1} = \begin{matrix}< + 2{,}047 \\ < - 0{,}577\end{matrix}$$

$$k = \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^{\beta_1 - \beta_2} = 0{,}141$$

$$\varrho = \frac{\beta_1 - \beta_2}{1 - \frac{1 - \beta_1}{1 - \beta_2} k} = 2{,}398$$

$$\tau = \frac{E_c}{E_2}\left(\frac{1}{m} + \beta_2 + \varrho\right) = 6{,}487$$

Si ottengono i rapporti fra le pressioni:

$$\frac{p_1}{p_2} = 1 + \frac{1}{2}(h - 1)\left(\tau - \frac{1}{m} + 1\right) = 2{,}619$$

$$\text{da cui} \quad p_2 = \frac{5.000}{2{,}619} = 1{,}909 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{1 - \beta_2}{\varrho}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\beta_1} + 1 = 1{,}146$$

$$\text{da cui} \quad p_3 = \frac{1{,}909}{1{,}146} = 1{,}665 \text{ kg/cm}^2$$

ed infine

$$\frac{\sigma_a}{p_2} = 1 - \frac{1}{2}(h + 1)\left(\tau - \frac{1}{m} + 1\right) = - 7{,}982$$

$$\text{da cui} \quad \sigma_a = - 15{,}24 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_2}{p_2} = \frac{1}{m} - \tau = - 6{,}362$$

$$\text{da cui} \quad \sigma_2 = - 12{,}14 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_3}{p_2} = - 2{,}398 + 0{,}577 = - 1{,}821$$

$$\text{da cui} \quad \sigma_3 = - 3{,}48 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_b}{p_3} = - 1$$

$$\text{da cui} \quad \sigma_b = - 1{,}66 \text{ kg/cm}^2$$

La sollecitazione massima all'intradosso si è quindi ridotta da 27,7 a 15,2 kg/cm²., mentre all'esterno della roccia iniettata si ha un valore residuo di 1,6 kg/cm². Valori ambedue accettabili e che garantiscono la stabilità del rivestimento.

---

(6) - Ringrazio l'ing. G. BELFIORE, dell'Ufficio Tecnico dell'"Impresa CIDONIO, per la sua valida collaborazione a questa appendice ed in particolare per l'attenzione con cui ha curato gli sviluppi numerici.
Mi è anche grato ricordare l'opera dell'ing. P. LEONI e del tecnico A. LIBERTI per le numerose applicazioni grafiche del «*trial load method*» per il calcolo delle centine metalliche.

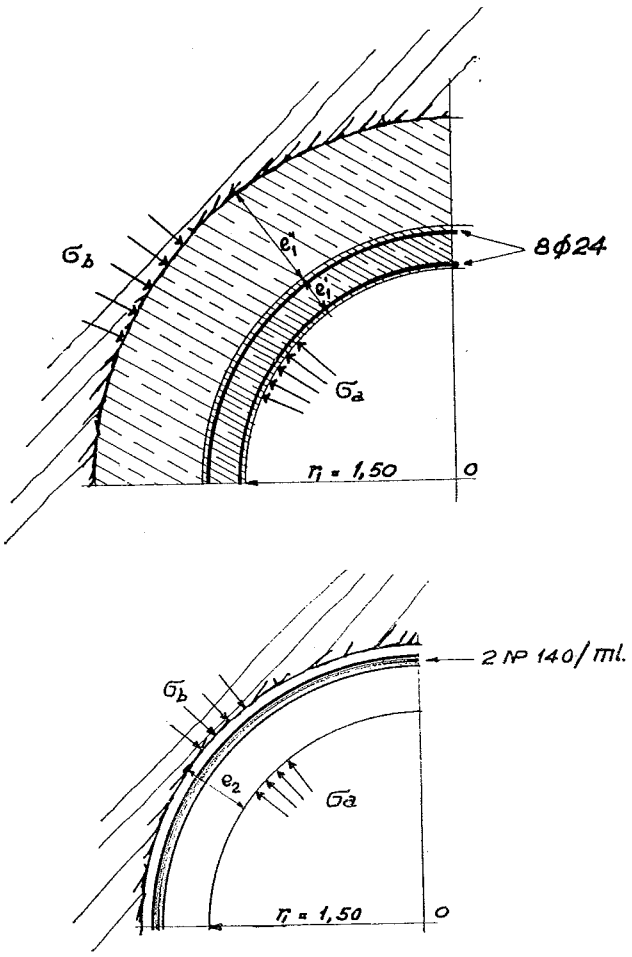


Fig. 20

Nota 2

Si consideri una galleria scavata in una roccia non collaborante alla statica del rivestimento.

Le caratteristiche della galleria siano le seguenti:

— Diametro interno finito: m. 3,00
— Pressione di carico: 5 atm.

Il rivestimento deve essere calcolato come anello sciolto e, come si è già detto nel testo della presente nota, può essere realizzato in due modi diversi:

— un pre-rivestimento di calcestruzzo semplice gettato contro roccia entro cui si costituisce l'elemento anulare resistente di cemento armato;
— un unico rivestimento monolitico, gettato contro roccia con pompa da calcestruzzo ed armato con centine metalliche messe precedentemente in opera a sostegno della roccia.

Un confronto economico, a parità di condizioni statiche, dimostra la convenienza del secondo sistema rispetto al primo.

Il dimensionamento dei rivestimenti viene condotto sotto alcune condizioni generali che si adattano ad ambedue i sistemi:

— i rivestimenti devono essere considerati come anelli sciolti, considerando nullo il contributo della roccia;
— la sollecitazione massima di trazione all'intradosso non deve superare i 15 kg/cm²;
— la quantità di ferro, comunque ed ovunque disposto, deve essere tale da resistere, quale lamierino ideale, all'intera pressione interna; si assumeranno carichi di rottura elevati (σ_f = 2.000 kg/cm².) per non trascurare il contributo che il calcestruzzo, anche se lesionato, continua a dare alla globale resistenza del sistema per le sue qualità plastiche;
— il rapporto $\frac{E_f}{E_c}$ può essere considerato uguale a 20 per il calcestruzzo armato ed uguale a 40 quando si tratti di calcestruzzo semplice, gettato a mano in condizioni disagiate. In realtà l'esperienza ha dimostrato che i valori assoluti di tali rapporti sono minori: ne conseguirà, in effetti maggior lavoro per il calcestruzzo e minore per il ferro. E' comunque accertato che i moduli elastici di calcestruzzi di elevate qualità sono maggiori dei moduli di calcestruzzi mediocri; per cui è lecito assumere

$$\frac{E_{c1}}{E_{c2}} = 2$$

— nel primo rivestimento si ammette una collaborazione dell'anello esterno alla resistenza del sistema, con sollecitazioni residue di trazione all'estradosso, per tener giusto conto dell'azione di risanamento delle iniezioni fra i due anelli e fra pre-rivestimento e roccia.

Sotto tali condizioni generali si può giungere al dimensionamento del rivestimento mediante l'applicazione delle formule di LAMÈ:

$$\sigma_n = \frac{2\,r^2_{n+1}\,p_{n+1} - (r^2_n + r^2_{n+1})\,p_n}{r^2_{n+1} - r^2_n}$$

$$\sigma_{n+1} = \frac{(r^2_{n+1} + r^2_n)\,p_{n+1} - 2\,r^2_n\,p_n}{r^2_{n+1} - r^2_n}$$

$$\frac{1}{E_n}\,\sigma_a = \frac{1}{E_{n+1}}\,\sigma_b$$

unitamente alla formula di MARIOTTE per il calcolo del ferro:

$$s = \frac{p_r}{\sigma_f}$$

nelle quali:

σ_n = sollecitazioni nell'anello generico n°
r_n = raggio dell'anello n°
σ_a = sollecitazioni sui lembi interni
σ_b = sollecitazioni sui lembi esterni
p_n = pressione che agisce sull'anello n°
σ_f = carico di sicurezza del ferro = 200 kg/cm².
s = spessore del lamierino ideale.

Assumendo r come valore del raggio interno del rivestimento (7) si ha in ambedue i casi:

$$s = \frac{pr}{\sigma_f} = 0{,}375 \text{ cm. pari } 28{,}5 \text{ kg.}$$

per ogni m². di rivestimento.

Tale armatura può realizzarsi con 8 ferri del ∅ 24 al ml., disposti fra estradosso ed intradosso ovvero con 2 travi a doppio T NP 140 per ml. (W = 81,9 cm³) disposte all'estradosso.

Nei due casi i rivestimenti risultano costituiti come appare dalla fig. 20.

Applicando le formule di LAMÈ si ottiene il dimensionamento degli anelli di calcestruzzo. E' evidente che nel primo caso le soluzioni sono infinite in quanto si possono assumere per e_1'' e e_1' infiniti valori collegati; poiché tuttavia il pre-anello deve avere uno spessore adeguato per il sostegno, sia pure temporaneo, della roccia esterna mentre l'anello interno, per ragioni esecutive, non può scendere al disotto di uno spessore limite, la migliore soluzione

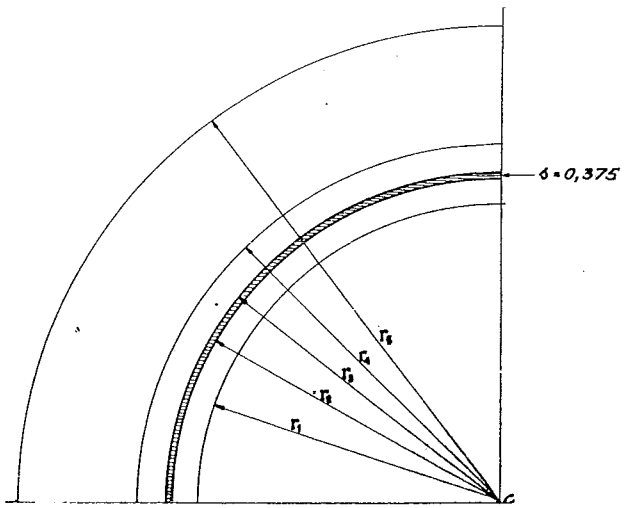


Fig. 21

si avrà, scegliendo fra i valori dei vari tentativi quelli che meglio rispondano a tali condizioni.

Ciò premesso, il procedimento di calcolo e le formule risolutive dei due casi sono le seguenti:

1° *caso* — Si fissa lo spessore e_1' per l'anello di cemento armato (ad es. 30 cm.) e si pone in mezzeria di tale anello l'armatura ideale calcolata con la formula di MARIOTTE. Si avrà (fig. 21):

$$r_1 = 150 \text{ cm.}$$

$$r_4 = r_1 + e'_1 = 180 \text{ cm.}$$

$$r_2 = \frac{1}{2}(r_4 + r_1 - s) = 164{,}81 \text{ cm.}$$

$$r_3 = \frac{1}{2}(r_4 + r_1 + s) = 165{,}19 \text{ cm.}$$

$$\sigma_a = 15 \text{ kg/cm}^2.$$

e con le seguenti formule risolutive si avranno le caratteristiche del rivestimento:

$$p_2 = \frac{\sigma_a (r_2^2 - r_1^2) + (r_2^2 + r_1^2) p_1}{2 r_2^2} = 3{,}28 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_2 = \frac{(r_2^2 + r_1^2) p_2 - 2 r_1^2 p_1}{r_2^2 - r_1^2} = -13{,}32 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{2f} = \frac{E_f}{E_c} \times \sigma_2 = -266{,}4 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_3 = \frac{\sigma_{2f} (r_3^2 - r_2^2) + (r_3^2 + r_2^2) p_2}{2 r_3^2} = -2{,}66 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{3f} = \frac{(r_3^2 + r_2^2) p_3 - 2 r_2^2 p_2}{r_3^2 - r_2^2} = -265{,}9 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_3 = \frac{E_c}{E_f} = -13{,}3 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_4 = \frac{\sigma_3 (r_4^2 - r_3^2) + (r_4^2 + r_3^2) p_3}{2 r_4^2} = 1{,}4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_4 = \frac{(r_4^2 - r_3^2) p_4 - 2 r_3^2 p_3}{r_4^2 - r_3^2} = -12{,}05 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_4' = \frac{E_c}{E_c'} \sigma_4 = -6{,}02 \text{ kg/cm}^2$$

Imponendo la condizione che la pressione residua sia uguale a zero si ottiene lo spessore del pre-anello:

$$r_5 - r_4 = e_1'' = r_4 \left(-1 + \sqrt{\frac{\sigma_4' - p_4}{\sigma_4' + p_4}}\right) \cong 50 \text{ cm.}$$

La sollecitazione residua all'esterno del pre-anello è data da

$$\sigma_5 = \sigma_b = \frac{2 r_4^2 p_4}{r_5^2 - r_4^2} = -4{,}42 \text{ kg/cm}^2$$

Riassumendo si ha:

$$e'_1 = 30 \text{ cm.}$$
$$e''_1 = 50 \text{ cm.}$$
$$\sigma_a = -15 \text{ kg/cm}^2.$$
$$\sigma_4 = -12 \text{ kg/cm}^2.$$
$$\sigma_b = -4 \text{ kg/cm}^2.$$

2° *caso* — Si fissa uno spessore iniziale e si pone l'armatura teorica concentrata lungo un asse che dista dalla roccia 11 cm. (condizione data dallo spessore della centina + 4 cm. di intervallo fra centina e roccia) in modo che risulta (fig. 22)

$$r_1 = 150 \text{ cm.}$$
$$r_4 - r_3 \cong 11 \text{ cm.}$$

Quindi, con le medesime formule di cui al caso precedente, si determinano i valori delle sollecitazioni e si verifica lo spessore prefissato con la condizione che la pressione residua sia uguale a 0.

(7) - Dovrebbe essere assunto il raggio medio ma di norma viene consigliato il raggio interno per tener conto del contributo del calcestruzzo nel suo comportamento plastico, anche se lesionato, e quindi per ridurre ancora la quantità di ferro.

Si ottiene per $e_2 = 55$ cm.:

$p_2 = 0{,}94$ kg./cm^2.
$\sigma_2 = -10{,}94$ kg/cm^2.
$\sigma_{2f} = -218{,}8$ kg/cm^2.
$p_3 = 0{,}51$ kg/cm^2.
$\sigma_{3f} = -218{,}47$ kg/cm^2.
$\sigma_3 = -10{,}92$ kg/cm^2.
$p_4 \cong 0$ (condizione di verifica)
$\sigma_4 = \sigma_b = -9{,}7$ kg/cm^2.

Riassumendo si ha:

$e_2 = 55$ cm.
$\sigma_a = -15$ kg/cm^2.
$\sigma_b = -9{,}7$ kg/cm^2.

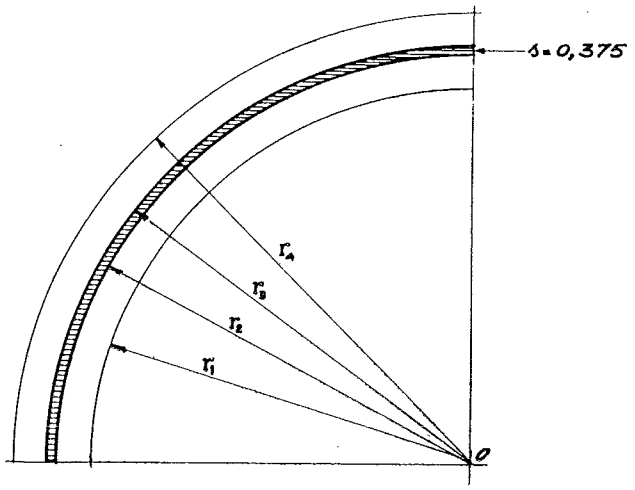


Fig. 22

Nota 3

Si è voluto fornire qualche elemento indicativo sulla correlazione fra pressione interna di esercizio, spessore del rivestimento, ferro di armatura e caratteristiche della roccia da sostenere, nelle gallerie in pressione rivestite con getto monolitico di calcestruzzo su centine metalliche.

Da quanto esposto nella nota 2 risulta che in una galleria di raggio r, lo spessore del rivestimento, calcolato come anello sciolto, è funzione della pressione interna, delle sollecitazioni massime di trazione e, subordinatamente, del modulo elastico del calcestruzzo. E' anche evidente che la quantità di ferro di armatura, da trasformare in centine metalliche, è solo funzione di carico di sicurezza del ferro e della pressione interna. Cosicché, nota la pressione interna, le sollecitazioni massime nel ferro e nel calcestruzzo e le caratteristiche del rivestimento risultano, attraverso le formule di LAMÈ e di MARIOTTE univocamente determinate.

Sviluppando tali concetti si sono tracciate le curve dei diagrammi a) e b), riportati nella fig. 8 del testo; nel diagramma a) per $\sigma = -15$ kg/cm^2, e $\sigma = -20$ kg/cm^2. sono stati calcolati per vari r (raggi della galleria finita) gli spessori di calcestruzzo in funzione delle pressioni interne; nel diagramma b), sempre per vari r, gli spessori di lamierino ideale in funzione delle pressioni interne.

Determinato lo spessore di lamierino ideale, corrispondente ad un determinato peso per m^2. di rivestimento, si è effettuata la trasformazione in centine, con la condizione di porre le centine ad un interasse di circa 50 cm. e di impiegare profilati normali. La trasformazione risulta dalla tabella unita al diagramma b).

Infine, determinato il profilo delle centine ed il loro interasse, con un sistema grafico di calcolo di cui più avanti diremo, si sono tracciate le curve c) le quali consentendoci di trovare il valore di α della formula $\alpha\,(B+H_t)$ della tabella del TERZAGHI, ci danno una indicazione sulle caratteristiche della roccia che può essere sostenuta con le centine. Trattasi, come si è già detto, di elementi indicativi, sufficienti tuttavia ad un calcolo di prima approssimazione.

Ci sembra superfluo ripetere i procedimenti di calcolo usati per le curve dei diagrammi a) e b) in quanto trattasi di procedimenti perfettamente analoghi a quello ampiamente sviluppato alla nota 2 (2° *caso*).

Svilupperemo invece il metodo di calcolo seguito per la verifica della centina metallica.

Rimandiamo al testo originale [13] per la trattazione completa limitandoci a riportare qui di seguito le conclusioni (fig. 23):

a) — il carico, determinabile con la formula $H_p = \alpha\,(B+H_t)$, si trasmette alla centina attraverso punti singolari, chiamati di bloccaggio, il cui numero dipende solo da considerazioni economiche. Nella nostra trattazione abbiamo supposto che i punti di bloccaggio fossero 5 per ogni quarto di centina;

b) — in ogni punto di bloccaggio, considerato come cerniera, si determinano le seguenti forze:

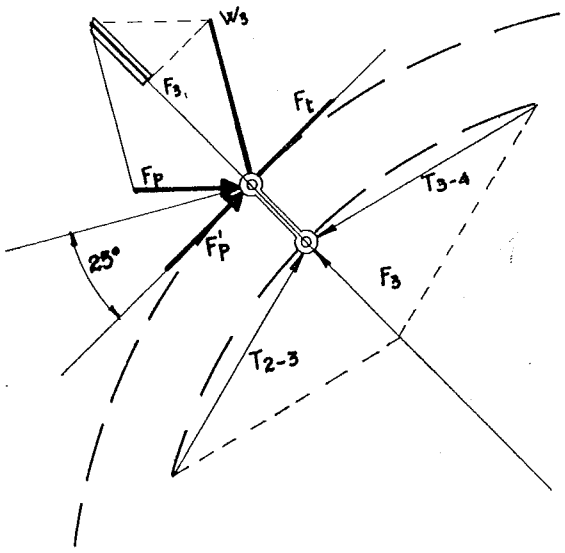


Fig. 23

— una componente radiale del carico F;

— una forza passiva F_p la quale può essere inclinata di 25° rispetto all'orizzontale o tangente alla curva delle centine;

— una componente del carico F_t, uguale e contraria alla F_p

c) — in corrispondenza dei punti di bloccaggio, ma lungo l'asse neutro agiscono tre forze:

— una radiale F dovuta al carico proveniente dalla roccia;

— due forze T di spinta che vengono dai punti di bloccaggio vicini (cerniere).

Ma la risultante delle due forze T può essere anche maggiore del valore necessario all'equilibrio; nel qual caso ne deriva un incremento della componente radiale del peso e lo sviluppo di una ulteriore spinta passiva nel terreno.

La sollecitazione nel ferro è data evidentemente da:

$$\sigma = \frac{T}{A} + \frac{M}{W}$$

in cui:

T = valore della spinta assiale;

M = momento flettente massimo (per centina incernierata al centro M = 0,86 Th dove h è la massima distanza di T della sezione mediana fra due cerniere);

A = sezione della centina

W = modulo resistente della centina.

E' quindi necessario determinare T ma poichè anche le F_p sono incognite è necessario procedere per tentativi (*trial load method*).

Si costruisce il diagramma di carico e si determinano le varie F tenendo presente che la F_p è tangente o fa un angolo di 25° con l'orizzontale.

Si tracciano quindi le direzioni delle T; si calcola la somma dei carichi verticali e si costruisce il poligono delle forze assumendo per la somma dei carichi verticali il valore 0,8 della somma effettiva (*trial load*), per tener conto delle resistenze passive: giova infatti osservare ancora che l'arco non è libero ma risente in ogni punto della mutua azione della roccia.

Si chiude il poligono e si verificano le F così trovate con quelle che risultano dal diagramma dei carichi, prolungando i lati del poligono fino ad ottenere valori almeno uguali a quelli reali.

In tal modo, nella sola ipotesi che la F_p abbia direzioni comprese fra la tangente alla curva ed un angolo di 25° con l'orizzontale, si sono trovati i valori di tutte le forze.

Si può così determinare il valore della sollecitazione del ferro.

Sviluppiamo qui di seguito un esempio numerico.

Si considera una galleria del diametro finito di m. 3,30 con centine metalliche NP 140 poste alla distanza di 50 cm., in roccia stratificata e si procede nel modo seguente (fig. 23).

1. — si disegna la linea dello scavo di metà galleria.

2. — Si disegna la centina ed i punti di bloccaggio. Il punto 5 è stato preso ad una distanza di 15 cm. dalla chiave poichè è bene non superare tale limite. Il rimanente arco è stato diviso in quattro parti: il tratto 4-5 è lievemente maggiore dei precedenti.

$$l_{1-2} = l_{2-3} = l_{3-4} = 77 \text{ cm.}$$
$$l_{4-5} = 84 \text{ cm.}$$
$$l_{5-c} = 15 \text{ cm.}$$

3. — Si proiettano i punti di bloccaggio radialmente sulla linea di scavo e sull'asse neutro della centina.

4. — Si fissa l'altezza di carico della roccia che dovrà essere sostenuta dalla centina, mediante la formula del Terzaghi:

$$H_p = 0{,}5\ (B+H_t) = 4{,}225 \text{ metri}$$

5. — Si tracciano le linee verticali verso l'alto dai punti medi tra i punti di bloccaggio. I rettangoli così ottenuti rappresentano il volume di roccia che grava su ogni punto di bloccaggio.

6. — Stabilito il peso specifico della roccia, si calcola il carico verticale che grava su ciascun punto ed in apposita scala si disegna il vettore equivalente.

7. — Le forze verticali W, applicate in ogni punto di bloccaggio lungo la linea di scavo, si scompongono nelle due componenti: una radiale F e una tangenziale F^1 se la tangente è inclinata meno di 25° (n. 5) sull'orizzontale altrimenti la componente a 25° (n. 2-3-4).

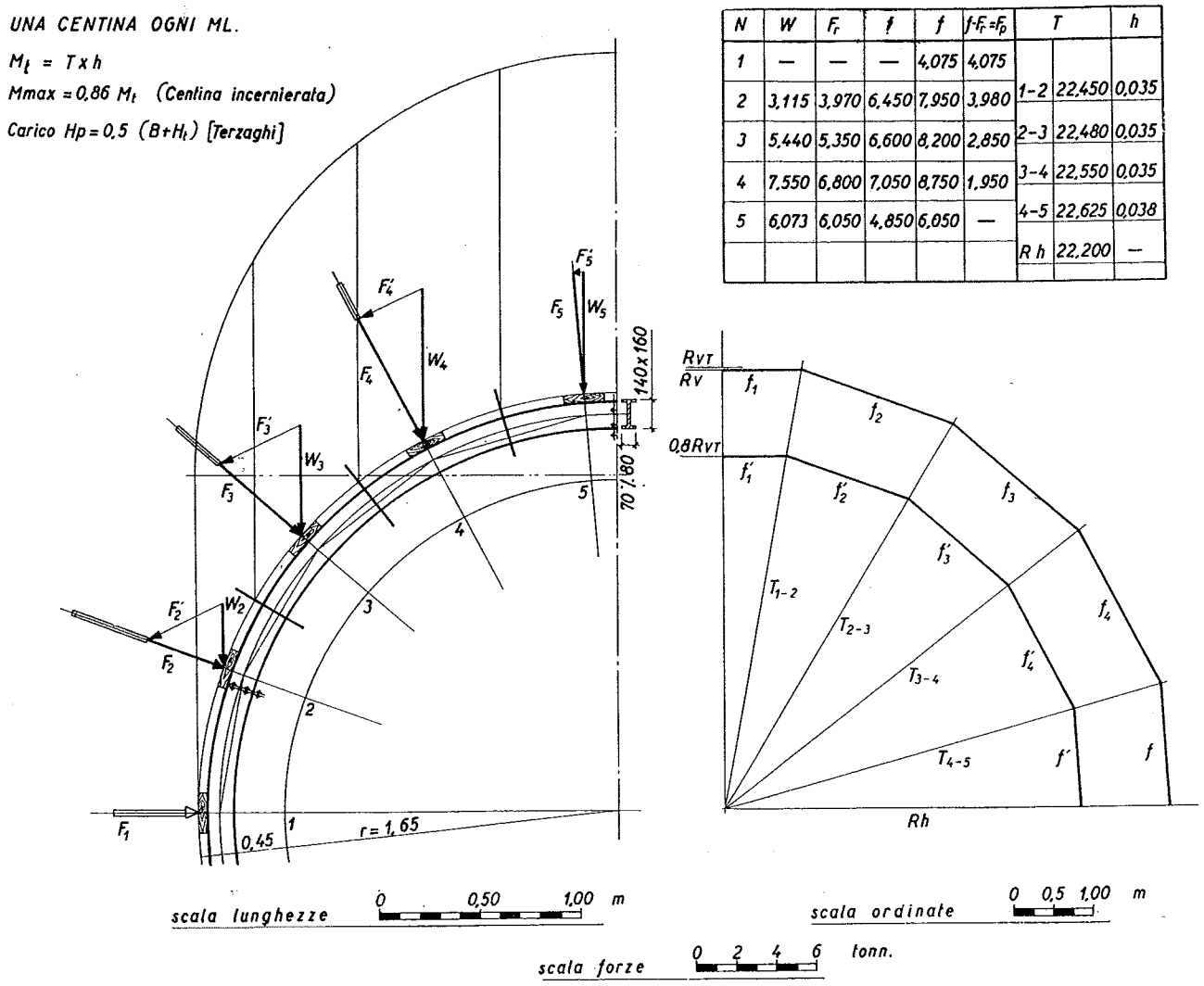
8. — Si disegna la reazione verticale all'imposta di valore:

$$R_v = \Sigma W = 11{,}089 \text{ t.}$$

9. — Si disegnano le corde che congiungono i punti di bloccaggio segnati sull'asse neutro. Queste corde rappresentano la direzione della spinta in ogni rettangolo di carico.

10. — Tracciata una retta verticale r_v si fissa su questa un polo. Si disegnano i raggi paralleli ad ogni linea di azione della spinta passanti per il polo: T_{1-2}, T_{2-3}, T_{3-4} ecc. Il poligono delle forze terminerà con un raggio orizzontale che indicheremo con R_h.

11. — La centina sostiene solo una delle due componenti di ciascuno dei pesi W. Perciò la pressione verticale non sarà $R_v = \Sigma W$ ma una R_{vt} incognita. Occorre quindi costruire un primo poligono assumendo un valore iniziale di R_{vt} uguale a 0,8 R_v. Dall'estremo di questo vettore, si traccia una linea f_1, parallela alla forza F_1 sul diagramma di carico, fino ad incontrare il raggio 1-2. Da questo punto di intersezione si traccia la linea F_2 parallela alla forza F_2 fino ad intersecare il raggio 2-3 e così via finchè il raggio R_h è raggiunto completando il poligono sperimentale delle forze.



N	W	F_r	f	f	$f-F_r=F_p$	T		h
1	—	—	—	4,075	4,075			
2	3,115	3,970	6,450	7,950	3,980	1-2	22,450	0,035
3	5,440	5,350	6,600	8,200	2,850	2-3	22,480	0,035
4	7,550	6,800	7,050	8,750	1,950	3-4	22,550	0,035
5	6,073	6,050	4,850	6,050	—	4-5	22,625	0,038
						R h	22,200	—

Fig. 24

12. — Si paragona l'f_2 sul poligono, con la forza F_2 del diagramma di carico, l'f_3 con la forza F_3 e così via. Generalmente in uno o più punti, la componente radiale F sul diagramma di carico, supererà la corrispondente forza f del poligono sperimentale.

13. — Si trasferiscono tutte le forze F, che superano le corrispondenti forze f del poligono sperimentale, sul nuovo poligono, allungando i raggi di quanto necessario e si completa il nuovo poligono per la forza f più lontana di tutte dal polo. In tal modo si è costruito il poligono definitivo.

Si osserva che tutte le altre forze del poligono vero sono ora maggiori delle corrispondenti forze F del diagramma di carico. L'eccesso rappresenta la forza della resistenza passiva (F_p) della roccia, che nel disegno è stata indicata in grassetto.

14. — Le lunghezze dei raggi del nuovo poligono, rappresentano la spinta.

Poichè la verifica si deve basare sulle più sfavorevoli condizioni di sollecitazione, si prende in considerazione il raggio più lungo.

15. — Non è necessario determinare la intensità dei vari momenti flettenti poichè la centina, essendo di sezione costante, deve essere proporzionata per il momento flettente massimo.

Nel ns/ caso, essendo la centina incernierata in chiave, il momento flettente massimo sarà:

$$M_{max} = 0{,}86\ T_{4-5}\ h = 0{,}86 \times 11.312 \times 3{,}98 = 38.916 \text{ kg/cm.}$$

essendo h la freccia dell'asse neutro della centina fra due punti di bloccaggio.

La sollecitazione totale max dovuta alla pressoflessione è:

$$\sigma = \frac{T_{4-5}}{A} + \frac{M_{max}}{W}$$

$$\sigma = \frac{11.312}{18{,}20} + \frac{38.916}{81{,}8} = 621 + 476 = 1.097 \text{ k/cm}^2.$$

Le centine, considerando $\sigma_f = 2.000$ kg/cm² potrebbero sostenere un carico ben più elevato; ciò del resto risulta dall'esame del diagramma della fig. 8.

Infatti interpolando fra i raggi 1,50 e 2,00, due centine NP 140 per ml. corrispondono a 3,5 mm. di ferro e quindi ad una pressione ragguagliata di 4,3 kg/cm². cui corrisponde nel diagramma c) un valore $\alpha \cong 0{,}85$.

Il calcolo sopra riportato si riferisce evidentemente alla sola stabilità della calotta: un semplice ragionamento, in assenza di spinte laterali e nella ipotesi di piedritti di lunghezza normale, dimostra che il momento massimo nel piedritto, nel punto della massima inflessione, è minore del massimo momento (0,86 Th) calcolato nella calotta. Se invece la roccia induce spinte laterali bisogna ricorrere alle centine circolari.

Bibliografia

[1] — M. Richardson e R. S. Mayo - *Practical tunneling driving* - Mc Graw - Hill Book Co, Inc. - New York and London - 1941.

[2] — *Manual on Rock blasting* - Aktiebolaget Atlas Diesel - Stockholm & Sandvikens Jernverks Aktilbolag - Sandviken - Sweden - 1953.

[3] — K. Terzaghi - *Geological introduction to tunneling with steel supports* - The Commercial Shearing Stamping Co. Youngston - Ohio - 1946.

[4] — F. Arredi - *Alcune osservazioni sullo stato di sollecitazione delle gallerie in pressione* - Acqua n. 12 - anno 1951.

[5] — Oberti - *Sul problema statico delle condotte forzate in calcestruzzo armato* - Energia Elettrica - marzo-aprile 1944.

[6] — G. Oberti - *Calcolo elasto-plastico delle condotte forzate non omogenee* - Energia Elettrica - maggio-giugno-luglio 1945.

[7] — G. Oberti - *La condotta forzata di Castelbello - Criteri di progetto e ricerche sperimentali* - Energia Elettrica n. 5 - 1953.

[8] — F. Arredi - C. Pandolfi - A. Palmieri - *Ricerche sperimentali sul rapporto tra le resistenze a flessione ed a trazione dei calcestruzzi* - Energia Elettrica - n. 2 - 1954.

[9] — U. Capino - *Sulla statica delle gallerie in pressione rivestite* - Energia Elettrica - n. 3 - 1953.

[10] — G. Tognacchini - *Rivestimento della Galleria Senaiga-Arsiè degli Impianti del Basso Cismon della S. I. I. A.* - Geotecnica n. 1 - Gennaio-Febbraio 1955.

[11] — B. Bukowski - *Problèmes de la theorie du béton armé* - Giornale del Genio Civile - n. 1-2 - 1956.

[12] — R. Tramonte - *Calcolo dei tubi per acquedotto con particolare riferimento ai tubi in cemento armato con lamierino* - G. Laterza & Figli - Bari 1937.

[13] — R. V. Proctor & T. L. White - *Rock tunneling with steel supports* - The Commercial Shearing Stamping Co. - Youngstown - Ohio - 1946.

[14] — *Le Barrage de Bort* - numero speciale edito dalla Houille Blanche - 1954.

[15] — L. V. Rabcewicz - *Bolted supports for tunnels* - Water Power - Aprile-Maggio 1954.

[16] — D. Olivier Martin - *Une nouvelle application du boulonnage des roches* - Travaux - Luglio 1954.

[17] — T. Seguiti - *La bullonatura del tetto* - (Industria Mineraria - Marzo-Maggio 1953).

[18] — *Boulons plafonniérs et ancrages bétonnées* - Tecnique Moderne Constructions - Parigi - Ottobre 1955.

Sommaire: Avec une tractation générale, qu'on référe aussi à certains cas particuliers des travaux exécutés, on démontre la dépendance entre les systèmes d'excavation, soutènement de la voûte et type de revêtement dans la construction des tunnels en rocher.

On examine séparément les tunnels en pression dans les rochers résistants et non, avec un réfèrement particulier de ce qui regarde la statique du revêtement et l'emploi des cintres métalliques pour le soutènement de la voûte. Dans un diagramme on voit les limites économiques pour l'emploi de ce système de soutènement.

On examine après les tunnels de type differént, de petite, moyenne et grande section; pour ces dernières, dans un diagramme, on voit aussi les limites économiques pour l'emploi des soutènements métalliques.

Enfin, après quelques mots sur le système de boulonnage de la voûte, on développe, en appendice, quelques exemples numériques sur les tunnels en pression.

Summary: A general examination, at last referred to practical examples of tunnels already carried out, explains the relationships between the excavation method, system for the rock supporting and system of lining in the tunneling.

A separated examination is directed to the pressure tunnels in rock of good and bad conditions, with a particular reference to the static of the lining and the use of steel rib for supporting the cuts. A diagram shows the economical limits of the use of the steel supports.

The examination is then directed to other tunnels of small, average and large cross section. A diagram shows the economical limits of the use of the steel ribs in the large section ones.

After mention of the roof bolting system, practical examples concerning the pressure tunnels are developped in the appendix.