

MISURE DI DEFORMAZIONE IN UNA GALLERIA FORZATA CON RIVESTIMENTO PRECOMPRESSO IN OPERA (*)

A. GILIBERTI - T. SILVESTRI (**)

SOMMARIO: La galleria forzata di derivazione dell'Impianto « Agri 1° Salto » ha attraversato, per oltre metà della sua lunghezza, una formazione pliocenica di conglomerati e sabbie di caratteristiche tali da non garantire una sufficiente collaborazione con i rivestimenti murari. Venne pertanto adottato in larga scala il rivestimento precompresso in opera secondo il sistema KIESER. Allo scopo di controllare il comportamento di tale tipo di rivestimento anche durante l'esercizio, vennero installate apposite apparecchiature elettroacustiche per la misura delle deformazioni in un tronco di galleria di 10 m di lunghezza. Le misure estensimetriche hanno consentito di seguire la struttura nelle diverse fasi.

Attualmente la galleria è in servizio a carico ridotto.

Si riportano le osservazioni sperimentali e se ne discutono i risultati.

1 - Premessa

L'impianto idroelettrico « Agri 1° salto » della Società *Idroelettrica dell'Agri*, in via di trasferimento all'ENEL, utilizza le acque immagazzinate nel serbatoio di Pietra del Pertusillo, realizzato dall'*Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e della Trasformazione Fondiaria in Puglia e Lucania*, sbarrando il fiume Agri, nell'omonima località, con una diga in calcestruzzo del tipo arco-gravità, avente altezza di ritenuta 90 m (sul fondo alveo).

La diga è stata ultimata nel 1963 mentre a tutt'oggi nel serbatoio sono stati effettuati solo invasi parziali fino alla quota 495,30. La centrale è entrata in servizio nell'agosto 1963.

Fra le opere di derivazione dal serbatoio, particolare rilievo assume la galleria forzata che sin dalla fase iniziale di studio e progettazione apparve opera di notevole impegno tecnico ed economico sia per i valori delle pressioni in gioco, sia soprattutto per la natura dei terreni attraversati.

La galleria, proporzionata per la portata massima delle macchine di 20 m³/s, ha sezione circolare, diametro interno finito 3,35 m e si svolge in sponda sinistra del fiume Agri, per una lunghezza complessiva, fino al pozzo piezometrico, di 13.437 m.

I terreni che vennero attraversati durante lo scavo sono costituiti (v. fig. 1):

a) da arenarie grigie molto consistenti e conglomerati poligenici ben cementati, attribuibili all'Eo-Miocene, per un breve tratto compreso fra l'opera di presa e la progressiva 300 circa;

b) da una formazione miocenica marnoso-argilloso-arenacea, a struttura prevalentemente flyshoide, fra la progressiva 300 e la 6000 circa, ubicata poco a monte del T. Armento;

c) da un complesso pliocenico di conglomerati e sabbie più o meno argillose fra la progressiva 6000 e il pozzo piezometrico.

Sin dai primi scavi di prova si nutrono seri dubbi circa l'effettiva possibilità di collaborazione con i rivestimenti murari che avrebbero offerto i terreni pliocenici c) sotto l'azione della notevole pressione idrostatica interna.

Tali terreni si presentavano infatti come un deposito molto potente, regolare e ben stratificato, di conglomerati ⁽¹⁾ con grado di addensamento variabile, talvolta cementati, intercalati da lenti, anche di notevole spessore, di sabbie fini, sabbie limose e limi sabbiosi. La formazione si rilevò anche sede di circolazione idrica di intensità variabile con le caratteristiche locali: le vene acquifere incontrate risultavano particolarmente pingui negli strati di conglomerato più sciolto e nelle lenti di sabbia, più scarse nei conglomerati compatti e nelle intercalazioni con maggior contenuto argilloso. Inoltre la superficie piezometrica

(*) Comunicazione presentata al VII *Convegno di Geotecnica* (Trieste, 1-2 giugno 1965).

(**) Dott. ing. Aurelio GILIBERTI - Assistente straordinario - Capo del *Reparto Esperienze su Strutture e Modelli dell'Istituto di Tecnica nelle Costruzioni*, Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli.

Dott. ing. Tito SILVESTRI - ENEL - Compartimento di Napoli - *Centro Progettazioni e Costruzioni Idrauliche, Elettriche e Civili*.

(1) Granulometricamente questi conglomerati possono essere classificati come: « ghiaie con sabbia o sabbiose, a volte debolmente limose ».

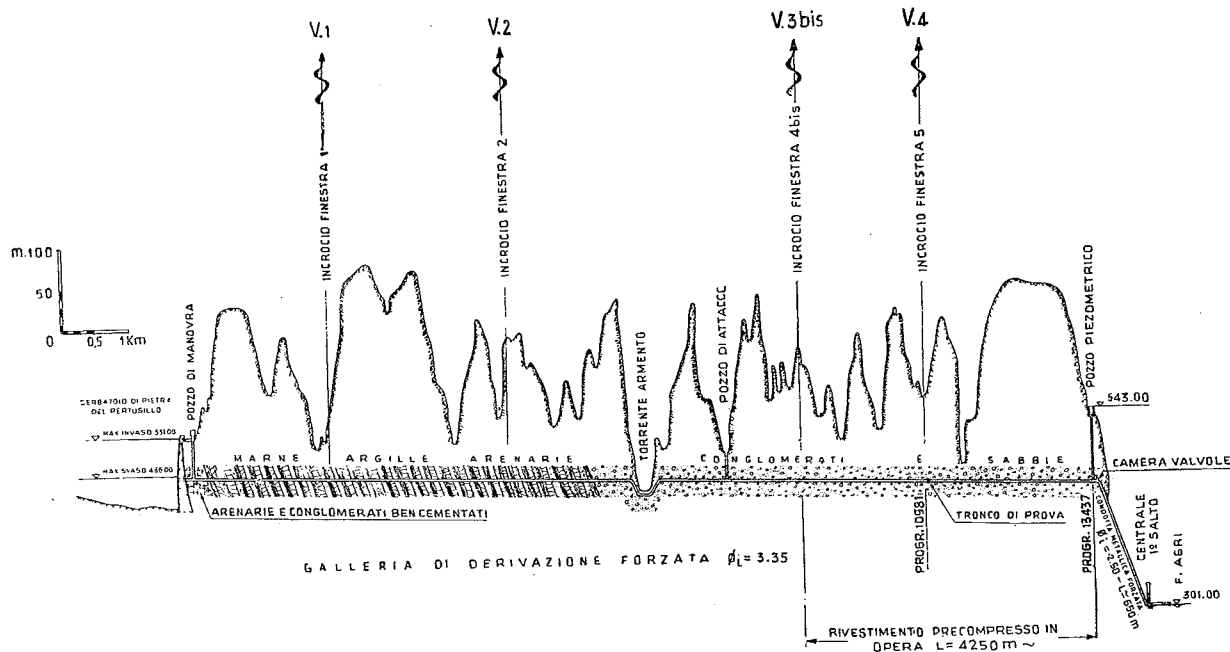


Fig. 1 - Profilo schematico dell'impianto « 1° Salto Agri ».

della falda, molto irregolare a causa dell'accidentata morfologia della zona, presentava un andamento generalmente discendente verso il letto dell'Agri e dei suoi principali affluenti, aventi la funzione di altrettante gronde naturali. Sviluppandosi pertanto la galleria, procedendo da monte verso valle, a quote sempre più elevate rispetto all'alveo, ne conseguì che mentre il primo tronco attraverso i conglomerati (fra le progressive 6.000 e 11.600 circa) venne a trovarsi pressochè interamente entro la falda, il rimanente tratto (dalla progressiva 11.600 fino al pozzo piezometrico) andò ad interessare i conglomerati asciutti a tetto della falda stessa. La progressiva diminuzione verso valle del grado di umidità della formazione era anche accompagnata da una generale tendenza ad una maggiore compattezza e coesione. Si passava così, con una certa gradualità, dai conglomerati praticamente sciolti e fortemente acquiferi della zona dell'Armento a quelli completamente asciutti, ben addensati e fortemente cementati incontrati all'attacco del pozzo piezometrico.

La situazione accertata in fase di studi preliminari suggerì l'esecuzione, prima dell'inizio dei lavori, di un tronco di prova nel quale sperimentare i rivestimenti più adatti al particolare tipo di terreno che si sarebbe attraversato.

Il tronco, ubicato poco a monte del pozzo piezometrico, venne suddiviso in anelli di 8 m, ognuno dei quali con un diverso tipo di rivestimento. Tutti i tipi provati, sia quelli tradizionali in calcestruzzo armato, con armature disposte nello spessore dell'anello o nella gunite, sia quelli speciali in cui fra il calcestruzzo e la gunite retinata erano stati disposti materiali impermeabilizzanti⁽²⁾, sottoposti a pressioni di 4 ÷ 5 atm. (circa la metà di quella di esercizio) si lesionarono in più punti.

(2) Per tutti i rivestimenti particolare cura venne posta nella esecuzione delle iniezioni di intasamento.

Con tali premesse, particolarmente significative per essere la prova stata eseguita in una zona dove i conglomerati presentavano caratteristiche decisamente migliori, scartate per il loro costo altre soluzioni quali ad esempio rivestimenti metallici o tubi precompressi eseguiti fuori opera, ci si orientò in definitiva su un rivestimento precompresso in opera, secondo il procedimento proposto e brevettato dal Dr. A. KIESER (*Kernring Auskleidung*).

Sui dettagli esecutivi del sistema, così come applicato nella galleria dell'impianto Agri, si tornerà diffusamente più avanti; se ne richiamano qui soltanto i criteri informativi.

Il procedimento prevede l'esecuzione di due anelli di rivestimento in calcestruzzo, disposti concentricamente e separati da una camera anulare nella quale si immettono successivamente malta e boiaccia di cemento a conveniente pressione. La miscela iniettata nella camera, trovando il necessario contrasto contro l'anello esterno e la roccia circostante esercita, sull'estradosso dell'anello interno, una vera e propria azione di precompressione: con una opportuna scelta del valore della pressione di iniezione si possono annullare o quanto meno ridurre al minimo le sollecitazioni di trazione indotte successivamente nell'anello interno dalla pressione idrostatica di esercizio.

L'idoneità del procedimento ai terreni che sarebbero stati interessati dalla galleria venne sperimentata in via preliminare con un cunicolo, eseguito nella stessa zona dove erano stati provati i rivestimenti tradizionali, ed avente le seguenti caratteristiche: lunghezza 10 m; diametro interno 1,55 m; spessore dell'anello interno 10 cm; ampiezza della camera anulare di precompressione 2 cm; nell'anello interno venne anche disposta una armatura circolare in acciaio ad alto limite elastico costituita da 11 Ø 14/m con ripartitori Ø 10 ogni 15°; durante la precompressione venne raggiunta la pressione di 17 atm.

Nel corso della prima prova idraulica, alla pres-

sione di 9 atm, corrispondente a quella di esercizio, si riscontrarono delle perdite diffuse, seppure di modesta entità (all'incirca 0,5 l/1' per m² di rivestimento). Tali perdite vennero attribuite essenzialmente alla qualità del calcestruzzo dell'anello interno che risultò piuttosto poroso; la non buona riuscita dei getti era probabilmente da attribuire al loro modesto spessore. Il cunicolo venne quindi completamente intonacato e la prova ripetuta alla stessa pressione di 9 atm.: le perdite si ridussero a valori praticamente trascurabili. La pressione venne infine spinta fino a 15 atm.: si ebbero di nuovo perdite diffuse dello stesso ordine di grandezza di quelle riscontrate nel cunicolo non intonacato a 9 atm.

Prima e dopo la precompressione e dopo ogni prova idraulica vennero anche eseguite, all'interno del cunicolo, misure di deformazione mediante calibro estensimetrico. Le misure vennero effettuate in 4 sezioni trasversali, in ognuna delle quali erano state predisposte 5 zanche. Fu possibile così rilevare le variazioni di lunghezza del perimetro di un pentagono inscritto nella sezione circolare del cunicolo. Per una serie di motivi connessi con le caratteristiche stesse dell'installazione e con i numerosi fattori che influenzavano le osservazioni, queste risultarono di interpretazione piuttosto incerta, pur mettendo in rilievo, almeno qualitativamente, il comportamento della struttura, specie durante la precompressione.

2 - Il rivestimento precompresso in opera secondo il procedimento « Kieser »

La galleria dell'Agri rappresenta a tutt'oggi l'esempio di gran lunga più cospicuo di applicazione del rivestimento « KIESER ».

Precedentemente infatti solo per l'impianto del Lünnersee, nel Vorarlberg, tale tipo di rivestimento era stato adottato in un tronco di galleria di lunghezza superiore a 1 km (1.300 m). In Italia l'unico esempio conosciuto è quello della galleria dell'impianto di Lana d'Adige sul torrente Valsura dell'ENEL (ex STE) con una lunghezza complessiva di rivestimento di 600 m circa ⁽³⁾.

Nel caso dell'Agri per una serie di motivi di carattere soprattutto organizzativo non fu possibile estendere il procedimento del precompresso in opera all'intero tronco di galleria interessante i conglomerati, ma se ne dovette limitare l'adozione al tratto terminale, di oltre 4 Km, soggetto alle maggiori pressioni di esercizio ⁽⁴⁾.

La tecnologia del sistema, così come venne messa a punto anche a seguito dell'esperienza costituita dal cunicolo di prova, prevedeva tre fasi esecutive principali: prerivestimento, anello interno, precompressione.

a) *Prerivestimento* - Venne realizzato con un

anello di calcestruzzo di spessore variabile in relazione alla natura dei terreni attraversati.

Nelle sole zone con insufficiente copertura di terreno nello spessore del calcestruzzo venne anche disposta una leggera armatura in ferro acciaiolo.

A tergo del prerivestimento vennero quindi eseguite le iniezioni di intasamento a bassa pressione contro roccia, che dovettero essere notevolmente infittite per la riscontrata difficoltà di ottenere una sufficiente diffusione delle miscele.

b) *Anello interno* - Secondo il sistema originariamente proposto dal KIESER, il rivestimento interno veniva di solito realizzato con blocchetti di calcestruzzo, eseguiti fuori opera, muniti all'estradosso di apposite sporgenze per la formazione della camera anulare di precompressione.

L'adozione di tali elementi prefabbricati dovette essere scartata per il suo costo, per l'impossibilità di reperire sufficiente manodopera specializzata ed infine perchè incompatibile con i ritmi di produzione in programma. Il rivestimento interno venne perciò realizzato con un anello di calcestruzzo gettato in opera, di spessore 25 cm. La camera anulare di precompressione fu ottenuta adoperando, quali casseforme all'estradosso dell'anello interno, lamiere bugnate di spessore 0,8 mm (in arco rovescio 1,0 mm). Le bugne, aventi una sporgenza di 2,3 cm e un interasse di 20 cm, furono ricavate mediante stampaggio. Le lamiere venivano fissate, mediante chiodi da sparo, all'intradosso del prerivestimento, in fogli affiancati di larghezza 1 m ciascuno; le sovrapposizioni lungo i bordi venivano sigillate con nastro adesivo per evitare che durante il getto la camera anulare potesse intasarsi. All'intradosso dell'anello interno era anche disposta una leggera armatura metallica avente lo scopo di fronteggiare eventuali deficienze locali di precompressione e le inevitabili disuniformità dello spessore (v. fig. 2).

Il rivestimento interno venne suddiviso in tronchi di 10 m, separati da anelli di giunto di lunghezza 28 cm e spessore 37 cm. I giunti avevano essenzialmente la funzione di consentire la precompressione di ciascun anello di 10 m senza alcuna interferenza con i tronchi adiacenti.

Il getto dell'anello interno di rivestimento venne effettuato per fasi.

Nella prima fase veniva eseguita l'armatura e il getto dell'arco rovescio nei tronchi di 10 m. Nella seconda l'arco rovescio degli anelli di giunto. Nella terza mediante casseforme metalliche telescopiche e treno a béton si procedeva al getto dei piedritti e della calotta dei tronchi di 10 m. Nella quarta ed ultima fase venivano completati gli anelli di giunto. La produzione media giornaliera fu di circa 40 m di rivestimento completo.

Il calcestruzzo veniva confezionato con inerti di fiume classificati e lavati, aventi pezzatura massima 35 ÷ 40 mm, e cemento 730 A.F., dosaggio 325 Kg/m³.

Con l'uso delle casseforme metalliche ed una buona vibratura dei getti si poté ovunque fare a meno dell'intonaco.

c) *Precompressione* - Durante il getto dell'anello interno venivano predisposti gli spezzoni di tubo per

⁽³⁾ V. « L'Energia Elettrica », settembre 1965.

⁽⁴⁾ Per il tratto compreso fra il T. Armento e la finestra 4-bis venne adottato un rivestimento costituito da un doppio anello in calcestruzzo fra cui venivano interposti fogli di materiale plastico impermeabile (s = 4 mm).

L'anello interno, di spessore 28 cm, era munito di una robusta armatura in acciaio ad a.l.e. disposta in doppio strato. Il materiale plastico era costituito essenzialmente da cloruro di polivinile.

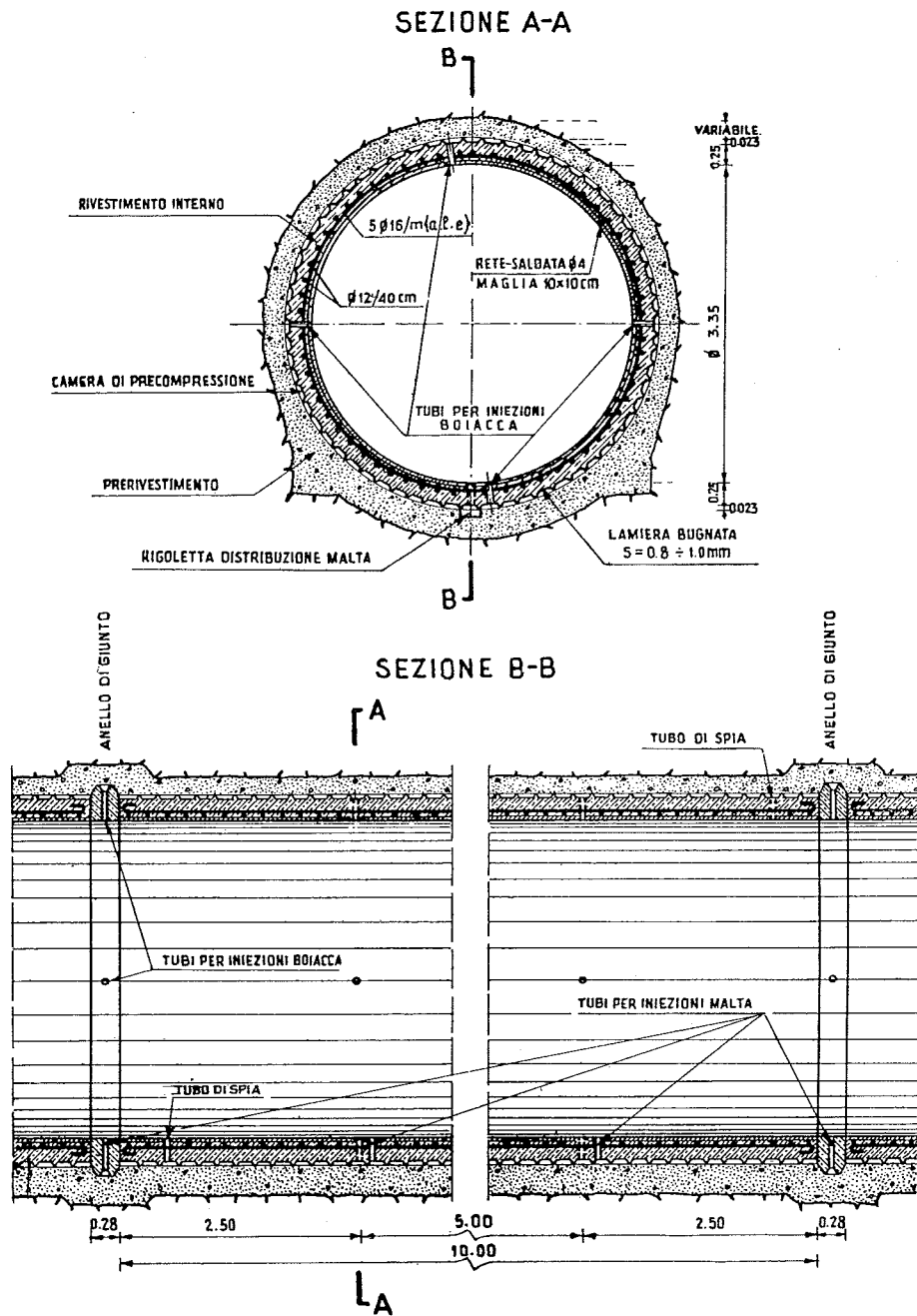


Fig. 2 - Sezioni tipo della galleria con rivestimento precompresso in opera.

il collegamento con la camera di precompressione. 2 tubi per ciascun anello di 10 m ed 1 per ciascun anello di giunto, disposti in arco rovescio, erano utilizzati per il riempimento della camera con la malta. 8 tubi per ciascun anello di 10 m e 4 per ciascun anello di giunto erano invece destinati all'iniezione della boiaccia.

In ogni anello di 10 m altri 2 tubi (uno in calotta, l'altro in arco rovescio) erano previsti per segnalare l'avvenuto riempimento della camera con la malta.

La precompressione veniva effettuata in due tempi distinti.

Dapprima si eseguiva un semplice riempimento a bassa pressione della camera anulare con malta di cemento. Le pompe ad aria compressa, adoperate per

tale operazione, erano del tipo Ramsone. La malta era confezionata sul posto con sabbia fina di fiume (inferiore a 1 mm) e cemento pozzolanico; dosaggio in peso 1 : 1. Successivamente con un gruppo di 4 pompe Hány veniva iniettata nella camera la boiaccia di cemento ad una pressione di 15 atm., pari all'incirca ad 1,5 volte quella massima di esercizio.

L'iniezione veniva proseguita finchè le pompe non si fermavano da sole. Le operazioni si susseguivano in maniera tale che durante l'iniezione della boiaccia ad alta pressione in un tronco di 10 m, con relativo anello di giunto di 28 cm, il tronco successivo risultava già riempito di malta. La produzione media giornaliera fu di circa 70 m.

Qualche cenno particolare merita il fenomeno fisico

che ha luogo durante l'operazione della precompressione. Sotto l'elevata pressione nella camera il pre-rivestimento si spacca nei punti di minor resistenza. Attraverso queste lesioni e le inevitabili imperfezioni e porosità del calcestruzzo dell'anello interno viene espulsa l'acqua in eccesso contenuta nella miscela iniettata.

L'acqua trascina con sé le particelle solide che si depositano man mano intasando i vuoti fino a richiuderli completamente.

Risulta in tal modo realizzata una bonifica completa dei calcestruzzi ed una perfetta aderenza del pre-rivestimento alla roccia circostante con la quale viene così a formare un'unico complesso. Inoltre l'espulsione dell'acqua in eccesso riduce al minimo il ritiro della malta nella camera, dopo la presa.

Le inevitabili residue perdite per ritiro ed altre cause connesse alla tecnologia del sistema (perdite di carico nelle tubazioni, dai giunti etc.) dovrebbero venir compensate dalla maggiorazione di oltre il 50% con la quale si effettua la precompressione.

Naturalmente la riuscita del procedimento è per la massima parte affidata all'effettivo grado di precompressione che si riesce ad imprimere alla struttura ed al suo permanere nel tempo e sotto carico.

Ciò considerato, fu ritenuto opportuno seguire il comportamento dell'opera durante le varie fasi, mediante una serie di apparecchiature che consentissero di misurare le deformazioni in un tratto della galleria anche in presenza dell'acqua e quindi con impianto in esercizio.

È su tale sperimentazione che riferisce in particolare la presente nota.

3 - Apparecchiature di misura installate nel tronco di prova

Le apparecchiature per le misure furono installate in un tronco di 10 m di lunghezza ubicato circa 30 m a valle del vertice V₄ ed erano costituite da:

a) N. 30 estensimetri elettroacustici Galileo tipo EA-SC 150/150 per calcestruzzo disposti tangenzialmente in corrispondenza della circonferenza media dell'anello interno in c.a. e distribuiti in cinque sezioni (fig. 3 e 4).

b) N. 6 estensimetri elettroacustici Galileo tipo EA-S 120/120 fissati all'armatura circolare dell'anello interno e distribuiti in due sezioni (fig. 3 e 5).

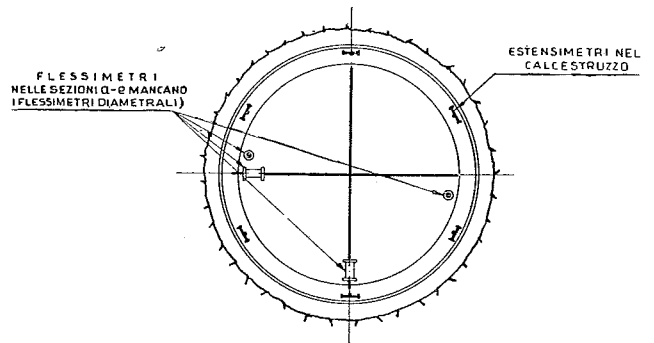


Fig. 4 - Sezioni di misura a-b-c-d-e.

c) N. 6 flessimetri elettroacustici Galileo tipo FE-P disposti diametralmente in corrispondenza di tre sezioni (fig. 3 e 4).

d) N. 2 flessimetri elettroacustici Galileo tipo FE-P disposti longitudinalmente per l'intera lunghezza del tronco di prova (fig. 3 e 4).

e) N. 4 flessimetri elettroacustici Galileo tipo FE-P disposti tra l'anello di giunto e l'anello di prova (fig. 3).

Durante l'esecuzione del getto dell'anello interno vennero installati gli apparecchi a) e le staffe di ancoraggio dei flessimetri e si predisposero apposite incassature che lasciavano scoperti i tratti di armatura

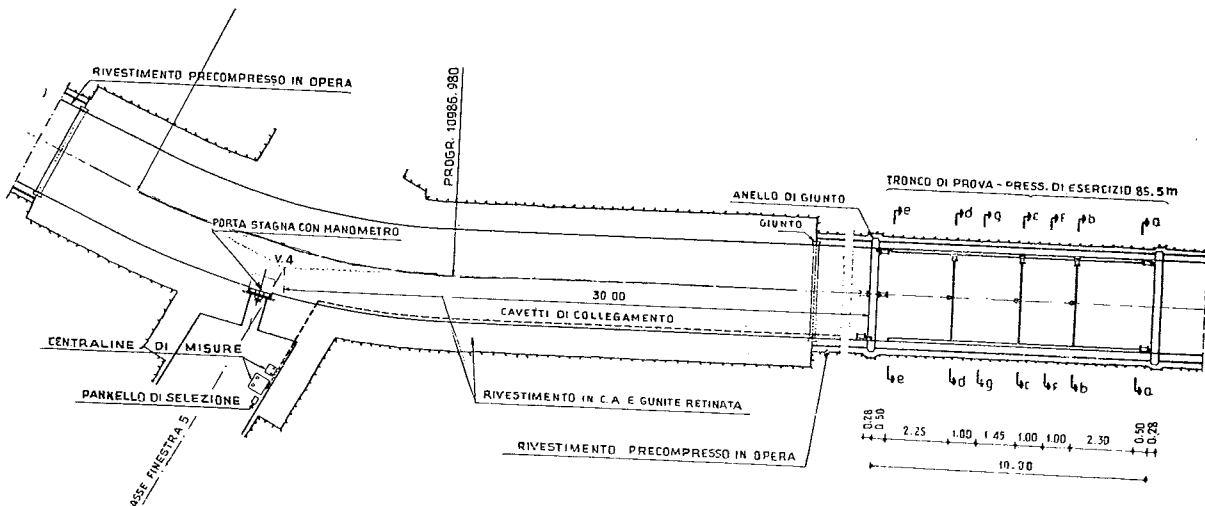


Fig. 3 - Pianta delle installazioni di misura.

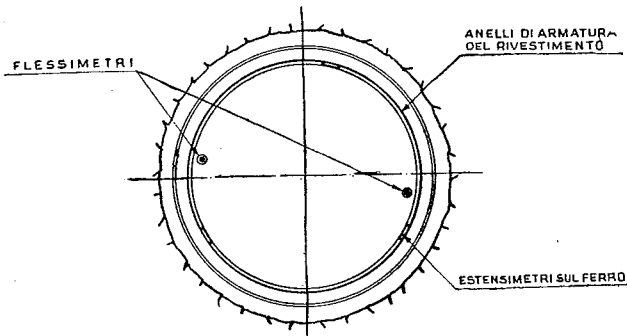


Fig. 5 - Sezioni di misura f-g.

ai quali vennero successivamente fissati gli estensimetri *b*).

Le letture alla centralina di misura venivano effettuate all'esterno della porta stagna che dava accesso alla galleria dalla finestra 5; i cavetti di collegamento delle singole apparecchiature alla centralina attraversavano lo spessore delle murature di rivestimento in corrispondenza di detta finestra (fig. 3).

Alla porta stagna venne applicato un manometro per il rilievo della pressione all'interno della galleria in corrispondenza del tronco di prova.

4 - Prove sui calcestruzzi

Le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo dell'anello interno nel tronco di prova furono determinate su campioni prelevati all'atto del getto e a differenti stagionature.

Furono in particolare determinate:

- a) La sollecitazione di rottura a compressione su cubi.
- b) La sollecitazione di rottura a trazione.
- c) La sollecitazione di rottura per fëndage (prova brasiliana).
- d) Il modulo elastico a compressione.
- e) Il coefficiente di Poisson.

I risultati di tali prove sono riassunti nei diagrammi di cui alle figg. 6, 7, 8, 9, 10.

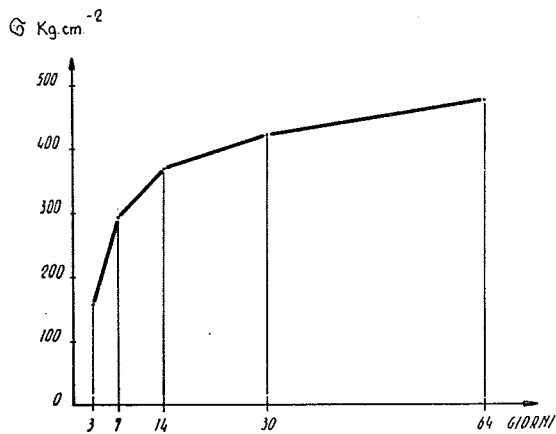


Fig. 6 - Resistenza cubica del calcestruzzo a compressione.

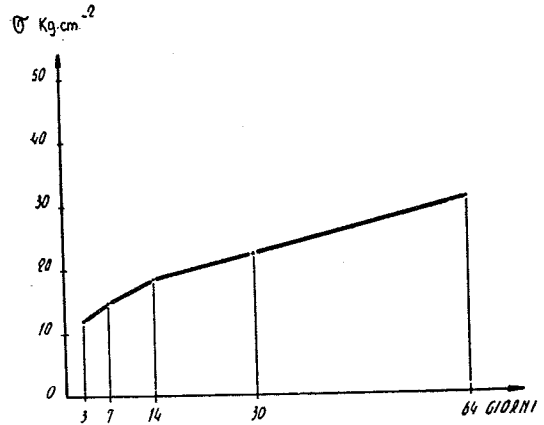


Fig. 7 - Resistenza a trazione del calcestruzzo.

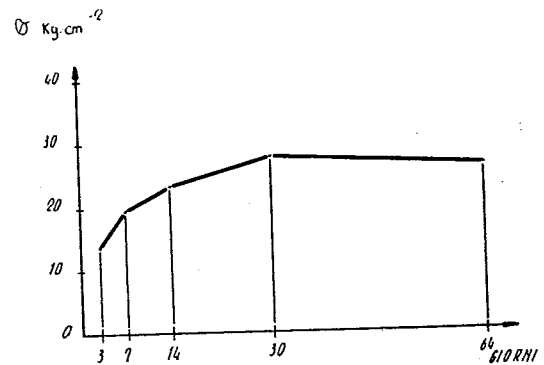


Fig. 8 - Resistenza a trazione per fëndage del calcestruzzo.

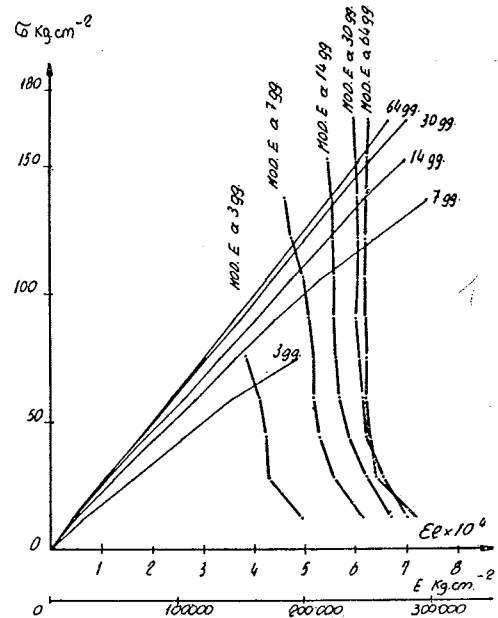


Fig. 9 - Diagrammi σ/ϵ_1 e σ/ϵ_x per il calcestruzzo a varie stagionature.

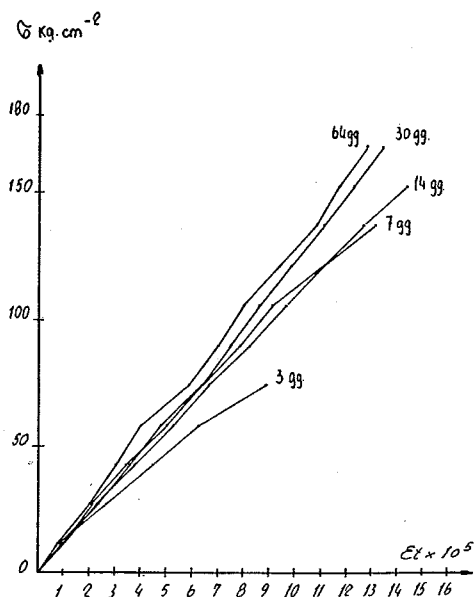


Fig. 10 - Diagrammi σ/ϵ_c per il calcestruzzo a varie stagionature.

5 - Risultati delle misure

Le misure effettuate agli estensimetri sul ferro ed ai flessimetri apparvero fin dall'inizio notevolmente perturbate dagli inevitabili movimenti del cantiere in piena attività, sì che si venne alla determinazione di non tenerne alcun conto.

Pienamente attendibili al contrario sono da ritenere i dati forniti dagli estensimetri annessi nel calcestruzzo e pertanto sufficientemente protetti da ogni manomissione accidentale.

Nelle figg. 11, 12, 13, 14, 15 sono riportati in funzione del tempo i valori delle variazioni di lunghezza unitarie, rilevati per ciascun apparecchio e riferiti alla fase iniziale di getto.

Tali variazioni di lunghezza, a meno della differenza tra i coefficienti di dilatazione termica del calcestruzzo e della corda vibrante dell'estensimetro, peraltro di entità trascurabile, non comprendono gli effetti delle vicende termiche della struttura.

I diagrammi relativi ai trenta estensimetri sono raccolti in gruppi di sei corrispondenti ciascuno ad una sezione di misura. Per ogni gruppo è ripetuto il diagramma giornaliero della quota di invaso del serbatoio del Pertusillo riferita alla quota del baricentro dell'anello di prova e quello delle temperature medie nel calcestruzzo dell'anello di prova rilevate con gli stessi estensimetri.

Il diagramma d'invaso, fatta naturalmente eccezione per i periodi di vuotamento, fornirebbe i valori della pressione nell'interno della galleria, se depurato delle perdite di carico.

Poichè queste ultime variano durante ciascun giorno con la portata erogata, da un minimo di pochi centimetri ad un massimo di 14 m, il diagramma d'invaso fornisce con buona approssimazione i valori massimi raggiungenti giornalmente dalla pressione in galleria.

Sullo stesso diagramma sono riportati i valori osservati al manometro durante le letture degli appa-

recchi. Per le ultime due letture effettuate, essendo andato fuori servizio il manometro, le pressioni sono state determinate valutando la perdita di carico corrispondente alla portata erogata all'atto delle letture stesse.

Le letture vennero effettuate giornalmente per i primi due mesi e durante le fasi di precompressione e messa in carico della galleria, e convenientemente diradate nei periodi intermedi.

Dei trenta estensimetri per calcestruzzo installati ne risultano a tutt'oggi regolarmente funzionanti ventuno, con i quali il comportamento della struttura potrà essere seguito anche per il futuro ed in particolare durante l'invaso definitivo del serbatoio.

6 - Considerazioni sui risultati

In generale i diagrammi estensimetrici rivelano un comportamento uniforme della struttura; le deformazioni non sembrano essere tanto influenzate dalla ubicazione della sezione di misura quanto piuttosto da quella dell'apparecchio nella sezione stessa.

a) Ritiro

Per le caratteristiche stesse del sistema costruttivo l'anello interno ha avuto la possibilità di contrarsi liberamente per effetto del ritiro durante il periodo intercorso fra il getto e la precompressione (circa 80 giorni). Quando quest'ultima venne effettuata il fenomeno non sembrava ancora del tutto esaurito.

Nella figura 16 è riportata la distribuzione lungo la circonferenza degli accorciamenti tangenziali dovuti al ritiro per ciascuna sezione e quella media.

Gli accorciamenti risultano distribuiti simmetricamente rispetto al diametro verticale e presentano un accentuato minimo in corrispondenza dell'arco rovescio dove è da ritenere che la stagionatura sia avvenuta in presenza di acqua defluente.

L'accorciamento unitario medio per effetto del ritiro all'atto della precompressione, determinato come media aritmetica di tutti i valori misurati, è risultato:

$$\epsilon = 0,2 \times 10^{-3} \text{ (0,2 mm/m)}$$

equivalente cioè ad una variazione termica di 20° circa.

b) Precompressione

Gli accorciamenti tangenziali dovuti alla precompressione sono distribuiti con uniformità (fig. 16) per l'intera lunghezza del tronco: risulta quindi confermata l'opportunità della disposizione scelta per i punti di iniezione.

Per tutte le sezioni si riscontrano valori più elevati in corrispondenza delle imposte dei piedritti: tale andamento è da porre probabilmente in relazione alla distribuzione delle spinte passive esercitate dalla roccia. Va tenuto anche presente che in corrispondenza delle imposte lo spessore del privervestimento è generalmente maggiore (vedi fig. 2).

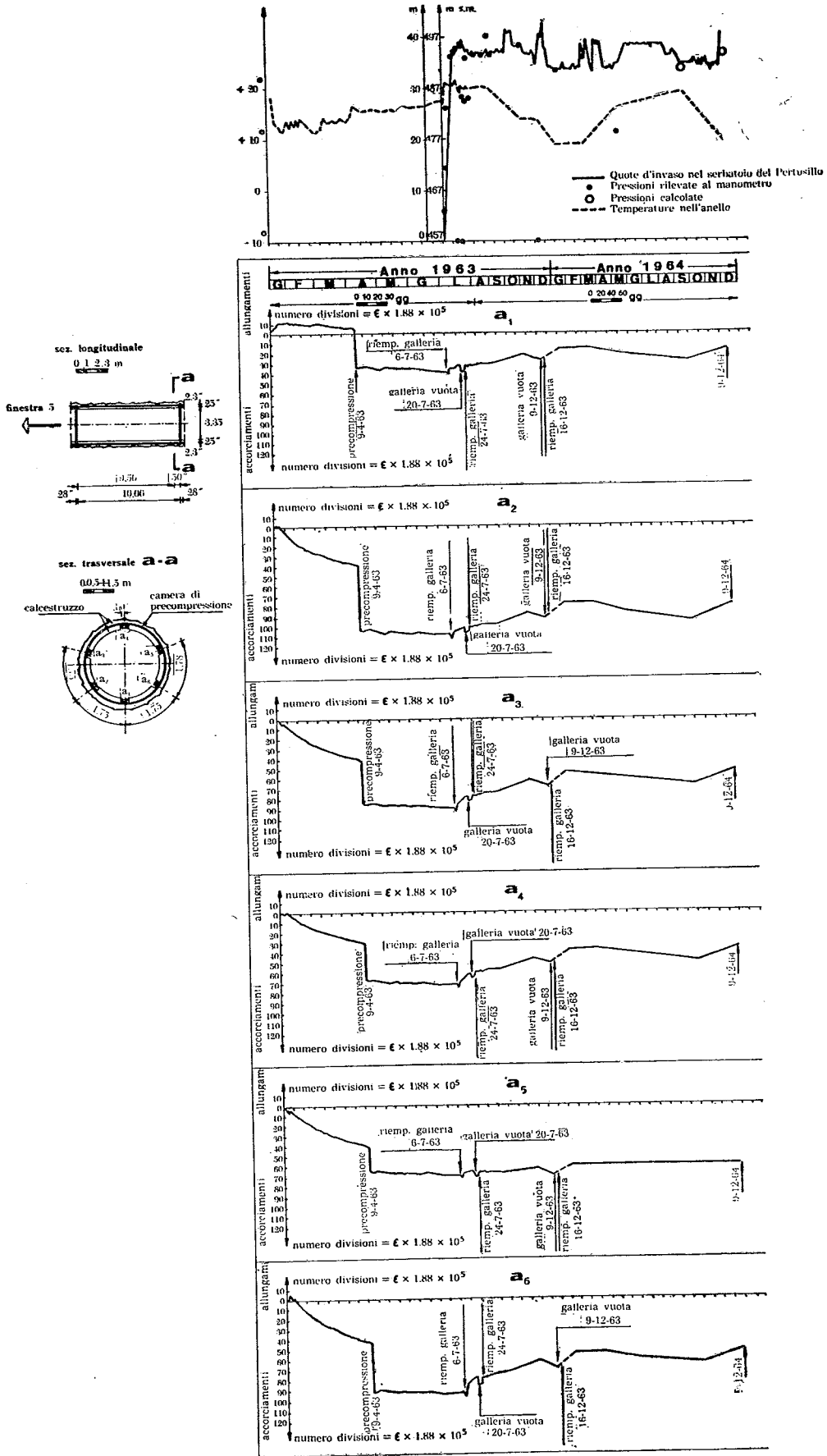


Fig. 11 - Diagrammi estensimetrici (Sezione di misura a-a).

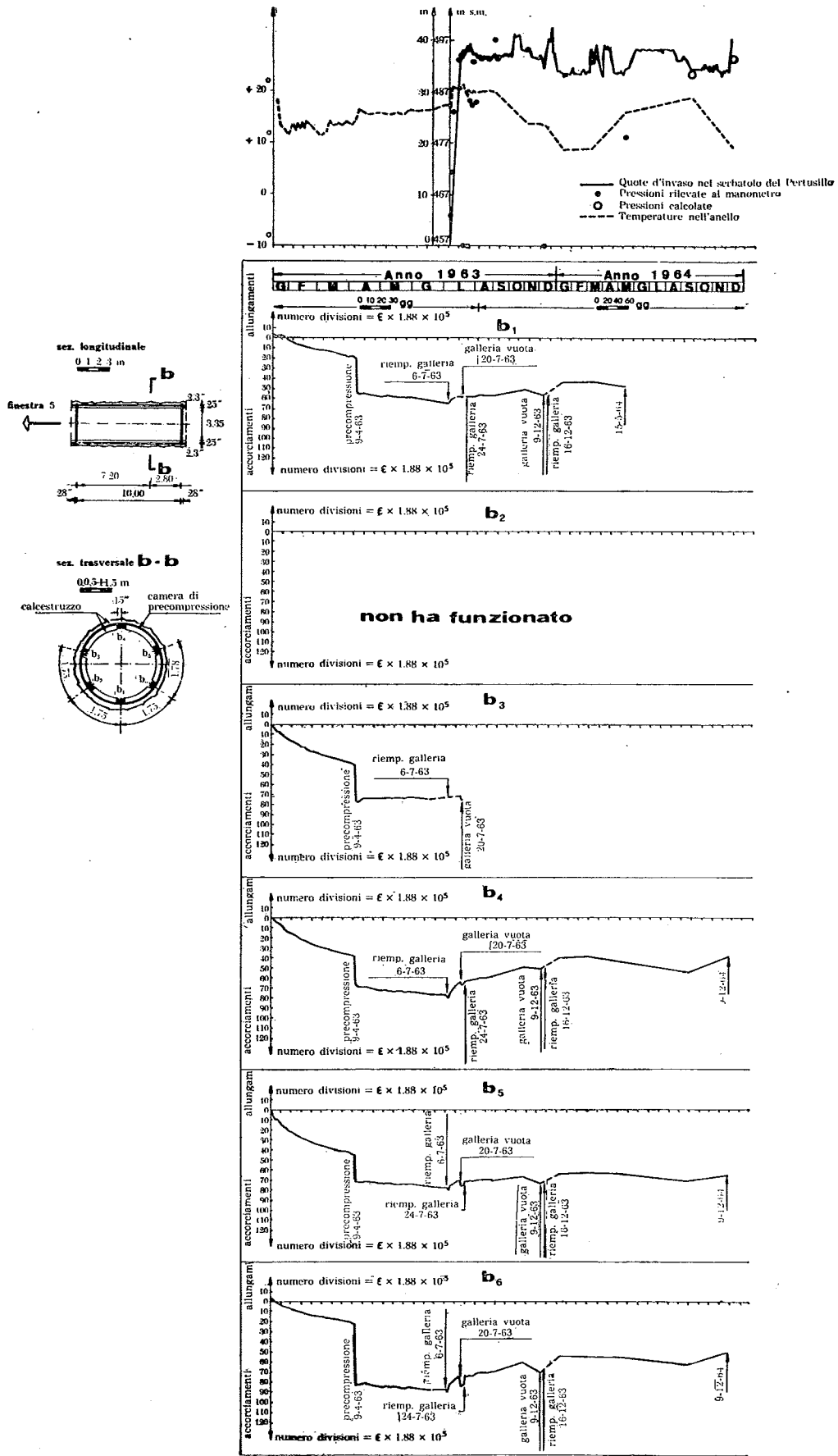


Fig. 12 - Diagrammi estensimetrici (Sezione di misura b-b).

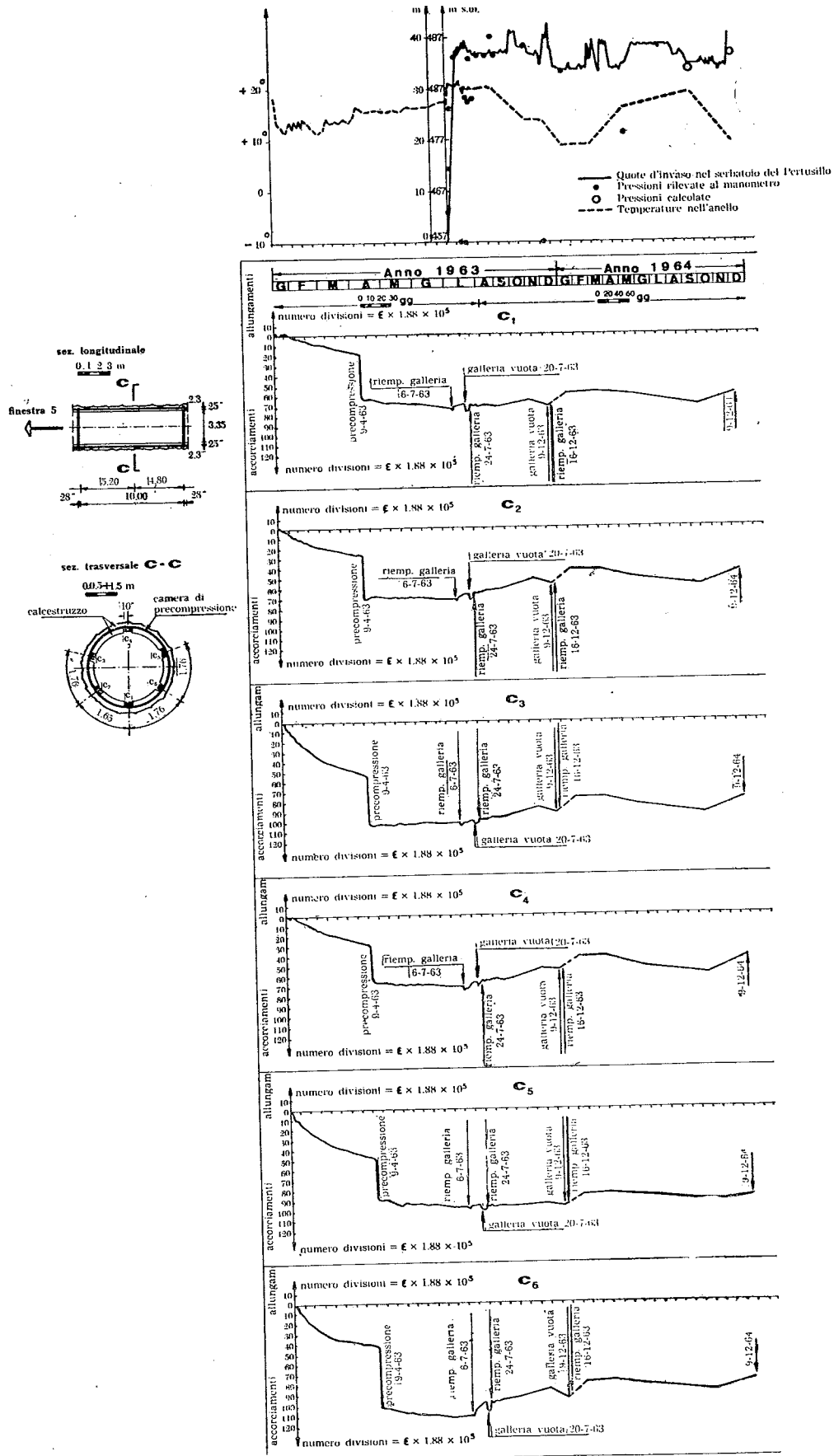


Fig. 13 - Diagrammi estensimetrici (Sezione di misura c-c).

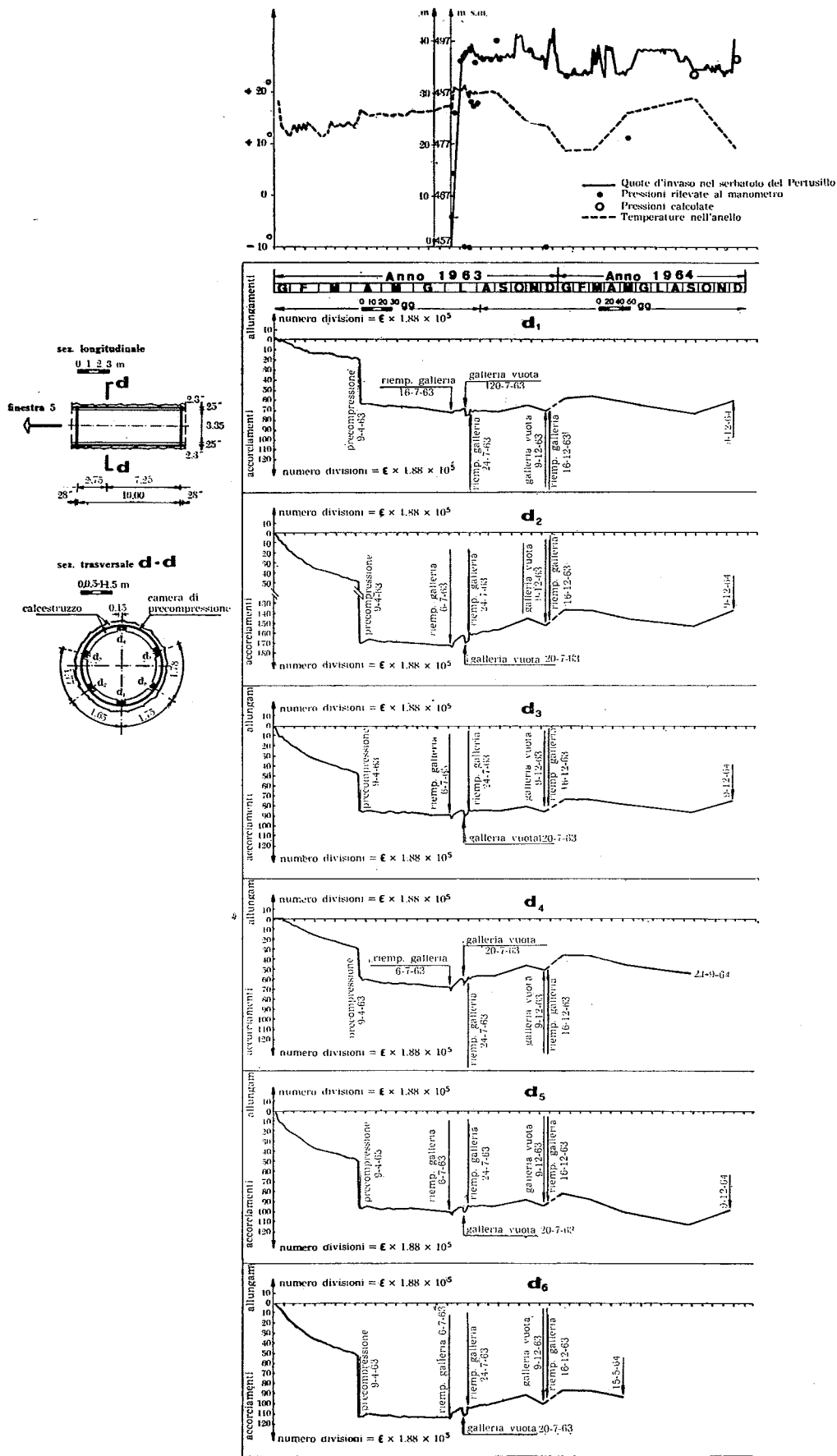


Fig. 14 - Diagrammi estensimetrici (Sezione di misura d-d).

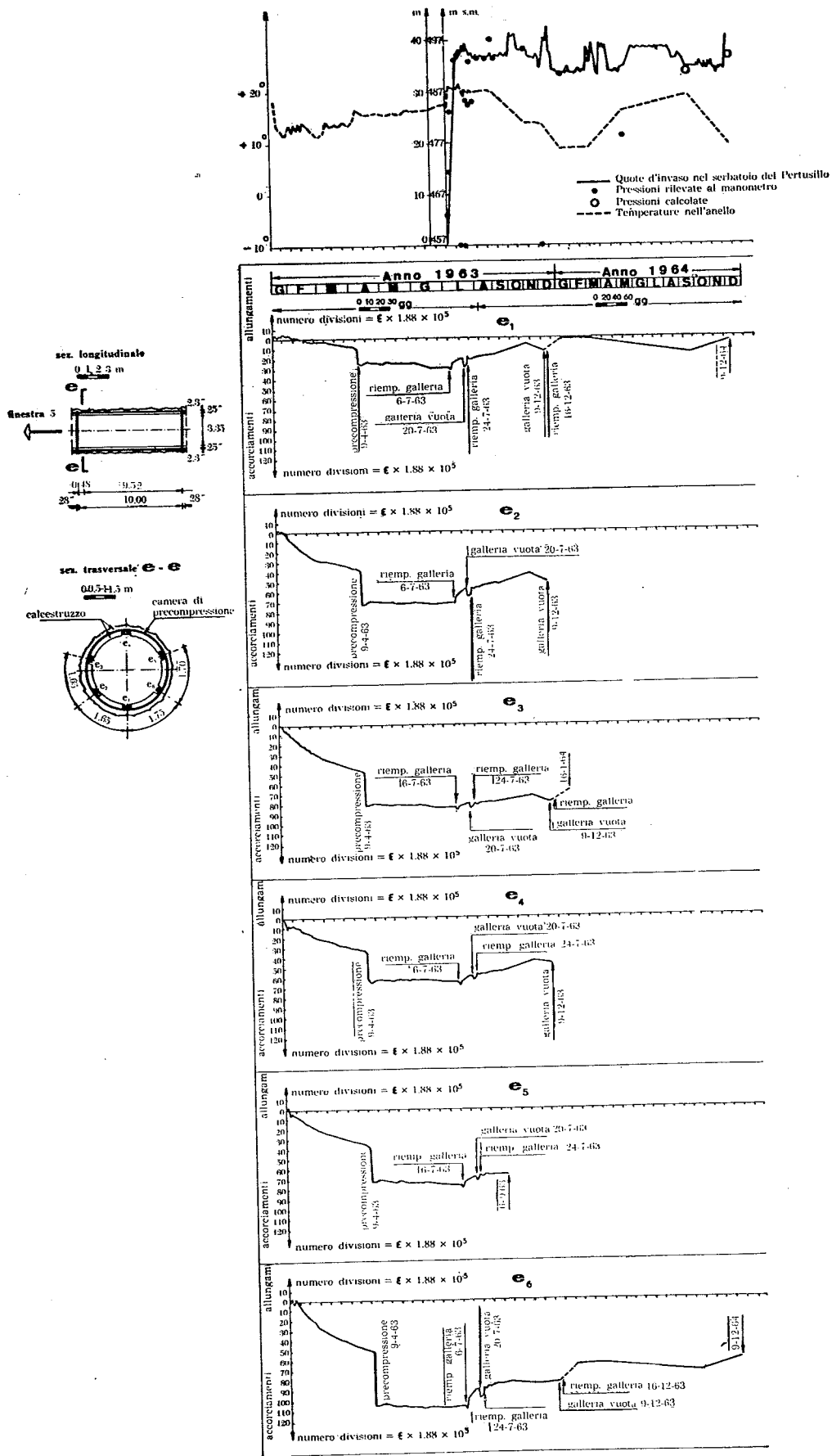


Fig. 15 - Diagrammi estensimetrici (Sezione di misura e-e).

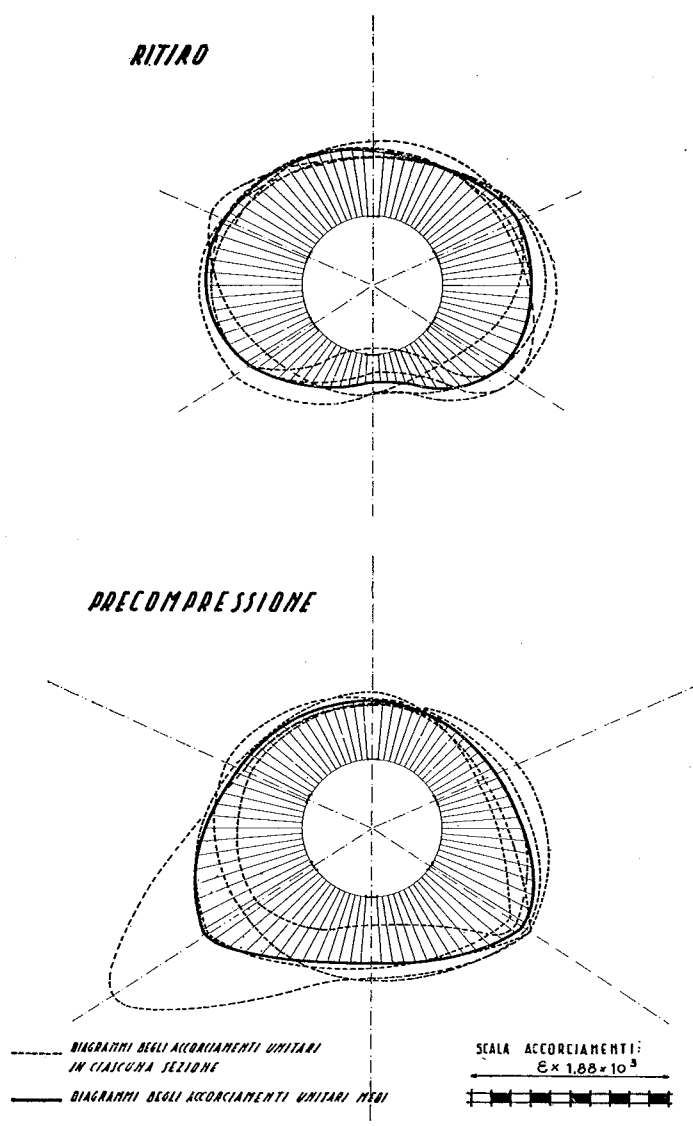


Fig. 16 - Deformazioni per ritiro e precompressione nel tronco di prova.

L'accorciamento unitario medio per effetto della precompressione è risultato:

$$\epsilon = 0,22 \times 10^{-3} \text{ (0,22 mm/m)}$$

Essendo risultato il modulo di elasticità del calcestruzzo a compressione (vedi fig. 9):

$E = 250.000 \text{ Kg/cm}^2$, la sollecitazione tangenziale di precompressione media nell'anello interno risulta $\sigma_m = 55 \text{ Kg/cm}^2$. Introducendo tale valore nella formula di MARIOTTE

$$\sigma_m = \frac{p_e d_e}{2 s'}$$

dove: p_e = pressione all'estradosso dell'anello interno
 d_e = diametro esterno dell'anello = 385 cm
 s' = spessore equivalente dell'anello tenendo

$$\begin{aligned} \text{conto dell'armatura} &= 25 + \frac{8 \times 10}{100} = \\ &= 25,8 \text{ cm}^2/\text{cm} \end{aligned}$$

si ha:

$$p_e = 7,4 \text{ Kg/cm}^2.$$

La pressione efficace ai fini della precompressione è risultata quindi circa la metà di quella letta ai manometri.

Le letture effettuate nel periodo compreso tra la precompressione e il primo riempimento della galleria (circa 90 giorni) non rivelano alcuna caduta dello stato di coazione dell'anello.

c) Pressione interna

Il riempimento della galleria fu iniziato il 6 luglio 1963 e proseguito gradualmente fino al giorno 19 luglio in cui la pressione raggiunse il valore di 3,7 atm.

Il giorno successivo la galleria venne vuotata e accuratamente ispezionata: non fu riscontrata alcuna traccia di lesioni anche capillari.

Il giorno 24 luglio si effettuò di nuovo il riempimento e si iniziarono le prove per la messa in servizio della centrale.

Un secondo vuotamento per l'ispezione della galleria fu effettuato nel dicembre 1963 e nemmeno in questa occasione furono riscontrate lesioni ⁽⁵⁾.

L'impianto è attualmente in servizio a carico ridotto non essendo stato ancora effettuato l'invaso totale del serbatoio del Pertusillo.

Durante il primo riempimento (periodo 6 ÷ 19 luglio 1963) venne misurato un allungamento tangenziale unitario medio nel tronco:

$$\Delta\epsilon = 0,04 \times 10^{-3}$$

corrispondente ad una sollecitazione di trazione nell'anello interno:

$$\Delta\sigma_m = 10 \text{ Kg/cm}^2.$$

Con riferimento allo schema statico del doppio anello costituito dal rivestimento interno e dal complesso prerivestimento più roccia, per effetto della pressione interna p_i la reazione mutua fra i due anelli passa dal valore p_e dovuto alla precompressione al valore $p_e + \Delta p_e$ e la sollecitazione di compressione media nell'anello interno si riduce al valore $\sigma_m - \Delta\sigma_m$ dove

$$\Delta\sigma_m = \frac{p_i d_i}{2 s'} - \frac{\Delta p_e d_e}{2 s'} \quad (I)$$

L'incremento di pressione all'estradosso dell'anello interno Δp_e dipende, oltre che dalla pressione interna e dalle caratteristiche geometriche del complesso, dai moduli di elasticità e dai coefficienti di Poisson dei materiali (calcestruzzo e roccia) e vale:

⁽⁵⁾ Va sottolineato che, durante le prove di messa in servizio della centrale, per oscillazione di massa conseguente a manovre sovrapposte di chiusura e apertura delle macchine fu raggiunta, anche se per pochi istanti, nel pozzo piezometrico la quota 531 circa.

$$E_R \cong 57.000 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$\Delta p_e = 2p_i \frac{1}{k^2 - 1} \frac{(m_c - 1)k^2 + (m_R + 1)}{m_c(k^2 - 1)} + \frac{m_R + 1}{m_R} \cdot \frac{E_c}{E_R} \quad (II)$$

dove:

$$k = \frac{d_e}{d_i}$$

E_c, m_c = modulo di elasticità e coefficiente di Poisson per il calcestruzzo;

E_R, m_R = modulo di elasticità e coefficiente di Poisson per la roccia (6).

Sostituendo nella (I) il valore di $\Delta\sigma_m$ ricavato dalle misure effettuate si ha:

$$\Delta p_e = 1,88 \text{ Kg/cm}^2$$

che introdotto nella (II), supposto $m_R \cong m_c = 5$, fornisce:

$$\frac{E_c}{E_R} = 4,375$$

Essendo $E_c = 250.000 \text{ Kg/cm}^2$, il modulo di elasticità della roccia risulterebbe quindi:

(6) V. ad es. A. KIESER, « Druckstollenbau », Springer Verlag, 1960.

Le variazioni di lunghezza unitarie medie misurate nel tronco di prova durante le successive fasi di riempimento e vuotamento sono riassunte nella tabella in calce.

I valori delle deformazioni rivelano un comportamento elastico della struttura, se si fa eccezione degli allungamenti osservati nel corso del terzo riempimento; va tenuto però presente che per quest'ultimo le letture finali furono effettuate un mese dopo il riempimento della galleria: alle deformazioni elastiche provocate dal ripristino della pressione interna potrebbero pertanto essersi sovrapposte deformazioni dovute ad altre cause.

In effetti già durante il periodo precedente (24 luglio-5 novembre 1963) tutti gli estensimetri segnalavano un generale progressivo allungamento che potrebbe in parte essere attribuito a deformazioni lente sotto carico o al rigonfiamento del calcestruzzo dell'anello interno a contatto con l'acqua. Ben vero buona parte di tale allungamento è stato restituito dalla struttura durante la successiva stagione estiva del 1964, manifestandosi però di nuovo col sopraggiungere dell'inverno. La struttura sembrerebbe cioè risentire di fenomeni stagionali da porre forse in relazione a variazioni di stato nell'ambiente idrogeologico circostante.

I dati fin'ora a disposizione non consentono una valutazione quantitativa di tale oscillazione stagionale e quindi dell'effettiva incidenza del rigonfiamento e delle deformazioni lente; le osservazioni future potranno fornire ulteriori elementi al riguardo. Naturalmente, essendo stata la galleria fin'ora sottoposta a pressioni che non hanno superato la metà di quella massima di esercizio, resta soprattutto da vedere quale sarà il comportamento dell'opera sotto il pieno carico che verrà raggiunto con l'invaso totale del serbatoio del Pertusillo.

Fase	Data lettura iniz.	Data lettura fin.	p_i (alla lettura finale)	$\Delta\varepsilon$
1° riempimento	6.7.1963	19.7.1963	3,7 Kg/cm ²	+ 0,040 × 10 ⁻³
1° vuotamento	19.7.1963	20.7.1963	0 »	- 0,033 × 10 ⁻³
2° riempimento	23.7.1963	24.7.1963	3,8 »	+ 0,030 × 10 ⁻³
2° vuotamento	5.11.1963	9.12.1963	0 »	- 0,031 × 10 ⁻³
3° riempimento	9.12.1963	16.1.1964	3,3 »	+ 0,071 × 10 ⁻³

STRAIN MEASUREMENTS ON A PRESSURE TUNNEL LINED WITH PRESTRESSED IN PLACE CONCRETE

Summary: The intake pressure tunnel of the « Agri » hydroelectric plant was dug through tertiary soils having poor mechanical properties.

Therefore the peculiar « KIESER » way of lining was largely used. It consists of two concentrically arranged concrete rings; the internal one is prestressed in place by cement grouting.

The performance of the lining has been checked by vibrating wire strain gauges set in the concrete.

The results of the measurements are reported and discussed. The data available for two years during which the full storage of the reservoir has been not yet reached makes evident the satisfactory performance of the tunnel.

MESURES DE DÉFORMATIONS DANS UNE GALERIE FORCÉE AVEC LE COFFRAGE EN BÉTON PRÉCONTRAIT SUR PLACE

Sommaire: La galerie de dérivation de l'usine « Agri » a été creusée dans des terrains d'insuffisantes caractéristiques de résistance.

Aussi un coffrage en béton précontraint sur place (dû à Mr. KIESER) a été adopté.

Le comportement de l'oeuvre a été contrôlé avec des extensomètres électro-acoustiques placés dans le béton.

Les résultats des mesures exécutées pendant deux ans sont exposés et analysés.