

# Note tecniche

## OSSERVAZIONI SUL COMPORTAMENTO DI UNO SCAVO IN SOTTERRANEO

Abbiamo riferito, su questa medesima Rivista [2], su alcune sperimentazioni effettuate in una galleria scavata in una formazione costituita da un complesso marnoso-argilloso-arenaceo in stato di notevole compattazione e indurimento, del tipo che gli americani definiscono *shale*.

Si è dato il caso che nella medesima formazione sia successivamente ricaduto, per circa 500 metri, lo scavo di una galleria del diametro di m 4,30 <sup>(1)</sup>.

Abbiamo avuto occasione di visitare più volte la galleria in costruzione e di osservare le diverse fasi di scavo, armatura e rivestimento. Abbiamo quindi voluto confrontare tali osservazioni con le nostre precedenti determinazioni sperimentali: ed avendo riscontrato una soddisfacente concordanza ci è apparso utile darne notizia.

Dalla nostra memoria già citata [2] e da altra, ad essa precedente, sempre sul medesimo argomento [1] riprendiamo quanto segue:

1) La tabella di TERZAGHI (Tab. 1), dalla quale <sup>(2)</sup> si deducono i valori del carico di roccia sulla volta di sostegno di una galleria di larghezza  $B$  e di altezza  $H_t$ , a profondità maggiore di  $1,5 (B + H_t)$ .

(1) Galleria di derivazione dalla diga del Pertusillo sul f. Agri.

(2) La tabella è stata qui riveduta, per quanto si riferisce alla descrizione dei vari tipi di roccia (prima colonna) perché le traduzioni nelle due precedenti edizioni, di cui una confortata da una interpretazione del TALOBRE [3], non ci sono apparse soddisfacenti; lo scrivente è particolarmente grato al Chiar.mo Prof. F. PENTA per il Suo autorevole aiuto in questa revisione.

2) Il diagramma riportato nella Fig. 16 della seconda nota citata, limitatamente alle sole curve  $f(r)$ , dal quale si deduce il peso del ferro per  $m^2$  di sezione di galleria in funzione del raggio della calotta e del coefficiente  $\alpha$  che, secondo la tabella del TERZAGHI, caratterizza i vari tipi di roccia (Fig. 1). Può tornare utile ricordare che il diagramma è stato costruito sotto le ipotesi fondamentali:

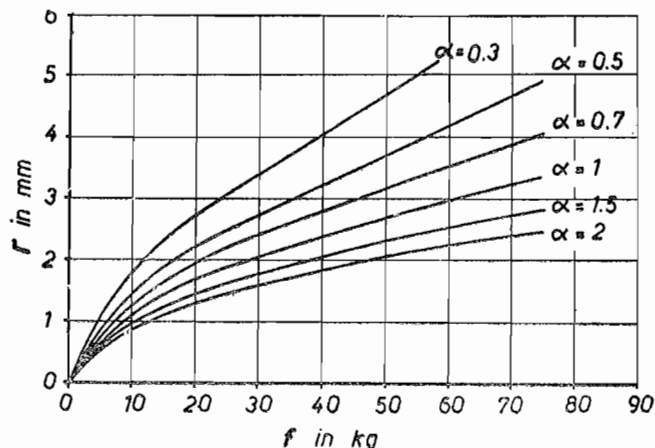


Fig. 1 - Peso di ferro  $f$  per ogni  $m^2$  di sezione di scavo in funzione del raggio di calotta  $r$ . Sollecitazione nel ferro  $\sigma_f = 2000 \text{ kg/cm}^2$ .

a) che il carico vari *linearmente*, secondo il coefficiente  $\alpha$  con le due dimensioni  $B$  e  $H_t$  della galleria, ovvero con il raggio  $R$  se trattasi di galleria circolare.

TABELLA 1 - « CARICO DI ROCCIA »  $H_p = \alpha (B + H_t)$  SUL VOLTO DEL SOSTEGNO DI UNA GALLERIA DI LARGHEZZA  $B$  E DI ALTEZZA  $H_t$  A PROFONDITÀ MAGGIORE DI  $1,5 (B + H_t)$   
(da Terzaghi in Proctor e White - Rock tunneling with steel supports, 1946) <sup>(1)</sup>

Terreno e suo stato (non esistono limiti netti fra i diversi gruppi).	$H_p$ in m nel caso che la galleria sia al disotto del livello permanente delle acque sotterranee. Se la galleria è al disopra di tale livello, i valori indicati per i gruppi da 4 a 6 possono dimezzarsi	Annotazioni e chiarimenti.
1) Roccia "dura" ed "intatta" (prima dello scavo la roccia è "sana" e scevra di ogni discontinuità, sia pure capillare) (con roccia si indica qui la roccia lapidea).	zero	Sottile rivestimento soltanto se, per effetto delle mine, dopo ore o giorni dallo sparo la roccia comincia a dare distacchi di schegge ( <i>spalling</i> , <i>Ab-schalung</i> , <i>sfoliazione</i> , <i>desquamazione</i> ) o, indipendentemente dalle mine, avvengono spontanee e violente proiezioni di crostoni dal volto o dalle pareti ( <i>popping</i> , <i>Bergschläge</i> , <i>colpi di montagna</i> , <i>colpi di tetto</i> , <i>colpi di parete</i> ).
2) Roccia "dura" stratificata o scistosa, suddivisa, cioè, in singoli strati (o simili) che offrono poca o nessuna resistenza a separarsi fra di loro; ulteriore indebolimento può derivare da altre discontinuità (diversamente orientate rispetto a stratificazioni o scistosità) <sup>(2)</sup> .	$0 \div 0,5 B$	Leggero rivestimento con funzione resistente.
3) Roccia massiccia (cioè nè stratificata, nè scistosa) moderatamente discontinua, attraversata cioè da discontinuità di ogni sorta fino alle fessure capillari. I blocchi limitati dalle discontinuità, sono però disposti in modo tale che le pareti verticali reggono per loro conto. Possono incontrarsi condizioni di desquamazione e di distacchi (tipo n. 1, annotazioni).	$0 \div 0,25 B$	Il carico può variare da punto a punto senza una regola dominante.
4) Roccia suddivisa in blocchi disgiunti con le discontinuità comunque orientate, strette (a labbri combacianti) o beanti (aperte), vuote o riempite (di materiale proveniente dall'alterazione esterna della roccia stessa). Agli effetti meccanici la formazione, così ridotta, può paragonarsi ad una sabbia a grana grossissima poco o niente coerente.	$(0,25 \div 0,35) (B + H_t)$	Non vi sono spinte laterali (sulle pareti).
5) Roccia come al n. 4 ma più intensamente suddivisa e più fitamente spezzettata e rotta.	$(0,35 \div 1,10) (B + H_t)$	Con o senza lievi spinte laterali.
6) Roccia completamente frantumata, ma non alterata (dal punto di vista chimico), con i caratteri di un prodotto di frantoio. Se la grana è quella di una sabbia e non v'è stata una cementazione posteriore, il materiale al disotto del livello dell'acqua, si comporta come una sabbia acquifera.	$1,10 (B + H_t)$	Spinte laterali considerevoli. In presenza di acqua sul fondo occorre dare una adeguata base alle centine o adottare centine circolari (chiuse).
7) Terreni spingenti (ma non rigonfianti, senza cioè variazioni percettibili del volume, contenenti elevate quantità di minerali argillosi, non rigonfianti, tipo caolinite, illite ecc. in particelle microscopiche o submicroscopiche) a media profondità.	$(1,10 \div 2,10) (B + H_t)$	Forti spinte laterali; occorrono armature rovesce; sono raccomandabili centine circolari.
8) Terreni spingenti (come al n. 7) a grande profondità.	$(2,10 \div 4,50) (B + H_t)$	
9) Terreni spingenti e rigonfianti, contenenti, cioè, minerali argillosi molto rigonfianti tipo montmorillonite e simili.	$> 75$ m (indipendentemente da $B$ e $H_t$ )	Centine circolari. In casi estremi armature deformabili ("cedevoli").

<sup>(1)</sup> J. SRINI (*Tunnelbaugeologie*; Vienna, 1950, p. 220) aggiunge i due seguenti gruppi:

10) Sabbie (sciolte) molto addensate,  $H_p = (0,62 \div 1,38) (B + H_t)$

11) Sabbie (sciolte) per niente addensate  $H_p = (1,08 \div 1,38) (B + H_t)$ .

<sup>(2)</sup> Molte formazioni lapidee contengono interstratificate argille indurite (*shale*); queste, purché non siano degradate all'esterno, non sono peggiori di altre rocce stratificate. Tuttavia il termine inglese *shale* indica argilla molto « compatta » (fortemente « indurita ») che però non ha raggiunto ancora la consistenza di una roccia (lapidea); una tale cosiddetta *shale* in galleria può comportarsi come spingente ed anche rigonfiante.

In una formazione costituita da alternanza di strati calcarei (o arenarie) e *shale* non ancora « matura », con lo scavo della galleria si ha una graduale compressione della roccia da ambo i lati che implica un abbassamento del volto. Inoltre la minore resistenza contro lo scorrimento al contatto fra roccia e cosiddetta *shale* riduce verosimilmente la capacità della formazione tutta a formare da arco al disopra del volto. Il carico sul volto in tali formazioni può, perciò, essere equivalente a quello di una « roccia » suddivisa in blocchi disgiunti (di cui al n. 4 e 5).

b) che i sostegni, costituiti da centine metalliche a doppio T, siano posti alla distanza di circa 50 cm. per cui, dal peso del ferro per metro di galleria, si può risalire alla sezione del profilo normale.

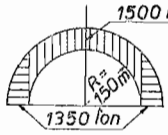
3) il quadro riassuntivo delle caratteristiche del materiale e dei risultati sperimentali posto a conclusione della prima nota citata (Tab. 2).

valori  $\alpha_o$  diversi dagli  $\alpha$  in esso riportati, appare sufficiente, sia pure con qualche approssimazione,

moltiplicare per il rapporto  $\frac{\alpha_n}{\alpha_o}$  la distanza di m 0,50 prevista per i sostegni.

Per  $\alpha = 0,3$  e  $R = 2,15$  si ha un peso di ferro di circa 12 kg per  $m^2$  il che, per una sezione di circa

TABELLA 2

Descrizione del materiale	$\gamma$ ton/m <sup>3</sup>	Porosità $n$	Acqua		$E_s$ kg/cm <sup>2</sup>	$E_d$ kg/cm <sup>2</sup>	$\varphi$	$c$ ton/m <sup>2</sup>	Diagramma di carico
			peso	volume					
Complesso argilloso-marnoso-arenaceo in stato di notevole compattazione e indurimento ( <i>shale</i> )	2,48	0,13	6%	13%	40.000	170.000	28°	1,83	

Sulla scorta di tali elementi e di quegli altri ricavati dalla sperimentazione, per i quali si rimanda alle note originali, si sarebbero potute fare, per la costruenda galleria, alcune previsioni che, come si è detto, appare utile ora confrontare con la reale situazione.

La sperimentazione ha anzitutto messo in evidenza che il carico avrebbe impiegato un certo tempo a manifestarsi (qualche settimana) ed ancor di più a raggiungere il suo massimo valore. Tale condizione si sarebbe dovuta riscontrare anche nella costruenda galleria, forse in senso meno ottimistico per le aumentate dimensioni dello scavo da m 3,00 di diametro nella galleria sperimentale a m 4,30 nella galleria in costruzione. Non sembrava tuttavia azzardato prevedere, sulla base delle risultanze sperimentali, che il volto non avrebbe avuto necessità di immediato sostegno se non per eventuali piccoli distacchi di materiale e che, effettuando il rivestimento entro termini di tempo abbastanza brevi, si sarebbe potuto recuperare la quasi totalità delle centine di sostegno.

In secondo luogo, ammessa, come si è detto, una variazione lineare dei carichi con le dimensioni della galleria e quindi con il valore  $R$  del raggio, il carico sul volto avrebbe dovuto avere un incremento proporzionale al rapporto 2,15 : 1,50 e cioè un incremento di circa il 50%: si poteva quindi procedere al calcolo del sostegno con un qualsiasi metodo, fra cui quello riportato nella citata nota [1]. E può quindi tornare comodo, per una prima approssimazione, servirsi del diagramma della Fig. 1, ricordando che il materiale risultava caratterizzato, sulla base dell'esperienza, da un valore di  $\alpha = 0,10$  e potendosi ammettere che tale coefficiente, trattandosi della medesima formazione, sia valido anche per la galleria in costruzione.

Nel diagramma della Fig. 1 non vi è il valore  $\alpha = 0,1$ : è sufficiente tuttavia osservare che il carico varia linearmente con  $\alpha$  e di conseguenza anche la sezione ed il momento resistente devono variare linearmente con  $\alpha$ ; per usare quindi il diagramma per

13  $m^2$  (avuto riguardo al fatto che lo scavo viene effettuato come in Fig. 2) rappresenta un peso totale di 160 kg pari a una centina a doppio T del 140.

Essendo il rapporto  $\frac{\alpha_n}{\alpha_o}$ , nel nostro caso, uguale a 3

si poteva prevedere, per la costruenda galleria, un sostegno costituito da centine a doppio T del NP 140 poste alla distanza media di m 1,50.

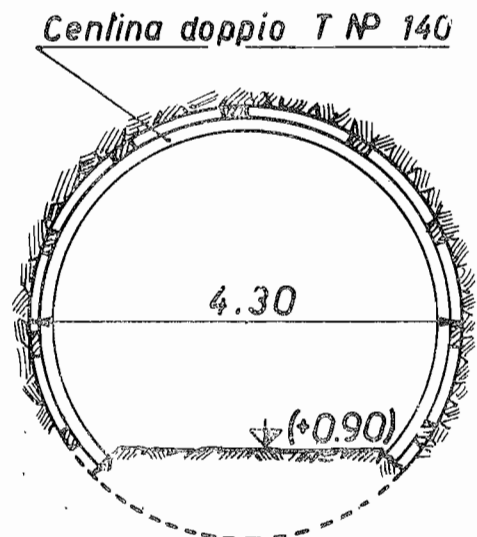


Fig. 2

Si poteva anche dedurre, considerata la modestia del sostegno, che il materiale avrebbe consentito uno scavo a piena sezione.

La validità di queste possibili previsioni è stata confermata durante l'esecuzione del lavoro: lo scavo della galleria è stato condotto a sezione pressoché piena, come in Fig. 2, ed è stato armato con centine

metalliche del NP 140 alla distanza di m 1,00 - 1,50 - 2 metri, con una media ponderale di m 1,50. Non si è mai avvertita la necessità di sostenere immediatamente il volto dopo ogni volata e quindi le operazioni di rimozione e carico del materiale e di preparazione della volata successiva si sono svolte a ciclo continuo. La esecuzione del rivestimento, a distanze variabili da 50 a 150 metri dall'avanzamento, pari in media a circa un mese di lavoro, ha consentito il recupero quasi totale delle centine di sostegno.

Le previsioni derivate dalla sperimentazione e dai nostri diagrammi hanno trovato dunque piena conferma: il tutto, ben s'intende, riguardato con occhio panoramico nei 500 metri di galleria. Non sono infatti mancati casi singolari, in genere dovuti a diversa umidità, nei quali si sono dovuti prendere provvedimenti diversi; nè casi nei quali, presentandosi la formazione più francamente arenacea, le centine di sostegno, anche poste a 2 metri, apparivano pressoché inutili. Tali casi non turbano però la uniformità del panorama generale: e servono anzi a ricordare che, nello scavo in sotterraneo, non è tanto il tipo di roccia che determina gli oneri del lavoro ma le sue condizioni rispetto agli elementi di perturbazione dell'equilibrio statico (stratificazione, frattura-

zione, umidità etc.). A conferma di ciò vale quanto riscontrato in gallerie analoghe, scavate in materiale, se non uguale, certamente paragonabile dal punto di vista litologico, ma in condizioni stratigrafiche e specialmente di umidità ben diverse e che hanno presentato, allo scavo ed al sostegno, ben altre caratteristiche: su tali casi ci proponiamo di tornare in una nota successiva.

Ci appare utile concludere riaffermando la validità della sperimentazione e la utilità di una statistica per la determinazione del comportamento statico delle rocce e delle terre negli scavi in sotterraneo.

### Bibliografia

- [1] C. LOTTI - *Sulla costruzione delle gallerie in roccia con particolare riguardo al sostegno della volta e al rivestimento* - Geotecnica 1956 n. 6.
- [2] C. LOTTI - *Sulla costruzione delle gallerie in roccia. Determinazione dei carichi agenti sul sostegno e sul rivestimento* - Geotecnica 1960 n. 6.
- [3] T. TALOBRE - *La mécanique des roches* - Dunod - Paris 1957.

Prof. Ing. Carlo Lotti

P.S. - La presente nota ci dà anzitutto l'occasione di segnalare alcuni errata-corrige relativi alla già citata memoria [2]:

pag.	riga	errata	corrige
1	32	isotopo	isotropo
5	2	$+p_o(1-\sin\varphi) \left( \frac{r_o}{H} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}}$	$+p_o(1-\sin\varphi) \left( \frac{r_o}{R} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}}$
6	tabella	oltre 7,50 m è indipendente	oltre 75 m è indipendente
13	tabella	complesso marnoso-arenaceo	complesso argilloso-marnoso-arenaceo
13	tabella	strale	shale

Ed inoltre sempre nella citata memoria noi abbiamo usato il termine "disteso" per indicare lo stato del materiale attorno allo scavo; distendere può infatti ben esprimere il fenomeno di "perdere tensione". Tale termine non appare però legato alla usuale nomenclatura geologico-tecnica: abbiamo quindi voluto ricercare altri termini che più si adattino a tale nomenclatura.

Il termine "rilasciato" (in inglese "released") ha in sé il concetto del distacco e quindi non esprime convenientemente una condizione che è da considerare prece-

dente a quella di distacco; meglio può usarsi il termine "rilassato" (in inglese "relaxed") che esprime veramente la perdita di tensioni interne.

Termine appropriato può essere anche "decompressato" che bene esprime la condizione della perdita di tensione interna ed in particolare di compressione; oppure il termine "scaricato" che è più generico ed ha in sé l'idea dello scarico delle tensioni della roccia e, quasi conseguentemente, del carico sul sostegno della volta.