

# Sulla determinazione sperimentale delle forze agenti sul rivestimento di una galleria

R. BRUSA \*

**SOMMARIO:** Le azioni che si esercitano sul rivestimento di una cavità sotterranea dipendono da innumerevoli fattori, fra i quali la geometria dello scavo, la tecnologia esecutiva, le proprietà meccaniche del terreno e del rivestimento. Per tali motivi i procedimenti di calcolo sono di attendibilità assai incerta, ed è necessario controllarne i risultati con misure in sito. Nella presente nota viene descritto un metodo per la determinazione delle forze agenti sul rivestimento sulla base di misure tensiometriche ed estensimetriche.

## Premessa

Le numerose incertezze ed indeterminazioni che accompagnano i problemi della statica delle cavità sotterranee vengono via via parzialmente ridotte dalla messa a punto di metodi di calcolo necessariamente sempre più complessi.

Tali metodi sono tuttavia fondati non sulla realtà ma su modelli meccanici più o meno perfezionati dell'ammasso roccioso.

È noto infatti che la distribuzione delle tensioni attorno ad un cavo sotterraneo dipende da numerosi fattori, quali l'intensità e la direzione delle tensioni principali esistenti prima dello scavo, le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, la forma del cavo e del fronte di scavo, l'altezza della copertura in calotta, la rigidità del preri rivestimento, il tempo intercorrente tra la formazione del preri rivestimento e di quello definitivo, la rigidità di quest'ultimo, il fluage della roccia e del rivestimento in calcestruzzo, ecc.

Tutte le precedenti grandezze costituiscono un insieme non ancora esprimibile mediante relazioni matematiche; anzi si può affermare che la gran parte delle teorie che forniscono i carichi agenti sul rivestimento riescono a tenere in conto solamente alcune delle grandezze precisate.

Ne deriva la necessità di controllare attraverso misure in sito la validità della corrispondenza del modello con il comportamento reale dell'ammasso terroso o roccioso attraversato dalla galleria.

I metodi di misura delle pressioni a tergo del rivestimento oggi più in uso sono basati o su misure dirette mediante cellule pressiometriche o su misure indirette.

Fra questi ultimi il metodo più diffuso appare quello che, basandosi sulla misura delle deforma-

zioni del preri rivestimento o del rivestimento, ricerca l'insieme delle forze interagenti fra struttura e roccia attraverso l'esame dello stato tensionale della struttura stessa.

In generale però i metodi citati riescono a dare solamente utili indicazioni sulle componenti normali al rivestimento delle forze esterne, mentre la determinazione della componente tangenziale appare molto difficoltosa ed incerta.

Scopo della presente nota è lo studio dell'applicazione combinata in una stessa sezione di prova del metodo diretto ed indiretto di misura delle tensioni agenti sul rivestimento e di mostrare come la combinazione dei due metodi possa portare alla conoscenza sia delle componenti normali e tangenziali delle forze agenti sul rivestimento sia dello stato tensionale della struttura di sostegno.

## Esposizione del metodo

Per tutte le considerazioni che seguono si farà riferimento ad una galleria avente un preri rivestimento formato con centine abbinata a spritz-béton o altro tipo di materiale (marciavanti, ecc.).

Si suppone di applicare sulle centine degli estensimetri elettrici o meccanici e di disporre inoltre a tergo di esse delle cellule pressiometriche messe in opera rispetto ai primi in posizione mediana come di seguito illustrato.

Si suppone inoltre di poter disporre delle cellule piezometriche a tergo del rivestimento abbinata alle celle pressiometriche.

Dall'esame della fig. 1 si deduce che ogni punto di misura può essere formato dal numero massimo dei seguenti strumenti: 4 estensimetri, 1 cella pressiometrica, 1 cellula piezometrica; tuttavia la strumentazione può essere ridotta a 2 estensimetri e ad 1 cellula pressiometrica nel caso che non si temano inflessioni laterali della centina e non interessi scindere il carico totale fra la componente

\* Dott. ing. Rinaldo BRUSA, collaboratore della *Geotecnica*, Varese.

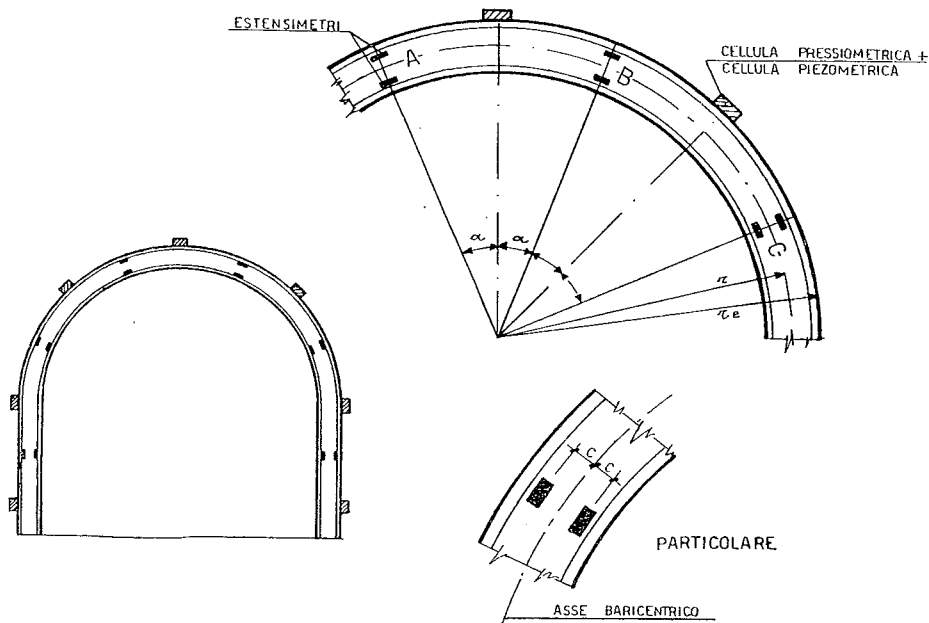


Figura 1

litostatica e quella idrostatica o si escluda la presenza di quest'ultima.

La disposizione degli strumenti è indicata in fig. 1.

Si esamina ora un elemento di centina isolato mediante due sezioni radiali passanti per gli estensimetri A e B.

Sulle sezioni A e B del tronco di centina ed a tergo di essa si evidenziano le forze in gioco e cioè (fig. 2):

NA, NB = sforzo di compressione in A e B nella centina

TA, TB = sforzo di taglio in A e B nella centina

MA, MB = momento flettente in A e B nella centina

P = forza normale agente sul tronco di centina e del rivestimento provvisorio ad essa collegato

S = forza tangenziale agente sul tronco di centina e del rivestimento provvisorio ad essa collegato.

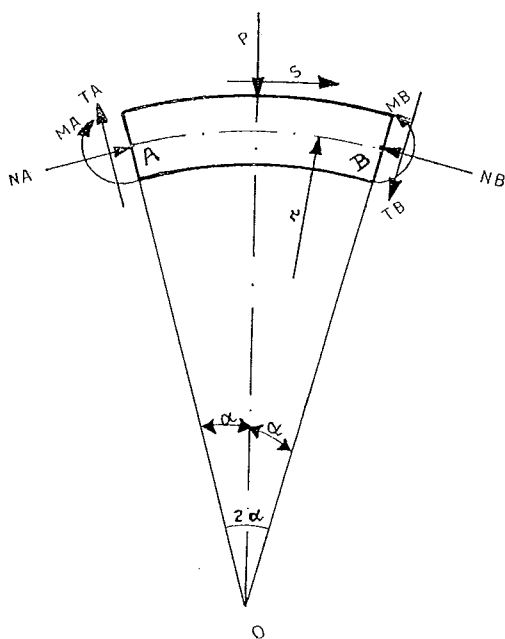


Figura 2

Si hanno quindi otto grandezze in gioco da un lato e tre equazioni di equilibrio dall'altro, per cui è necessario conoscere a priori almeno cinque delle grandezze incognite.

I quattro estensimetri ci permettono di conoscere le quattro grandezze NA, NB, MA ed MB. Infatti, tracciato il diagramma delle deformazioni unitarie  $\epsilon$  nelle due sezioni ed essendo nota a priori la curva caratteristica  $\sigma - \epsilon$  dell'acciaio della centina, l'area ed il modulo resistente della sezione, si può ricavare facilmente il valore delle predette grandezze.

È indispensabile, disponendo di due soli estensimetri nelle sezioni A e B porre gli stessi nel piano contenente l'asse principale d'inerzia, e cioè in pratica sull'anima, per eliminare gli inevitabili effetti dei momenti trasversali, effetti risentiti soprattutto dalle ali.

Ricavati gli sforzi assiali ed i momenti flettenti nelle sezioni A e B, si potrebbe assumere come quinta grandezza nota la pressione normale « p » misurata con la cellula piezometrica.

A questo punto il problema è in apparenza risolto, essendo rimaste tre sole incognite e cioè, S, TA e TB.

In realtà conviene considerare la pressione « p » come incognita e ricavarne in tal modo il valore medio agente sulla struttura di sostegno per poter procedere a utili confronti sperimentali.

La determinazione delle grandezze S e P viene effettuata imponendo l'equilibrio alla rotazione ed alla traslazione del tronco di centina in esame.

1) Equilibrio alla rotazione attorno ad O:

$$NA \cdot r - NB \cdot r + MA - MB + S \cdot \rho = 0 \quad (1)$$

$$S = (NB - NA) \frac{r}{\rho} + \frac{MB - MA}{\rho}$$

essendo  $\rho = re \cdot \alpha / \sin \alpha$  (vedasi appendice n. 1).

2) Equilibrio alla traslazione lungo la bisettrice:

$$TA \cdot \cos \alpha + NA \sin \alpha + NB \sin \alpha - TB \cdot \cos \alpha - P = 0$$

$$(TA - TB) \cos \alpha = P - (NA + NB) \sin \alpha \quad (2')$$

$$P = (NA + NB) \cdot \sin \alpha + (TA - TB) \cos \alpha \quad (2)$$

3) Equilibrio alla traslazione lungo la tangente di sommità:

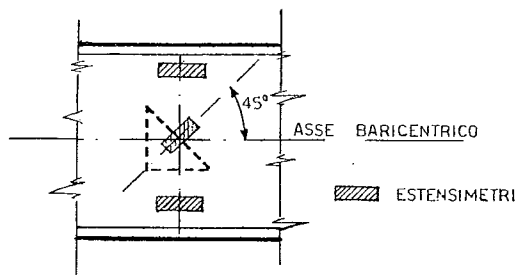
$$NA \cos \alpha - NB \cdot \cos \alpha - TA \cdot \sin \alpha - TB \sin \alpha + S = 0$$

$$(TA + TB) \sin \alpha = S + (NA - NB) \cos \alpha \quad (3)$$

Dall'equazione 1) si ricava il valore di S, mentre dall'equazione 2) è possibile ricavare P se sono noti i valori di TA e TB.

Dall'equazione 3) si ottiene:

$$TA + TB = \frac{NA - NB}{\tan \alpha} + \frac{S}{\sin \alpha} \quad (4)$$



$$TB = \frac{NA - NB}{\tan \alpha} + \frac{S}{\sin \alpha} - TA \quad (5)$$

Dall'equazione 2) si ottiene sostituendo l'espressione di TB:

$$P = (NA + NB) \sin \alpha + \left( 2 TA - \frac{NA - NB}{\tan \alpha} + \frac{S}{\sin \alpha} \right) \cos \alpha \quad (6)$$

### Determinazione di TA

La determinazione di TA si opera mediante la lettura dei risultati di un estensimetro inclinato a 45° sull'asse baricentrico in un solo punto di misura o meglio in due punti per ottenere una migliore precisione.

Si isola un diedro avente lato unitario nel centro della sezione del profilato e soggetto allo stato tensionale di cui alla figura 3.

$\sigma_A$  è noto attraverso i due estensimetri paralleli all'asse della centina,  $\sigma$  è noto attraverso l'estensimetro inclinato a 45° sull'asse,  $\sigma_P$  è incognito e rappresenta l'effetto di P sulla sezione longitudinale in asse.

Imponendo l'equilibrio del diedro lungo la direzione di  $\sigma$  e considerando le tensioni normali positive se di compressione si ottiene:

$$\sigma \cdot \sqrt{2} - \frac{\sigma_A}{\sqrt{2}} - \sigma_P / \sqrt{2} - 2 \cdot \tau_A / \sqrt{2} = 0$$

da cui

$$\tau_A = \sigma - \frac{\sigma_A + \sigma_P}{2} \quad (7)$$

In prima approssimazione è lecito ipotizzare  $\sigma_P = 0$ , e quindi ricavare:

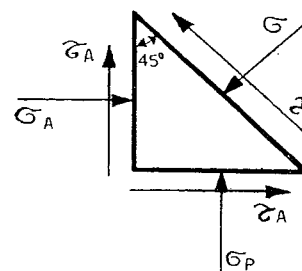


Figura 3

$$\tau'_A = \sigma - \sigma_A/2$$

e quindi

$$T'_A = \tau'_A \cdot b \cdot \frac{J}{SN}$$

ove:  $J$  = momento d'inerzia della sezione della centina rispetto all'asse baricentrico

$SN$  = momento statico della parte di sezione superiore rispetto all'asse baricentrico

$b$  = spessore dell'anima del profilato.

Per i profilati con buona approssimazione si ha:

$$T'_A = \tau'_A \cdot b \cdot (H - 2,5 \cdot t)$$

(ved. appendice n. 2)

ove:  $H$  = altezza totale profilato

$t$  = spessore delle ali.

Nota  $T'_A$  attraverso l'equazione (6) si ricava un primo valore di  $P'$  e quindi

$$\sigma'_P = \frac{P'}{4 \cdot re \cdot \text{sen} \alpha \cdot i}$$

Introducendo  $\sigma'_P$  nella (7) si ottiene un secondo valore corretto di  $\tau_A$  e quindi:

$$T_A = \tau_A \cdot b \cdot (H - 2,5 \cdot t).$$

Sempre dall'equazione (6) si ottiene il nuovo valore di  $P$  e quindi la pressione specifica  $p$ . Si può procedere nell'iterazione fino a quando  $P$  rimane praticamente invariato.

Vi è da notare che  $p$ , anche nelle situazioni più sfavorevoli, non supera il valore di  $20 \text{ kg/cm}^2$  e quindi è più che sufficiente una sola iterazione.

Nota  $T_A$  con l'equazione (5) si ricava  $T_B$  e si è quindi in grado di ripetere tutto il ciclo di calcolo per i successivi tronchi BC, CD ecc.

In definitiva per ogni tronco di centina, in cui la stessa viene suddivisa, a conclusione del calcolo si otterranno i valori delle forze  $P$  e  $S$  e rispettivamente delle pressioni medie specifiche normali:

$$p = \frac{P}{2 \cdot re \cdot \text{sen} \alpha \cdot i}$$

e tangenziali

$$s = \frac{S}{2 \cdot re \cdot \text{sen} \alpha \cdot i}$$

essendo  $i$  l'interasse medio fra le centine adiacenti a quella strumentata.

È possibile ora procedere al confronto fra i valori medi di  $p$  e quelli locali  $pg$  rilevati dalle cellule pressiometriche.

Infatti il rapporto  $K = pg/p$  permette di dare una valutazione sull'andamento della pressione normale a tergo del rivestimento lungo l'asse della galleria, valutazione che in alcuni casi può rivestire un'importanza notevole.

Inoltre deducendo i valori della pressione della falda misurati mediante le cellule piezometriche dalle pressioni  $pg$  e, per estrapolazione, dalle pressioni medie  $p$  si è in grado di evidenziare l'andamento della pressione litostatica lungo l'asse longitudinale e quindi l'esistenza di possibili archi di scarico tra centina e centina.

La sezione di misura esaminata nei precedenti paragrafi rappresenta il caso più generale e completo.

Dal caso esaminato si possono ricavare alcuni sottocasi che ricorrono forse più frequentemente nella pratica.

A) *Sezione di misura attrezzata solamente con estensimetri secondo lo schema del caso generale*

In tale situazione rimangono valide sia l'analisi fatta in precedenza sia le conclusioni trattene.

Viene ovviamente a mancare il confronto tra i valori medi  $p$  dedotti dal calcolo ed i valori locali misurati  $pg$ .

B) *Sezione di misura attrezzata in due punti di misura come nel caso generale e nei rimanenti con estensimetri posti in asse alla centina e con cellule pressiometriche*

In tal caso per la maggior parte dei tronchi di centina sono noti solamente gli sforzi assiali  $NA$  e  $NB$ , le pressioni locali  $pg$  e quindi per estrapolazione il valore di  $P = 2 \cdot re \cdot \text{sen} \alpha \cdot i \cdot pg$ .

Delle cinque rimanenti grandezze incognite  $MA$ ,  $MB$ ,  $TA$ ,  $TB$ ,  $S$ , per ogni tronco di centina ne sono determinabili solamente tre mediante le tre equazioni di equilibrio.

Seguendo il procedimento generale precedentemente indicato si determina  $TA$  in due diversi punti di misura. In tal caso essendo noto in ogni tronco di centina la differenza

$$TA - TB = \frac{P}{\cos \alpha} - (NA - NB) \cdot \text{tang} \alpha$$

è possibile determinare gli sforzi di taglio nelle sezioni in corrispondenza ai punti di misura.

Di conseguenza è nota in ogni tronco la somma (TA + TB) e quindi lo sforzo tangenziale totale dalla (3).

$$S = (TA + TB) \operatorname{sen}\alpha - (NA - NB) \operatorname{cos}\alpha$$

Dall'equazione (1) si ha inoltre:

$$MB - MA = S \cdot \rho + (NA - NB) \cdot r$$

Poiché si dispone di due punti di misura attrezzati con estensimetri posti simmetrici rispetto all'asse della centina, sono ricavabili i due valori dei momenti flettenti in detti punti e quindi, attraverso la relazione precedente, i momenti flettenti nei rimanenti punti di misura.

Anche per quest'ultimo caso esaminato si giunge alla determinazione delle forze agenti sul rivestimento e delle sollecitazioni interne della struttura di sostegno.

### Conclusioni

Nelle pagine precedenti si è esposto un metodo completo di indagine sulla determinazione delle forze interagenti tra struttura di sostegno ed il terreno circostante, metodo basato sull'applicazione di un sistema combinato di estensimetri con cellule pressiometriche e piezometriche applicati al rivestimento.

Il metodo basa, come gli analoghi, la ricerca delle forze agenti sul contorno della struttura sulla conoscenza dello stato tensionale interno della struttura stessa.

Come tale esso è perciò applicabile a tutti i pre-rivestimenti e rivestimenti che, dal punto di vista strutturale, presentino un asse geometrico ben definibile. In tale categoria rientrano ad esempio tutti i rivestimenti prefabbricati metallici ed in c.a.

Per i rivestimenti in c.a. la ricerca delle tensioni mediante la misura delle deformazioni interne è più delicata in quanto queste ultime sono la somma di deformazioni elastiche causate dalle tensioni interne e di deformazioni anelastiche causate dal ritiro e dal fluage del calcestruzzo.

Tuttavia, nell'ambito dell'approssimazione della ricerca sperimentale in oggetto, tali difficoltà appaiono oggi superabili.

Una limitazione ad una indagine più vasta sul comportamento meccanico del terreno circostante il cavo è quella dovuta alla mancata determinazione delle deformazioni del terreno stesso.

A tale limitazione può essere ovviato mediante

l'uso di estensimetri a base lunga incorporati nell'ammasso roccioso o altro sistema analogo.

In tal caso si ha una visione globale del comportamento dell'insieme struttura di sostegno-ammasso roccioso, comportamento che può essere finalmente messo a confronto con quello del modello meccanico ipotizzato e posto a base dei calcoli.

### APPENDICE N. 1

Se S è la risultante delle forze tangenziali agenti sul tronco d'arco d'intensità pari a

$$S = s \cdot 2 \cdot re \cdot \operatorname{sen}\alpha$$

in cui re è il raggio esterno del rivestimento, essa avrà la retta d'azione passante alla distanza dal centro tale da uguagliare i momenti di s rispetto ad O:

$$(2s \cdot re \cdot \alpha) \cdot re = S \cdot \rho = 2s \cdot re \operatorname{sen}\alpha \cdot \rho$$

da cui

$$\rho = re \cdot \frac{\alpha}{\operatorname{sen}\alpha}$$

### APPENDICE N. 2

Una ulteriore approssimazione è possibile per la formula:

$$T_A = \tau_A \cdot \frac{I \cdot b}{SN} = \tau_A \cdot h_s \cdot b = \delta \cdot \tau_A \cdot \bar{H} \cdot b$$

ove H è l'altezza nominale del profilato,

b lo spessore dell'anima

e  $\delta$  un coefficiente numerico che assume mediamente i seguenti valori per i diversi tipi di profilati per  $H \leq 320$

valori di  $\delta$

Tipo profilato	NP	IPE	HEA	HEB
$\delta$	0,86	0,88	0,86	0,89

### BIBLIOGRAFIA

- BALDOVIN G. (1967) - *L'applicazione del metodo, dello scudo nello scavo della linea 2 della Metropolitana Milanese*. Atti dell'VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari. *International Symposium on Underground Operating*. Tema 3, Lucerna 1972.
- KIYOMI TAKIBUCHI (1970) - *Earth pressure acting on steel arch support and lining concrete in swelling rocks*. Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics, Belgrado.
- VIGGIANI C. (1968) - *Azioni esercitate dal terrapieno su di un muro di sostegno in cemento armato*. Atti IV Convegno Geotecnica, 1 - 41.

## SUMMARY

### **Experimental determination of forces acting on tunnel linings**

The magnitude of forces acting on tunnel linings depends on several factors, including geometry, excavation and lining technology, structure and mechanical properties of rock mass. The reliability of design procedures has therefore to be checked against full scale measurement.

Most common measurements are those of earth pressure against lining and of strain in elastic members of lining system.

Author discusses the more convenient combinations of both methods and the procedures to elaborate measurements results to get tangential and normal actions against lining.