

Un nuovo procedimento di precompressione

Dopo un cenno sulle attuali possibilità della tecnica della precompressione, con speciale riferimento al problema della precompressione di strutture tubolari cilindriche in conglomerato cementizio, VA. descrive un nuovo procedimento di precompressione nelle sue essenziali caratteristiche statiche e modalità esecutive, pone in rilievo come questo procedimento si presti alla precompressione mediante armature esterne flessibili di strutture di varie forme (lastre piane e curve, volte sottili ecc.) e in particolare di strutture cilindriche circolari e ne mostra alcune applicazioni.

Premesse

L'uomo che primo ha costruito un recipiente stagno, sagomando opportunamente assicelle di legno, giustapponevole tra di loro e tra loro forzandole mediante cerchi atti a bene resistere a sforzi di trazione (e quest'uomo dovremmo cercarlo in tempi ben remoti se dell'arte del bottaio già troviamo cenno in Plinio e in Varrone) ha realizzato una tra le prime strutture precomprese; e assai intelligentemente dal momento che, nel recipiente stesso che si proponeva di fabbricare, otteneva l'organo di messa in tensione dei cerchi, sì che per produrle o ripristinarle in un istante qualsiasi la tenuta gli bastava forzare i cerchi verso la mezzera serrando bene tra di loro le doghe.

Le strutture in stato di coazione elastica, e molte se ne potrebbero enumerare accanto al classico esempio della botte, rimasero per altro di limitata importanza sino alla comparsa di nuovi materiali da costruzione: calcestruzzi di elevata resistenza e acciai ad alto limite elastico. Oggi che la tecnica della precompressione grazie all'abbinamento di tali materiali è divenuta un capitolo importante nell'arte del costruire e che se ne vanno sperimentando le molteplici possibilità, siamo in grado di affermare a ragion veduta che nessun tipo strutturale trae da essa vantaggi tecnici ed economici più rilevanti di quelli che si possono raggiungere precomprimendo strutture cave sottoposte a pressione interna, in particolare strutture cilindriche circolari. Ciò risulta evidente ove si consideri che ci troviamo in presenza di strutture tese circonferenzialmente, e in cui non possiamo per altro ammettere fessurazioni di sorta se non a scapito del loro peculiare requisito: la tenuta. Il non poter ammettere fessurazione significa limitare la tensione di trazione nel calcestruzzo a valori inferiori ai 15 ÷ 20 kg/cm², e conseguentemente la tensione nell'armatura metallica cerchiate a valori dell'ordine di alcune centinaia di kg/cm². Risultano dunque forti spessori di calcestruzzo e pessima utilizzazione dell'acciaio.

Una nuova tecnica si vale sempre nel suo primo periodo evolutivo dei risultati già raggiunti da tecniche analoghe; così è noto come i primi costruttori in cemento armato si ispirarono a quanto si era realizzato nel campo delle costruzioni metalliche.

Ora i costruttori di bocche da fuoco, spinti dalla necessità di produrre pezzi atti a resistere a pressioni interne sempre più elevate senza doverne aumentare eccessivamente il peso, avevano già nel

corso del decennio 1880-1890 messo a punto un procedimento di precompressione mediante avvolgimento sotto tensione di strati multipli di fili di acciaio ad alta resistenza ed il nascere del nuovo procedimento costruttivo era stato accompagnato da studi teorici e sperimentali di notevole interesse⁽¹⁾.

I vantaggi statici ed economici particolarmente evidenti che ne derivavano, il poter disporre, come si è accennato, dei risultati ottenuti in un campo analogo, queste sono le ragioni per cui tra le prime strutture realizzate in conglomerato cementizio precompresso figurano le tubazioni destinate a resistere a una sovrappressione interna. All'inizio del secolo un pioniere del cemento armato, F. von Emperger, deponeva i primi brevetti relativi alla fabbricazione di tubazioni in conglomerato cementizio precompresso mediante avvolgimento sotto tensione su tubi di calcestruzzo stagionato di fili di acciaio ad alto limite elastico.

Da allora, e per una ventina d'anni, la tecnica della precompressione applicata alle strutture in conglomerato cementizio subì un tempo di arresto. I materiali in gioco, acciaio e calcestruzzo, non avevano ancora raggiunto caratteristiche meccaniche sufficientemente elevate, e quest'ultimo era ancora troppo poco noto nella sua complessa meccanica interna, (ritiro, deformazioni plastiche, fluimento) per cui non erano mancati insuccessi che avevano scoraggiato tecnici e ricercatori a proseguire su una via che doveva in seguito dimostrarsi feconda di risultati.

Il decennio che va dal 1920 al 1930 vide un alto pioniere del cemento armato, Eugenio Freyssinet, riprendere alla base con idee nuove, con un bagaglio di conoscenze sperimentali ormai ricco, e soprattutto con una prestigiosa genialità inventiva, il problema della precompressione delle strutture in conglomerato cementizio e dotarlo rapidamente di una tecnica perfezionata. Lo stesso Freyssinet diede al problema della precompressione delle strutture tubolari una serie di soluzioni ingegnose, di cui alcune atte alla precompressione di grandi strutture cilindriche costruite in opera, quali i serbatoi.

Egli fu anche il primo ad abbinare alla precompressione radiale quella longitudinale delle

⁽¹⁾ Si diede allora in Italia un contributo importante a tali studi specialmente per opera di Antonio Clavarino, allora maggiore nell'arma di Artiglieria.

strutture tubolari. Fu questo un perfezionamento importante introdotto nel campo delle tubazioni in calcestruzzo precompresso; infatti la totale mancanza di precompressione longitudinale dà luogo a strutture male proporzionate, atte a ben resistere agli sforzi circonferenziali determinati dalla pressione interna, ma facilmente lesionabili nei piani normali al loro asse per la presenza di sforzi longitudinali originati, in particolari condizioni di vincolo, oltre che da variazioni termiche e da forze esterne, dalla stessa pressione agente sulla parete interna dei tubi⁽²⁾.

I vari procedimenti brevettati da Freyssinet si differenziano nelle modalità di messa in tensione delle armature cerchianti mentre la precompressione longitudinale è sempre ottenuta mediante armature longitudinali indipendenti, agenti sul calcestruzzo per aderenza o a mezzo di ancoraggi di estremità.

Accanto ai brevetti Freyssinet, in questi ultimi venti anni furono depositati in gran numero brevetti di varia nazionalità, relativi alla precompressione di strutture cilindriche cave; detti brevetti consistono per lo più in perfezionamenti al metodo utilizzato da von Emperger o si basano sulla messa in tensione delle armature cerchianti grazie ad uno spostamento centrifugo ed al successivo bloccaggio delle armature stesse. In tutti questi brevetti, per quanto mi consta, o non è prevista precompressione longitudinale di sorta o essa viene ancora realizzata mediante armature longitudinali indipendenti dalle armature cerchianti.

Abbiamo ritenuto interessante fare questa breve scorsa nel campo relativo alla precompressione delle strutture tubolari in specie, per meglio chiarire in qual modo e con quali prospettive di applicazioni venga in esso ad inserirsi un nuovo proce-

⁽²⁾ Ci sembra opportuno chiarire questo concetto e porre in rilievo un fenomeno spesso trascurato.

Quando si precomprime radialmente una struttura tubolare si determina in essa per effetto Poisson un allungamento elastico.

Chiamiamo:

- r_i il raggio interno del tubo
- r_e il raggio esterno
- p_e la pressione ideale esterna di precompressione
- p_i la pressione interna di esercizio
- σ_r la tensione normale radiale
- σ_t la tensione normale tangenziale
- σ_z la tensione normale longitudinale
- E il modulo di elasticità normale della struttura tubolare
- $\frac{1}{m}$ il coefficiente di Poisson
- ϵ_z la dilatazione longitudinale

La somma $(\sigma_r + \sigma_t)$ è indipendente dal raggio e per una pressione di precompressione p_e si ha in ogni punto:

$$\sigma_r + \sigma_t = 2 \frac{p_e \cdot r_e^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

ne deriva un allungamento unitario longitudinale:

$$\epsilon'_z = \frac{2}{E \cdot m} \cdot \frac{p_e \cdot r_e^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

dimento di precompressione oggetto di un brevetto depositato nell'anno 1949.

Secondo questo procedimento si realizza con la stessa armatura la precompressione radiale e longitudinale di strutture tubolari di dimensioni qualsiasi e più generalmente è possibile risolvere la maggior parte dei problemi di precompressione di strutture dalle più varie forme e dimensioni (lastre piane e curve, volte sottili, serbatoi sferici ecc).

Descrizione del procedimento

Nella sua fisionomia più generale il procedimento di precompressione sopra citato consiste nel disporre l'armatura metallica, per lo più un filo o una fune di acciaio, secondo un andamento e una posizione prossimi a quelli per essi previsti ad operazione di pretensione avvenuta, e, dopo averla opportunamente vincolata, nell'agire in determinati punti con forze esterne normali o quasi all'andamento dell'armatura in quei punti, in modo da ottenere un predeterminato allungamento dell'asse medio dell'armatura stessa. Detto allungamento dovrà essere di entità tale da dar luogo alla pretensione che si vuole realizzare nell'armatura. A questo punto le forze esterne che hanno servito alla messa in tensione dell'armatura potranno essere sostituite da opportuni vincoli permanenti interni od esterni. Chiamiamo qui vincoli interni quelli che fissano tra di loro punti diversi dell'armatura, vincoli esterni quelli che ne fissano determinati punti ad altri esterni ad essa. Questi punti esterni potranno appartenere alla struttura di calcestruzzo da precomprimere, ovvero a un banco di messa in tensione, a seconda che la messa in tensione dell'armatura venga eseguita a indurimento avvenuto del calcestruzzo o prima del getto del medesimo.

Ci limiteremo qui al caso in cui la messa in

Analogamente all'atto della messa in pressione interna p_i della condotta si determina un accorciamento unitario longitudinale ϵ''_z . Detto accorciamento supponendo, in prima approssimazione, che la p_e resti costante, è dato da:

$$\epsilon''_z = - \frac{2}{E \cdot m} \cdot \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

Se, come spesso avviene, questo accorciamento risulta impedito da azioni di vincolo longitudinali prende origine nella struttura tubolare una tensione di trazione longitudinale:

$$\sigma_z = - \frac{2}{m} \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

Allo scopo di renderci conto dell'entità di questa tensione, avendo assunto $m=7$, valore normalmente usato per il calcestruzzo, ammessa nel calcestruzzo una precompressione tangenziale di 100 Kg/cm², e supposto che lo spessore della parete sia di $\frac{1}{10}$ del raggio ($\frac{r_e - r_i}{r_i} = \frac{1}{10}$), se la pressione interna è tale da decomprimere totalmente la parete, si determina nel tubo vincolato longitudinalmente una tensione di trazione di circa 14 Kg/cm².

Questa tensione di trazione, venendosi a sommare a tensioni longitudinali di egual segno derivanti da variazioni termiche, o da sforzi di flessione longitudinale, può dar luogo a lesioni trasversali.

Di qui deriva in determinati casi l'interesse di una, sia pur limitata, precompressione longitudinale delle condotte.

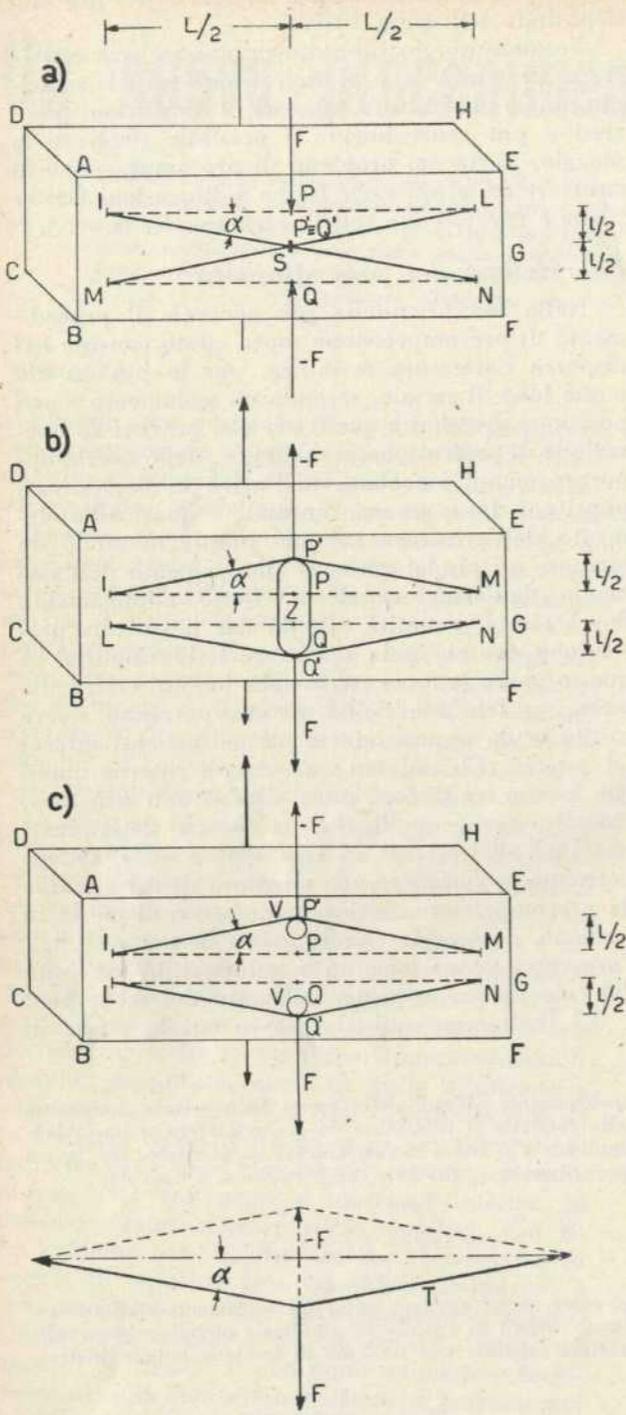


Fig. 1.

tensione dell'armatura viene eseguita su di un corpo in calcestruzzo già indurito, chiarendo questi concetti con un esempio molto elementare.

Si voglia realizzare una certa precompressione longitudinale in un prisma di calcestruzzo AH (fig. 1), per questo potremo valerci di 4 elementi di armatura metallica disposti sulle facce ABEF e CDGH. Per simmetria basterà esaminare quanto avviene sulla faccia CDGH, dove gli elementi di armatura saranno inizialmente disposti secondo i segmenti IL, MN e vincolati in detti punti al calcestruzzo. Per realizzare la messa in tensione delle

armature e di conseguenza la precompressione del prisma di calcestruzzo si applicano nei punti centrali delle armature P e Q due forze eguali e contrarie F, -F normali alle armature stesse e tali da realizzare uno spostamento dei punti P e Q in P', Q' e di conseguenza un allungamento dei segmenti di armatura IL, MN corrispondente alla tensione che in esse vogliamo realizzare.

Se chiamiamo s_f questa tensione; E il modulo di elasticità; $\frac{L}{2}$ la semilunghezza iniziale dei segmenti di armatura IL, MN; $\frac{1}{2}$ gli spostamenti dei punti P e Q sotto l'effetto delle forze F, -F; e la deviazione angolare dell'armatura, potremo scrivere:

$$(1) \quad \cos \alpha = \frac{1}{\frac{\sigma_f}{E} + 1}$$

od anche

$$(2) \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{L} = \left[\left(\frac{\sigma_f}{E} + 1 \right)^2 - 1 \right]^{1/2}$$

Da queste formule è agevole ricavare i valori degli spostamenti che l'armatura deve subire onde realizzare la tensione s_f . Dato che il valore del modulo di elasticità potrà, a seconda del tipo di armatura impiegata, variare da 21.000 kg/mm² (filo di acciaio) a valori minimi dell'ordine di 13.000 kg/mm² (ove si adottino determinati tipi di funi di acciaio) converrà nella progettazione disporre di diagrammi che consentano la rapida determinazione dell'angolo α in funzione del rapporto $\frac{\sigma_f}{E}$, del tipo di quello riportato in fig. 2, che vale per il campo $80 \leq \sigma_f \leq 160$ kg/mm² ed $10.000 \leq E \leq 21.000$ kg/mm².

La permanenza dello stato di tensione nell'armatura sarà assicurata, come si è detto, mediante vincoli interni od esterni di varia natura. Così, riferendoci alla figura 1a), una volta realizzato l'avvicinamento dei fili a mezzo delle forze F, -F, si vincoleranno tra loro i fili (vincolo interno) nei punti P' = Q' mediante un legame S; dopo di che

Fig. 2.

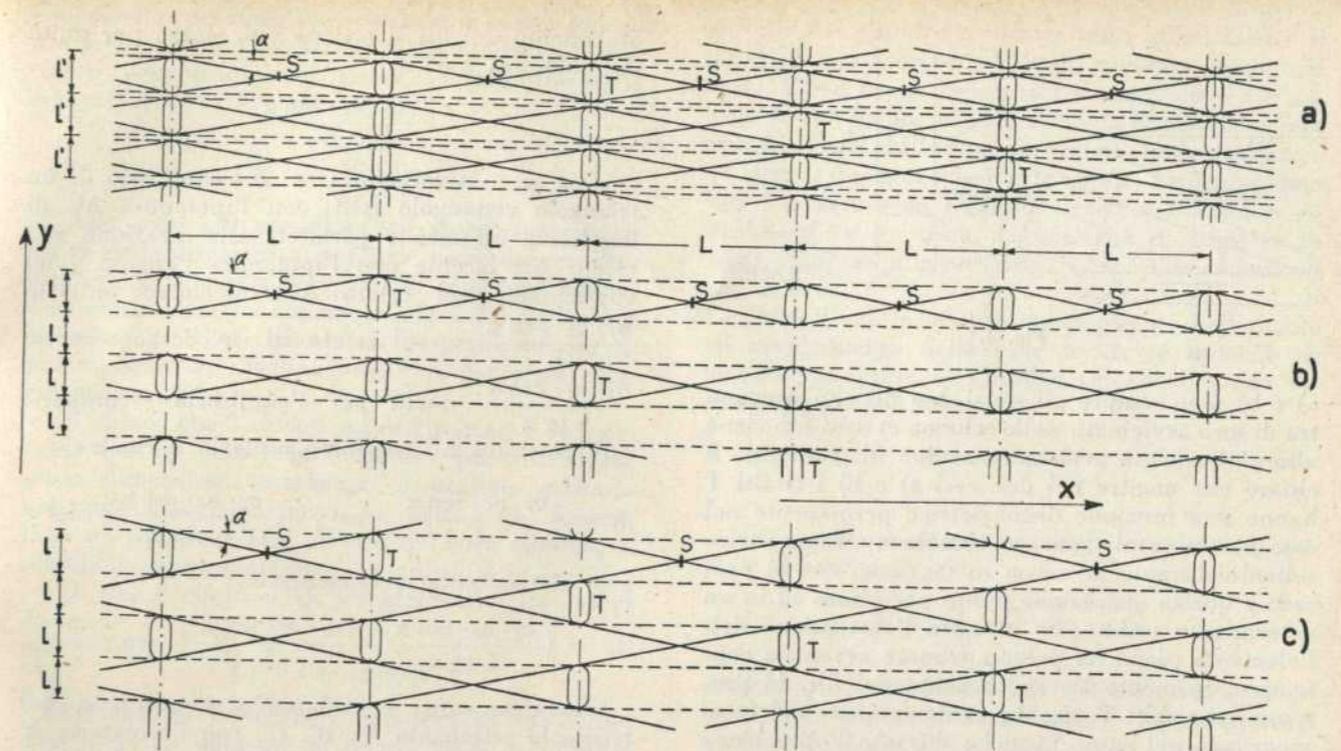
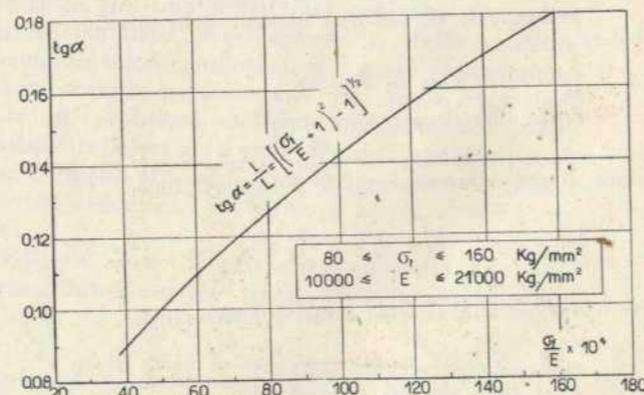


Fig. 3.

si potrà procedere all'allontanamento delle forze esterne F, -F.

Le figure 1b) e 1c) non sono che varianti della figura 1a). In fig. 1b) si è rappresentata la messa in tensione dei fili per mutuo allontanamento e il loro bloccaggio per inserimento di un corpo Z avente funzione di distanziatore permanente.

In fig. 1c) i fili, realizzato il voluto allontanamento dei punti P, Q, vengono fissati in P', Q' al calcestruzzo mediante vincoli esterni V.

Chiamando a_f la sezione metallica di un elemento di armatura e $T = s_f \cdot a_f$ la forza che in esso si vuole realizzare sarà necessario disporre di una forza operante $F = 2 \operatorname{sen} \alpha T$.

Nel caso che si tratti di un filo di acciaio ($E = 21.000$ kg/mm²) e che si voglia realizzare una tensione unitaria s_f di 100 kg/mm², si avrà dalla (2) $\operatorname{tg} \alpha = 0,0977$, $\alpha = 5^\circ,35'$, $2 \operatorname{sen} \alpha = 0,1945$; basterà dunque disporre di una forza F dell'ordine di $\frac{1}{5}$ di quella T che si vuole realizzare nell'armatura.

Da questi semplici schemi di messa in tensione, e in particolare da quello rappresentato in fig. 1a), derivano schemi più complessi che consentono la precompressione di corpi di qualsiasi dimensione e di forme diverse, in special modo di strutture tubolari cilindriche a sezione circolare.

Immaginiamo, ad esempio, di voler realizzare su di un elemento piano di dimensioni qualsiasi uno sforzo di precompressione di intensità f_x per unità di lunghezza, e di direzione x, utilizzando per questo fili metallici di sezione a_f ed atti a sopportare una pretensione s_f . Si potranno allora disporre detti fili parallelamente alla direzione di precompressione x, e ad opportuna distanza reci-

proca secondo uno degli schemi riportati a scopo di esempio in fig. 3.

È chiaro che, per quanto riguarda la disposizione originaria (linee a tratteggio) dell'armatura detti schemi si differenziano solo per il fatto che in fig. 3a) i fili sono abbinati, mentre in fig. 3b) e 3c) essi risultano disposti singolarmente.

Se α è la deviazione angolare che occorre far subire ai fili onde realizzare in essi la tensione s_f , lo sforzo unitario di precompressione f_x sarà ottenuto, come facilmente si deduce dalle figure, prevedendo tra i fili una mutua distanza:

$$l = \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{f_x} = \frac{\sigma_f \cdot a_f}{f_x \left(1 + \frac{\sigma_f}{E} \right)}$$

nei casi b) e c); mentre nel caso a) la distanza l' tra una copia e l'altra di fili dovrà essere evidentemente:

$$l' = \frac{2 \sigma_f \cdot a_f}{f_x \left(1 + \frac{\sigma_f}{E} \right)}$$

In fig. 3 sono rappresentati in T dei risalti presenti sulla superficie del piano da precomprimere a distanza reciproca $L = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha}$ secondo la direzione x

ed aventi la funzione di distanziatori tra i vari fili.

La messa in tensione viene realizzata avvicinando tra di loro i punti di due fili contigui equidistanti dagli allineamenti dei risalti che chiameremo, per ovvia ragione, allineamenti dei punti fissi, e vincolando poi permanentemente detti fili a mezzo di mutui legami S. Mentre negli schemi

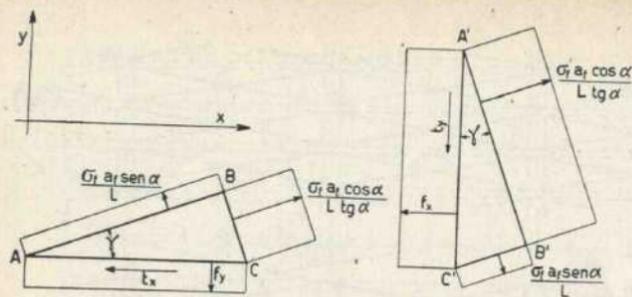


Fig. 4.

a) e b) sono sempre gli stessi due fili che vengono, tra di loro avvicinati, nello schema c) ogni filo viene, alternativamente avvicinato ai due fili contigui. È chiaro che mentre nei due casi a) e b) i risalti T hanno una funzione distanziatrice permanente nel caso c) essi esplicano una funzione distanziatrice soltanto durante la messa in tensione, ove si proceda a questa operazione punto per punto ed in un determinato ordine. Se in tutta l'estensione dell'elemento piano da precomprimere avvenisse contemporaneamente l'avvicinamento dei fili, la presenza dei risalti T sarebbe evidentemente del tutto superflua, pel caso c), anche durante l'operazione di messa in tensione.

Dal punto di vista statico pure, lo schema c) differisce sensibilmente dai primi due; infatti in esso l'armatura metallica determina uno sforzo unitario di precompressione f_y anche nella direzione y normale alla primitiva direzione dei fili, mentre negli schemi a) e b) le componenti secondo y della tensione dei fili vengono equilibrate da equivalenti reazioni sviluppate dai risalti T.

Adottando i simboli già utilizzati, la tensione f_y vale, pel caso c):

$$f_y = \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L}$$

dove L è come si disse la distanza tra due allineamenti contigui di punti fissi.

È dunque evidente che, fissata la f_x , risulterà fissata di conseguenza la f_y , dovendo essere:

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{L} = \operatorname{tg}^2 \alpha.$$

È per altro possibile, sempre mantenendo lo schema generale di pretensione rappresentato in fig. 3c), realizzare valori qualsiasi di f_x e f_y , mediante un semplice artificio che consiste nel fare ruotare di un opportuno angolo γ il sistema delle armature rispetto alle direzioni x, y. Ciò si otterrà in pratica disponendo i fili nella loro posizione iniziale non più parallelamente alla direzione x, ma secondo una direzione inclinata dell'angolo γ rispetto ad x.

Si è visto infatti che secondo la direzione dei fili si ottiene uno sforzo per unità di lunghezza pari a:

$$\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

mentre secondo la direzione normale al primitivo

andamento dei fili si ottiene uno sforzo per unità di lunghezza pari a:

$$\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L}$$

Ora se consideriamo (fig. 4) l'equilibrio di un triangolo rettangolo ABC con l'ipotenusa AC di lunghezza unitaria e parallela alla direzione x e cateto AB facente con l'ipotenusa l'angolo γ ed applichiamo sul cateto AB lo sforzo unitario

$$\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L}$$

e, sul cateto BC lo sforzo unitario

$$\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \operatorname{tg} \alpha}$$

dovrà per l'equilibrio svilupparsi sull'ipotenusa AC lo sforzo unitario normale:

$$|f_y| = \left| \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L} \cdot \cos^2 \gamma + \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot \sin^2 \gamma \right|$$

e lo sforzo unitario tangenziale:

$$|t_x| = \left| \left(\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \operatorname{tg} \alpha} - \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L} \right) \cdot \sin \gamma \cos \gamma \right|$$

Analogamente, considerando l'equilibrio del triangolo rettangolo A'B'C, con l'ipotenusa A'C di lunghezza unitaria e parallela alla direzione V e cateto A'B' inclinato sull'ipotenusa dell'angolo γ , applicando sul cateto A'B' lo sforzo unitario:

$$\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \operatorname{tg} \alpha}$$

e sul cateto B'C lo sforzo unitario:

$$\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L}$$

dovrà per l'equilibrio agire sull'ipotenusa A'C lo sforzo unitario normale:

$$|f_x| = \left| \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \operatorname{tg} \alpha} \cos^2 \gamma + \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L} \sin^2 \gamma \right|$$

e lo sforzo tangenziale unitario:

$$|t_y| = |t_x| = \left| \left(\frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \cos \alpha}{L \operatorname{tg} \alpha} - \frac{\sigma_f \cdot a_f \cdot \sin \alpha}{L} \right) \sin \gamma \cos \gamma \right|$$

da ciò si deduce che, ove si voglia realizzare nel piano un sistema di sforzi unitari f_x , f_y tali che:

$$\frac{f_x}{f_y} = K$$

occorrerà sia verificata la seguente relazione:

$$\frac{\cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \cos^2 \gamma + \sin \alpha \cdot \sin^2 \gamma = K \left(\sin \alpha \cos^2 \gamma + \frac{\cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \sin^2 \gamma \right)$$

da cui si ricava:

$$(3) \quad \operatorname{tg}^2 \gamma = \frac{\operatorname{cotg} \alpha - K \operatorname{tg} \alpha}{K \operatorname{cotg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha} = \frac{1 - \sin^2 \alpha (K+1)}{K - \sin^2 \alpha (K+1)}$$

Tenendo presente che il valore di $\sin^2 \alpha$ è sempre molto piccolo l'espressione (3) potrà con sufficiente approssimazione essere semplificata nella seguente:

$$\operatorname{tg} \gamma = \sqrt{\frac{1}{K}}$$

Allo scopo di annullare gli sforzi tangenziali t_x , t_y nelle direzioni x, y potrà essere conveniente disporre di due sistemi eguali di armature convenientemente proporzionare in cui i fili nelle loro posizioni primitive presentino rispetto all'asse x, per un sistema, l'inclinazione γ e, per altro, l'inclinazione $180^\circ - \gamma$.

È chiaro che i calcoli sopra riportati e le relazioni che ne conseguono valgono per fili ideali, senza dimensioni, mantenuti a perfetto contatto nei punti d'avvicinamento. In realtà i fili, presentano un diametro D e all'atto del loro rilascio, si allontanano leggermente di quantità d.

Il passo effettivo di avvolgimento l_{eff} varrà dunque:

$$l_{\text{eff}} = l + D + d.$$

Pertanto si dovrebbero rivedere in tal senso, cosa priva di interesse in questa sede, le formule sopra riportate.

Passando ora dal problema piano al problema della precompressione dei corpi cilindrici, potremo ad esso estendere con buona approssimazione la maggior parte dei risultati già esposti, sempre che il numero di allineamenti di punti fissi risulti sufficientemente elevato, di modo che l'effetto della curvatura diventi praticamente trascurabile, per quanto riguarda la messa in tensione dei singoli tratti di armatura.

Ove sia sufficiente disporre di una componente longitudinale assai modesta, la precompressione di corpi cilindrici può essere realizzata valendosi di un'armatura metallica costituita da un unico filo (o fune) di acciaio di conveniente sezione, avvolto inizialmente sul cilindro secondo un'elica di passo l opportunamente determinato.

In tal caso, immaginando la superficie esterna del cilindro sviluppata su di un piano xy in modo che le generatrici risultino parallele all'asse y, l'unica differenza tra lo schema di armatura sviluppata che ne risulta e quello rappresentato in fig. 3c) sta nel fatto che i fili nella loro posizione iniziale, anziché incontrare gli allineamenti dei punti fissi secondo degli angoli retti, li incontrano secondo degli angoli complementari all'angolo di avvolgimento, del resto sempre molto piccolo.

La messa in tensione dell'armatura viene ancora realizzata secondo lo schema rappresentato in figura 3c).

Abbiamo già rilevato, parlando di questo schema di messa in tensione, come in tal caso i risalti T non abbiano che una funzione temporanea, limitata all'operazione di messa in tensione dei fili. Pertanto detti risalti potranno essere sostituiti da dei distanziatori provvisori da collocarsi secondo gli allineamenti dei punti fissi.

Si tratta dunque di suddividere la superficie

esterna del cilindro mediante tanti allineamenti di punti fissi tra loro equidistanti e comprendenti un arco di cerchio di sviluppo $L = l/\operatorname{tg} \alpha$, dove l è ancora la deviazione angolare media che occorre fare subire al filo o alla fune di acciaio, onde realizzare in essa la tensione desiderata σ_f . È evidente, dato che l'armatura in tensione deve regolarmente richiudersi su se stessa, la necessità di adottare in ogni caso un numero dispari di allineamenti di punti fissi.

Dato il valore sempre molto piccolo dell'angolo di avvolgimento della fune lo sforzo unitario di trazione tangente al cilindro vale ancora con ottima approssimazione:

$$\frac{\sigma_f \cdot \alpha_f \cdot \cos \alpha}{l}$$

La pressione esterna ideale di precompressione p_e è dunque:

$$p_e = \frac{1}{r_e} \cdot \frac{\sigma_f \cdot \alpha_f \cdot \cos \alpha}{l}$$

essendo r_e il raggio esterno della struttura tubolare. Nota p_e , si effettua secondo i procedimenti classici (formule di Lamé) la verifica statica della struttura tubolare, tenuto conto delle diminuzioni di p_e dal valore sopra calcolato a un valore residuo p_e' a causa del raccorciamento elastico del raggio del tubo, del ritiro e del fluimento del calcestruzzo nonché del fluimento del filo o della fune di acciaio. Si deve altresì tenere conto, ove si proceda alla verifica statica per le condizioni di esercizio, che passando nell'interno del tubo da una pressione effettiva nulla ad una pressione p_i , la pressione ideale esterna residua p_e' passa a un nuovo valore $p_e'' = \beta \cdot p_e'$, dove β è un valore maggiore di 1 facilmente calcolabile imponendo che l'aumento di diametro del tubo sia eguale all'aumento di diametro dell'armatura.

Chiamando r_i il raggio interno della struttura tubolare

E_c il modulo di elasticità normale del calcestruzzo

$\nu_c = \frac{1}{m_c}$ il coefficiente di Poisson

E il modulo di elasticità dell'armatura metallica

e conservando agli altri simboli i significati già visti, si perviene alla seguente espressione di β :

$$\beta = 1 + \frac{2 p_i r_i^2 \frac{\alpha_f \cdot \cos \alpha}{l} \cdot \frac{E}{E_c}}{p_e' \left[r_i^2 \left[r_i + \frac{\operatorname{arccos} \alpha_f E (1 - \nu_c)}{l E_c} \right] - r_i^2 \left[r_i - \frac{\operatorname{arccos} \alpha_f E (1 + \nu_c)}{l E_c} \right] \right]}$$

Valendosi di questa espressione si procede alla verifica della struttura per le varie condizioni di esercizio e in particolare al calcolo della pressione idrostatica interna che determina la totale decompressione della fibra interna del tubo e che generalmente dovrebbe corrispondere alla pressione di collaudo.

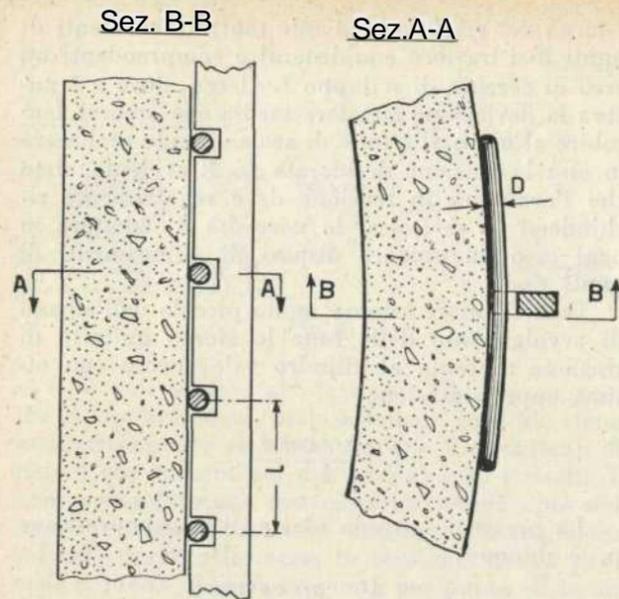


Fig. 5.

Definito così il problema statico e geometrico, prospettiamo brevemente i modi di esecuzione.

Quali distanziatori provvisori, destinati come si è visto a vincolare determinati punti dell'armatura durante l'operazione di messa in tensione, potranno essere convenientemente usati dei profilati di acciaio (fig. 5) muniti di incavi a distanza eguale al passo di avvolgimento l dell'armatura ed atti ad alloggiare l'armatura stessa. Questi profilati, ove si tratti di costruzioni in serie, potranno, senza sensibile aggravio economico, essere in numero pari a quello degli allineamenti dei punti fissi.

È chiaro per altro che i profilati distanziatori strettamente necessari a qualsiasi operazione di precompressione sono almeno tre. Infatti (fig. 6) disponendo di tre profilati distanziatori A, B, C, sarà possibile realizzare la messa in tensione e il bloccaggio di tutti i tratti di armatura compresi tra il distanziatore A e il distanziatore C. Dopo di che il distanziatore B non ha più alcuna funzione statica e può quindi venire spostato nella posizione B'; si potrà allora procedere alla messa in tensione dei tratti di armatura compresi tra C e B' per poi spostare il profilato C in C', il B' in B'', e così via eseguendo la messa in tensione dei singoli campi successivi sino a ritornare in A a giro ultimato. In realtà, anche ove si tratti di opere singole,

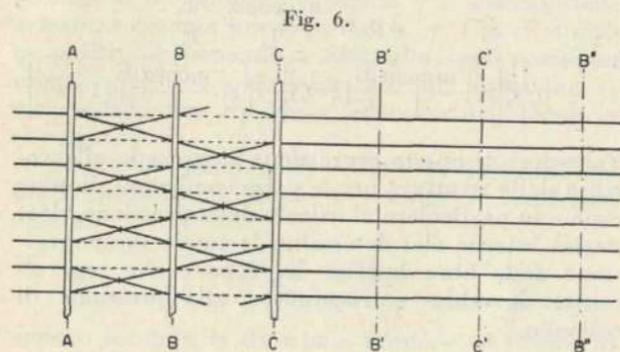


Fig. 6.

per esempio di serbatoi cilindrici, converrà per diverse ragioni disporre di almeno due o tre gruppi di tre distanziatori, il che consente di iniziare l'operazione di precompressione da due o tre punti, alla distanza angolare reciproca di 180° o di 120° .

L'operazione di avvicinamento dei punti delle armature equidistanti da due profilati distanziatori contigui potrà, a seconda delle dimensioni delle

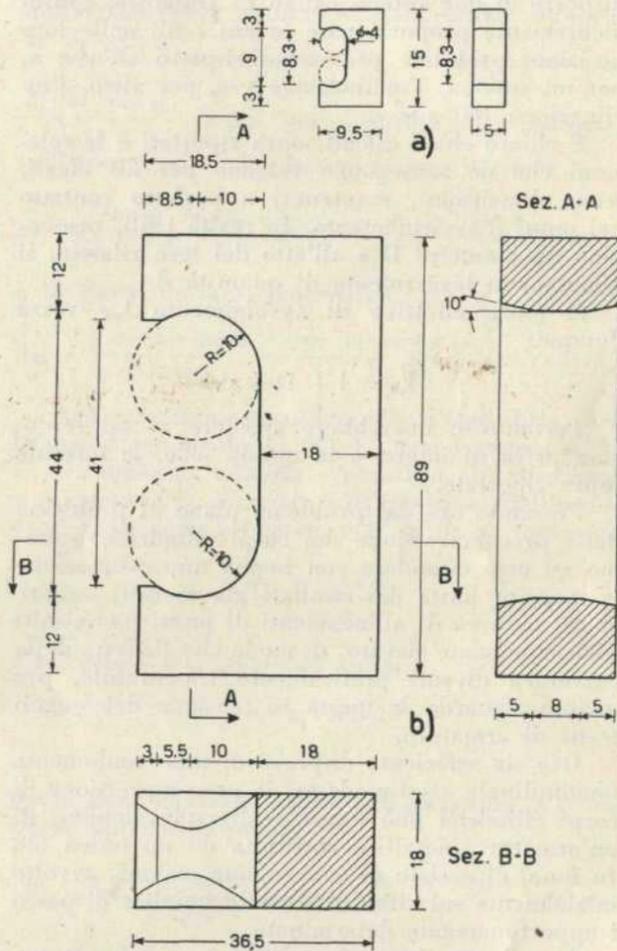


Fig. 7. - Tipi di graffe: a) in lamiera tranciata; b) in acciaio fucinato.

armature stesse, essere realizzata con strumenti di tipi diversi.

Ove si tratti di armature di piccola sezione metallica, per esempio fili di acciaio di 3, 4, 5 mm. di diametro, potranno anche essere usate delle apposite pinze a quattro snodi e a grande fattore di demoltiplicazione azionate a mano, potendosi allora ridurre lo sforzo a valori massimi dell'ordine di 15 kg. Più convenientemente potranno in tal caso adottarsi delle pinze azionate ad aria compressa, realizzando una maggiore rapidità di esecuzione.

Ove occorran sezioni metalliche maggiori, i fili per difetto di flessibilità e di resistenza unitaria non sono più utilizzabili e conviene passare all'impiego di funi di acciaio, per esempio di funi di tipo spiroidale. In tal caso si potranno utilizzare, a se-

conda dell'entità degli sforzi in gioco, morse ad aria compressa o azionate da martinetti ad olio, che avremo in seguito occasione di illustrare.

Realizzato l'avvicinamento dei fili o delle funi metalliche, sino ad averli portati a contatto, si procede al loro bloccaggio. Tra i vari sistemi di bloccaggio sperimentati, quello che si è dimostrato sotto vari aspetti più vantaggioso consiste in cavalletti o graffe di acciaio, che vengono disposti in modo da abbracciare i due fili; allentando la stretta della morsa, si riporta su queste graffe lo sforzo di mutuo allontanamento dei fili. Ove si tratti di armature di piccolo diametro, dette graffe potranno essere ottenute per tranciatura di lamiera di acciaio di caratteristiche e di spessore opportuni (fig. 7a); al di là di certe dimensioni (6-7 mm. di diametro) esse vengono ottenute per fucinatura in appositi stampi (fig. 7b).

Prima di procedere all'operazione di messa in tensione, le estremità del filo o della fune di acciaio vengono fissate alla parete del tubo mediante appositi ancoraggi. Nel caso di armature di piccolo diametro l'ancoraggio più economico viene realizzato passando con un certo numero di giri morti sull'estremità dell'armatura ripiegata ad uncino (fig. 8).

Un tale tipo di ancoraggio di grande semplicità presenta ottime garanzie, ove si pensi che, ammesso tra acciaio e calcestruzzo un coefficiente di attrito molto prudenziale di 0,25, al terzo giro morto la tensione nel filo risulta già ridotta a meno di $\frac{1}{100}$ della tensione iniziale.

Nel caso di armature di medio o grande diametro, un tale tipo di ancoraggio cessa di essere economico e conviene allora ricorrere ad ancoraggi saldati od a ancoraggi a cunei o a morsetti fissati alla parete del cilindro e ripetuti ad intervalli opportuni per un numero di volte tale da realizzare una buona distribuzione degli sforzi di ancoraggio sulla parete.

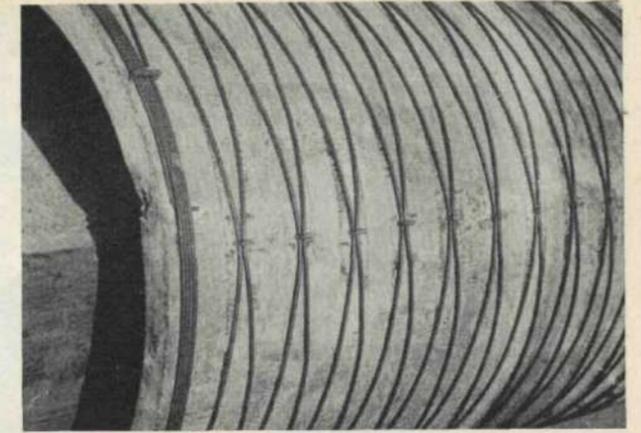
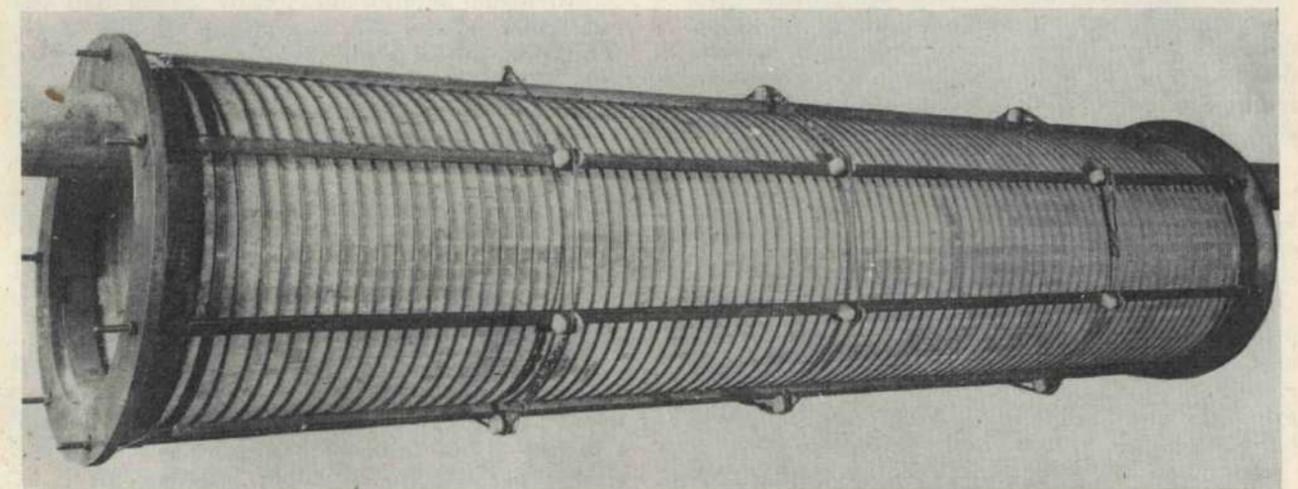


Fig. 8. - Tubazione in calcestruzzo centrifugato precompresso ($\varnothing_i=590$ mm, sp.=30 mm) - Particolare dell'autoancoraggio di estremità del filo di acciaio.

Quando la precompressione longitudinale realizzabile col tipo di armatura sin qui descritto (elica semplice), non sia sufficiente, quest'ultima potrà essere sostituita da un'armatura originariamente costituita da tanti fili o funi avvolgentisi sul cilindro secondo eliche a grande passo. Quest'armatura sarà ancora messa in tensione valendosi di organi distanziatori possibilmente snodati ad andamento normale al primitivo andamento dei fili. L'angolo d'avvolgimento di questi fili corrisponde all'angolo γ che compare nell'espressione (3) riferentesi al problema piano.

È chiaro pertanto che basta fare variare questo angolo per ottenere il valore desiderato del rapporto tra precompressione radiale e precompressione longitudinale. Allo scopo di ridurre gli sforzi secondari determinati da un tale tipo di armatura, può essere conveniente disporre di una seconda armatura eguale alla precedente, ma avvolgentesi sul cilindro in senso contrario.

Fig. 9. - Tubazione in calcestruzzo centrifugato precompresso ($\varnothing_i=590$ mm, sp.=30 mm, L=6.00 m) dopo l'avvolgimento del filo di acciaio e la messa in opera dei profilati distanziatori.



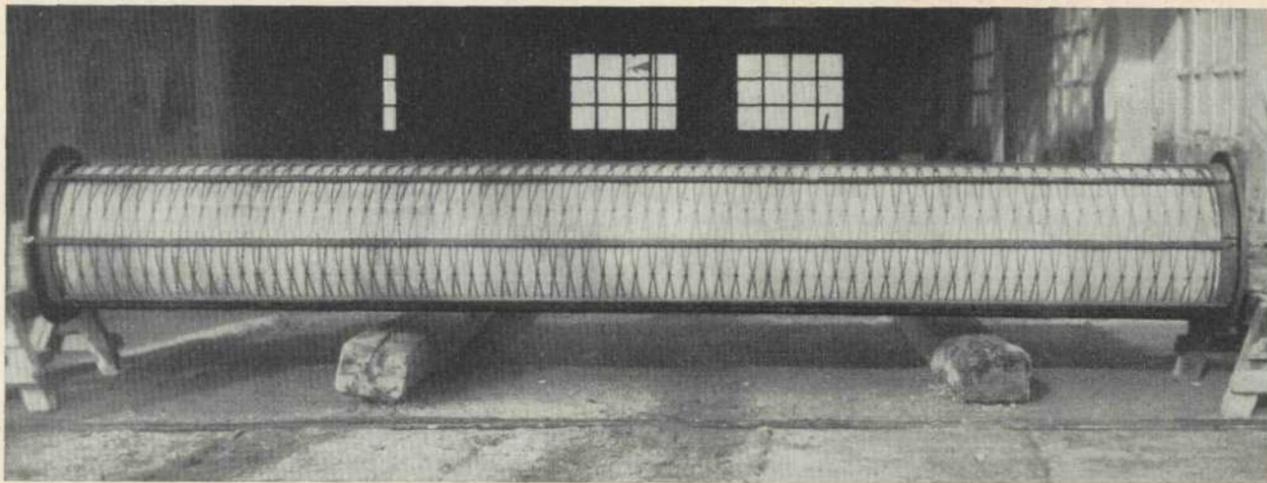


Fig. 10. - Tubazione in calcestruzzo centrifugato precompresso ($\text{Ø}_i = 590 \text{ mm}$, $\text{sp.} = 30 \text{ mm}$, $L = 6.00 \text{ m}$) dopo la messa in tensione del filo di acciaio, prima della rimozione dei profilati distanziatori.

Applicazioni

Tubazioni in calcestruzzo centrifugato precompresso.

Le fotografie 8-11 illustrano diverse fasi dell'operazione di precompressione di una tubazione in calcestruzzo.

Si tratta di una tubazione di 590 mm. di diametro interno, con parete di 30 mm. di spessore, leggermente armata mediante una gabbietta costituita da 8 generatrici in ferro dolce di 4 mm. di diametro e da un'elica di 3 mm. di diametro con passo di 25 cm.

Detta tubazione viene fabbricata per centrifugazione con calcestruzzo dosato a 400 kg/m^3 di cemento tipo 680 e dopo una maturazione di 20 giorni, di cui i primi 10 in acqua, si procede alla sua precompressione. A questo scopo si utilizza un filo di acciaio di 4 mm. di diametro ad alto tenore di carbonio con carico di rottura di 155 kg/mm^2 . Sono previsti 7 allineamenti di punti fissi. Si è assunta quale tensione iniziale da realizzare nel filo di acciaio 110 kg/mm^2 : ne consegue un valore dell'angolo α di $5^\circ 50'$ e un passo teorico nell'elica di avvolgimento di 30 mm. Il passo effettivo risulta di 35,5 mm. e l'angolo di avvolgimento di circa 1° .

A causa della deformazione elastica del tubo, del ritiro e del fluimento del calcestruzzo, nonché del fluimento dell'acciaio, si calcola una caduta di tensione nell'acciaio di 15 kg/mm^2 , per cui la tensione finale scende a 95 kg/mm^2 .

A detta tensione corrisponde un tasso di precompressione media finale nel calcestruzzo di 111 kg/cm^2 . La pressione interna al tubo che determina la decompressione media totale del calcestruzzo è di 11,3 atm.

La fotografia 9 rappresenta un tubo coi relativi profilati distanziatori prima dell'operazione di messa in tensione dell'armatura. La fotografia 10 rappresenta un tubo a precompressione avvenuta, prima che si proceda all'allontanamento dei profilati distanziatori.

Un particolare della stessa tubazione, una volta

allontanati i profilati distanziatori, compare in fotografia 8. In questa fotografia sono visibili un ancoraggio terminale e le graffe di bloccaggio dei fili in lamiera tranciata del tipo illustrato in fig. 7a).

Tubazioni di questo tipo sono state sottoposte a una severa sperimentazione allo scopo di controllare i risultati del calcolo.

Dette prove hanno dimostrato che sino a 10,5 atm. le tubazioni sono perfettamente stagne. Salendo a 11,5 atmosfere e protrando a lungo la prova, si constata un lieve trasudamento. A 14 atm. si sono prodotte le prime fessurazioni della tubazione ad andamento longitudinale con fuoriuscita di acqua in pressione. È bastato scendere alla pressione di 9,5 atm. perchè la tubazione tornasse perfettamente stagna. Le prove anzidette sono state effettuate prima del rivestimento protettivo dell'armatura a mezzo di calcestruzzo vibrato di 1,5 cm. di spessore. In una seconda serie di prove condotte su tubazioni rivestite si è constatato il trasudamento a una pressione di 12 atm. e la fessurazione alla pressione di 15 atm.

Condotte forzate di grande diametro.

Riteniamo interessante fornire alcuni dati caratteristici relativi alla costruzione ed alla sperimentazione di un elemento di condotta forzata di grande diametro realizzato recentemente presso lo stabilimento di Livorno della Società Tubi Bonna, e destinato alla costruzione di una condotta forzata in roccia, con roccia collaborante.

Le fotografie 11-18 ne rappresentano le varie fasi di lavorazione. Si tratta di una tubazione di 2700 mm. di diametro interno, calcolata per resistere a una pressione di 30 atm. La parete della condotta presenta esternamente una lamiera di acciaio saldata dello spessore di 2 mm. Per le particolari condizioni di posa in opera della condotta (intasamento di calcestruzzo contro roccia) detta lamiera ha una evidente funzione statica e di tenuta e in fase di fabbricazione costituisce la cassaforma esterna per il getto del tubo; internamente ci si

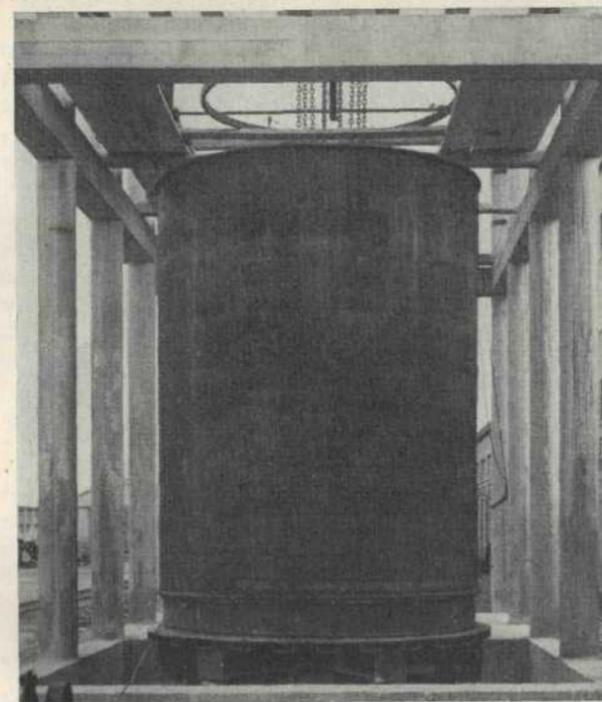


Fig. 11. - Elemento di condotta forzata in calcestruzzo vibrato ($\text{Ø}_i = 2.700 \text{ mm}$, $\text{sp.} = 300 \text{ mm}$, $L = 4.00 \text{ m}$) disposto sulla piattaforma rotante, prima dell'avvolgimento della fune di acciaio.

vale di una cassaforma metallica scomponibile e riutilizzabile.

Quale armatura è stata utilizzata una fune spiroidale di 41 mm. di diametro costituita da 80 fili ($4 + 10 + 16 + 22 + 28$) di acciaio lucido ad alto tenore di carbonio con diametro di 3,98 mm. La sezione metallica complessiva è di $995,3 \text{ mm}^2$. La resistenza unitaria a rottura determinata su singoli fili è di $170-190 \text{ kg/mm}^2$, mentre il carico di rottura della fune assicurata dalla Casa Costruttrice è di 156.000 kg .

Presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano sono state determinate le caratteristiche elastiche e meccaniche della fune. Il carico di rottura medio riscontrato è stato di 164.000 kg . corrispondente a una tensione unitaria media di 165 kg/mm^2 .

Il valore del modulo di elasticità apparente della fune relativo ad una operazione di messa in tensione a 120 kg/mm^2 , dopo aver prestirato la fune a una tensione di 100 kg/mm^2 , è risultato di 13.200 kg/mm^2 . L'operazione di prestiramento della fune ha lo scopo principale di regolarizzare notevolmente il suo comportamento elastico.

Sulla base di questi dati sperimentali, stabiliti 11 allineamenti di punti fissi e fissata a 120 kg/mm^2 la tensione iniziale da realizzare nell'armatura, si è proceduto al calcolo dell'armatura di precompressione secondo il procedimento sopra descritto.

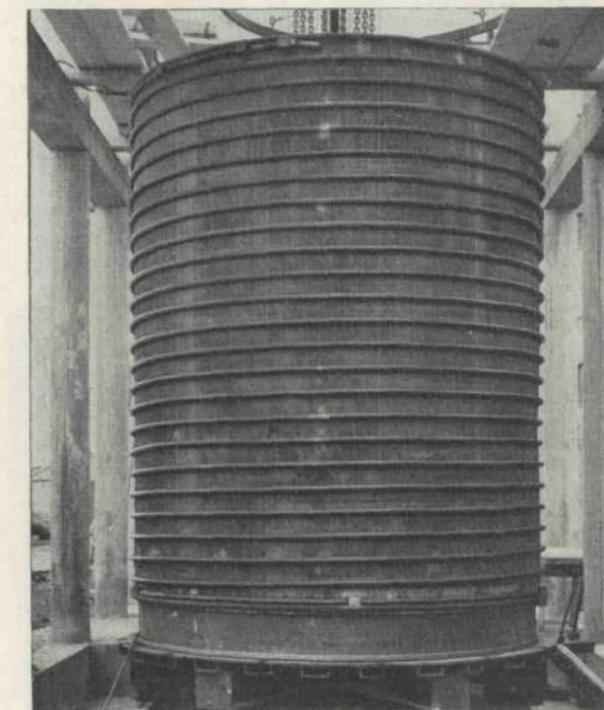
Il tubo di calcestruzzo viene gettato verticalmente e vibrato energicamente a mezzo di vibrator a parete ed a immersione a 12.000 giri. Dopo un periodo di maturazione di 20 giorni il tubo viene collocato su di una piattaforma rotante

(fig. 11) e si procede all'avvolgimento della fune di acciaio (fig. 12) secondo il passo prestabilito, servendosi per questa operazione di un'apposita apparecchiatura munita di freno dinamometrico mobile lungo due guide verticali. In questa apparecchiatura, che appare in fotografia 13, il freno vero e proprio è costituito da due semicilindri di bronzo che abbracciano la fune e che vengono chiusi a forza su di essa a mezzo di un sistema a vite con azione intermedia di quattro grosse molle a bovolo ad asse verticale; detto freno può scorrere orizzontalmente su apposite guide reagendo su due altre molle tarate ad asse orizzontale; un indice mobile su scala graduata consente la determinazione della tensione di avvolgimento.

Nel caso specifico la fune, già prestirata alla tensione di 100 kg/mm^2 , è avvolta sotto uno sforzo di trazione di 2000 kg . pari a circa $\frac{1}{60}$ dello sforzo da realizzarsi nella fune a seguito dell'operazione di pretensione vera e propria.

La fotografia 12 rappresenta la tubazione a operazione di avvolgimento ultimata, in essa sono visibili gli ancoraggi terminali della fune. Si procede quindi (fig. 14) alla messa in opera dei profilati distanziatori in corrispondenza degli 11 allineamenti di punti fissi. Segue l'operazione di pretensione vera e propria della fune (fig. 15). Questa operazione viene realizzata con una apposita pressa azionata da un martinetto ad olio collegato alla pompa a mezzo di tubo flessibile. La pressa che figura nella fotografia 15 può raggiungere nell'avvicinamento delle armature uno sforzo massimo di 70 tonn., corrispondente a una pressione di 450 atm.

Fig. 12. - Elemento di condotta forzata dopo l'avvolgimento della fune di acciaio.



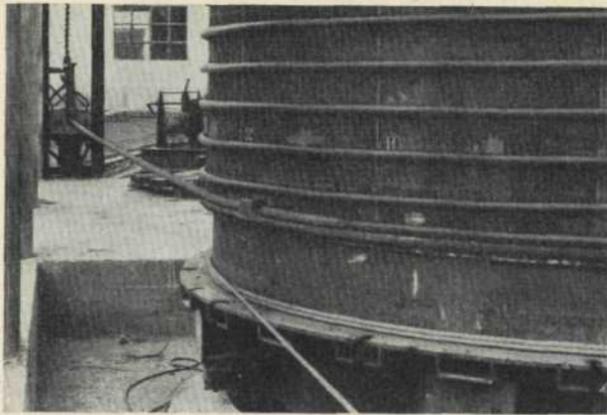


Fig. 13. - Elemento di condotta forzata. Fine dell'operazione di avvolgimento della fune di acciaio. È visibile sul fondo il freno dinamometrico scorrevole su due guide verticali.

nel martinetto, ed è quindi atta a risolvere la maggior parte dei problemi di precompressione.

Nell'operazione di pretensione la tubazione viene fatta ruotare sulla piattaforma girevole in modo da portare i vari allineamenti di agraffatura di fronte alla pressa, che a mezzo di un paranco effettua unicamente gli spostamenti verticali. Gli avvicinamenti dei fili vengono eseguiti con un'ordine predeterminato in modo da realizzare la massima uniformità di precompressione.

La fotografia 16 mostra la tubazione a operazione di precompressione ultimata prima dell'allontanamento dei profilati distanziatori. Non resta

Fig. 14. - Elemento di condotta forzata, dopo la messa in opera dei profilati distanziatori.

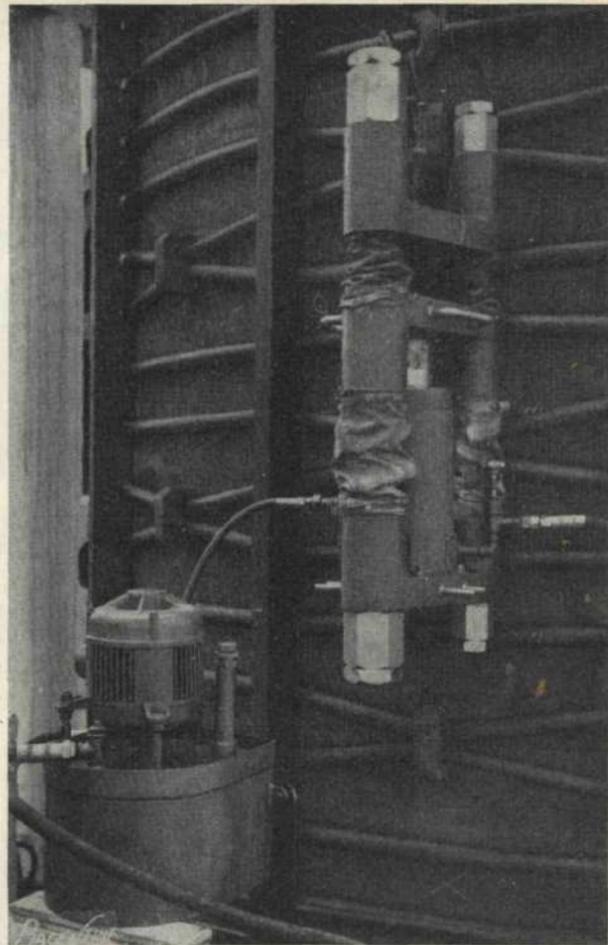
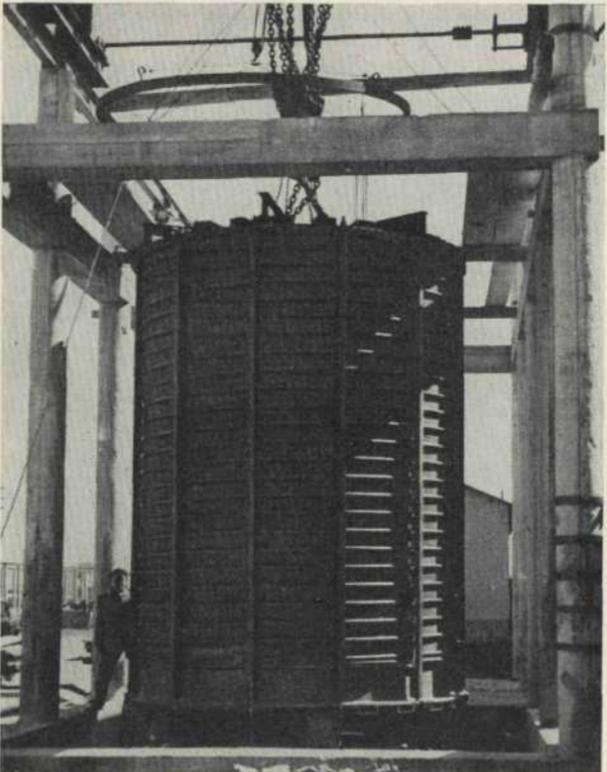


Fig. 15. - Elemento di condotta forzata. Operazione di messa in tensione della fune di acciaio. Particolare della pressa in azione e della relativa pompa.

a questo punto che a togliere detti profilati distanziatori per aver la tubazione nella sua forma finale quale si presenta in fotografia 17.

Su questa tubazione, che può considerarsi un caso limite, come valore del prodotto diametro x pressione, sono state a più riprese eseguite prove a pressione interna. Per non dover resistere agli sforzi enormi (dell'ordine di 2.000 tonn.) che sarebbero venuti a esercitarsi sulle testate di chiusura, si è dovuto procedere internamente al tubo di prova alla costruzione di un tubo di calcestruzzo di diametro esterno tale che risultasse tra i due tubi un'intercapedine di 2 cm., entro cui pompare l'acqua in pressione. La chiusura ermetica dell'intercapedine è stata ottenuta mediante un anello di gomma pressato in apposita sede a mezzo di tiranti agenti su di un anello di acciaio ad esso sovrapposto. La fotografia 18 rappresenta appunto una vista dall'alto della tubazione di prova e del tubo di calcestruzzo costruito nel suo interno. Si vede pure l'anello di acciaio per la chiusura dell'intercapedine.

Sia durante le operazioni di precompressione, sia durante le prove a pressione interna, si è proceduto alla determinazione delle variazioni del diametro interno della condotta mediante un'appa-

sita apparecchiatura parzialmente visibile in fig. 18 che permetteva le misure su tre diametri a 120° nella sezione di mezzeria. Dette misure hanno confermato, sia pure con qualche incertezza, dovuta al funzionamento rilevatosi poi difettoso di un dispositivo di misura, quanto era previsto nel calcolo.

La pressione interna è stata portata a 32 atm.; a questa pressione si sono avute le prime perdite attraverso alcuni fori realizzati nella lamiera esterna. Riportando la pressione interna sotto le 29 atm., le perdite sono completamente cessate, avendo la parete di calcestruzzo riacquisito la sua primitiva integrità.

Serbatoi.

Allo scopo di completare il quadro delle possibili applicazioni di questo procedimento di precompressione, diamo qui una breve descrizione delle operazioni di ripristino di un serbatoio di acqua potabile.

Si tratta di un serbatoio cilindrico seminterrato con diametro esterno di 44,60 m., ricoperto da un sistema unidirezionale di volte a botte di 6 m. di luce, ribassate al $\frac{1}{10}$, prive di catene (fig. 24).

Queste volte per effetto del peso proprio e del sovrastante ricoprimento di terra danno luogo a una spinta di circa 15.000 kg/m, che determinava sulla parete del serbatoio notevoli sforzi di ovalizzazione. All'atto della messa in carico del serbatoio si era verificato un grave dissesto statico seguito da perdite molto rilevanti. Si decise di procedere al ripristino dell'opera precomprimendo in

Fig. 16. - Elemento di condotta forzata, dopo la completa messa in tensione della fune di acciaio.

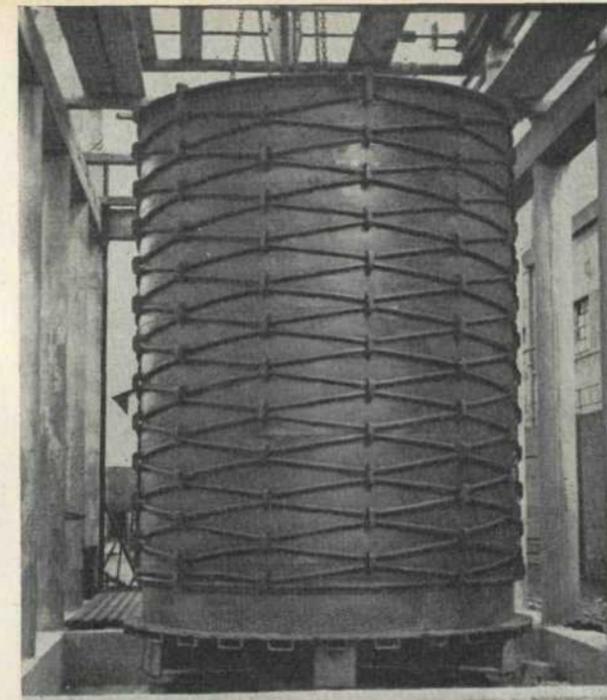
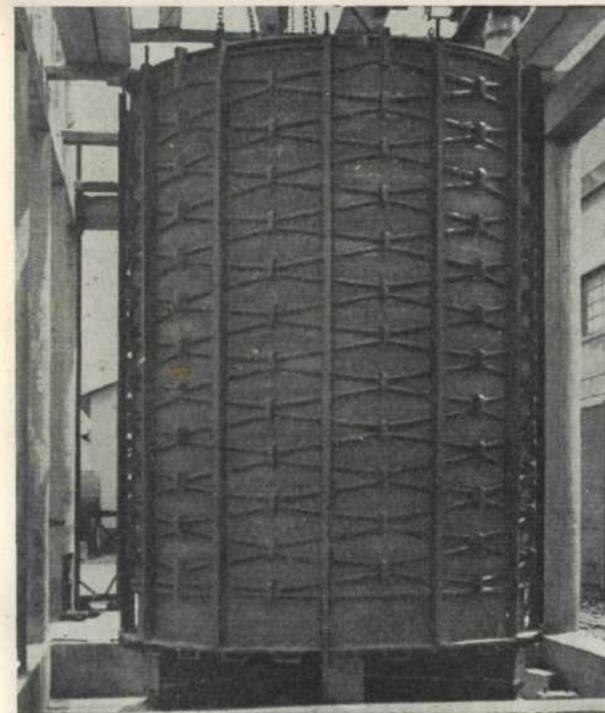


Fig. 17. - Elemento di condotta forzata, dopo la rimozione dei profilati distanziatori.

sommità per un'altezza di m. 1,80 la parete cilindrica del serbatoio con una forza cerchiante complessiva di 70.000 kg., e di assorbire l'eccesso di spinta orizzontale delle volte a botte di copertura colla messa in opera di tiranti di caratteristiche opportune.

L'operazione di cerchiatura è stata realizzata mediante una fune spiroidale di 19 mm. di diametro composta da 37 fili (1 + 6 + 12 + 18) di 2,71 mm. di diametro, con sezione metallica complessiva di 213,4 mm². In base ai risultati delle sperimentazioni eseguite presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano è stato determinato il modulo di elasticità della fune, pari a 15.000 kg/mm², relativo al tasso di lavoro per essa previsto. La sua resistenza a rottura è risultata di

Fig. 18. - Elemento di condotta forzata visto dall'alto col tubo interno per l'esecuzione delle prove a pressione.





Fig. 19. - Attrezzatura mobile per la precompressione dei serbatoi.

33.350 kg e corrisponde ad una resistenza unitaria di 157 kg/mm².

Date le caratteristiche eccezionali dell'opera, si è preferito assumere un tasso di lavoro relativamente basso, pari a 50 kg/mm² di tensione finale nell'armatura in modo da disporre in ogni evenienza di una sezione metallica esuberante; a questa tensione corrisponde secondo il calcolo una tensione iniziale di 54 kg/mm². Il numero di allineamenti di punti fissi è stato fissato a 65. In base a tali dati si è determinato il valore dell'angolo a di 4° 52' ed il passo effettivo dell'elica che è risultato di 20,83 cm, ad esso corrisponde un angolo di avvolgimento di circa 0°, 5'.

All'avvolgimento della fune si è proceduto a mezzo di un autocarro sul quale era stata sistemata la fune in rotolo e sul quale era stato montato il freno dinamometrico già illustrato e raffigurato in fig. 13. Il montaggio era stato realizzato in modo che fossero possibili al freno spostamenti verticali tali da consentire la formazione dell'elica completa. Facendo avanzare circolarmente l'autocarro attorno al cilindro e manovrando all'elevatore del freno dinamometrico, si è eseguito l'avvolgimento della fune sotto una trazione costante di 1.000 kg. La fotografia 20 è stata presa al termine di questa

Fig. 20. - Serbatoio di 44,60 m di diametro esterno, dopo l'avvolgimento della fune di acciaio e la messa in opera di tre profilati distanziatori.



prima fase dell'operazione; in essa si vedono già disposti tre profilati distanziatori. Su analogo automezzo (fig. 19) è stata montata una gru girevole per la manovra della pressa di messa in tensione della fune. In tutta l'operazione di pretensione sono stati utilizzati complessivamente nove profilati distanziatori, divisi in tre gruppi di tre, disposti inizialmente a distanza angolare reciproca di 120°.

La fotografia 21 rappresenta la messa in tensione della fune nei due primi campi in prossimità degli ancoraggi di estremità. Alla messa in tensione della fune nel campo adiacente si è poi proceduto previo spostamento del profilato distanziatore intermedio secondo quanto sopra accennato e schematicamente rappresentato in fig. 6. La fotografia 22 è stata eseguita prima della chiusura degli ultimi quattro campi. Il serbatoio a pretensione ultimata appare in fotografia 23. In questa operazione di precompressione sono state utilizzate delle graffe in acciaio fucinato le cui caratteristiche risultano in fig. 7b).

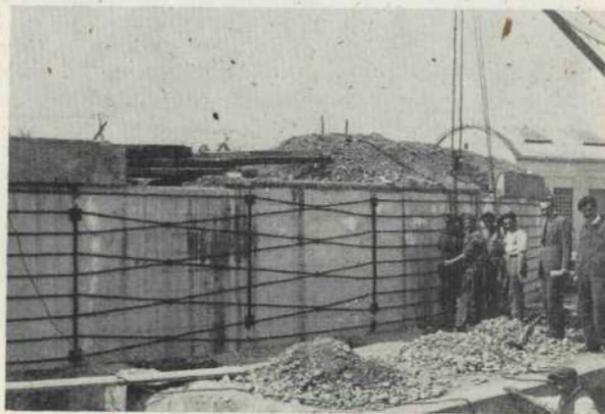


Fig. 21. - Operazione di messa in tensione della fune di acciaio.

La messa in tensione dei tiranti, destinati ad eliminare gli sforzi di ovalizzazione, determinati sulla parete del serbatoio dalla spinta delle volte di copertura, è stata realizzata secondo un procedimento basato ancora sullo stesso principio di pretensione. A lato di ogni fila di pilastri sono state disposte delle funi metalliche immediatamente sottostanti alle travi di appoggio delle volte ed ancorate alle loro estremità. Si è proceduto alla messa in tensione di dette funi avvicinando tra loro i punti intermedi dei tratti compresi tra due pilastri contigui. Durante questa operazione sono state eseguite misure estensimetriche sulle funi allo scopo di controllare la realizzazione delle pretensioni dedotte dal calcolo. Operato l'avvicinamento, le funi sono state vincolate mediante dei semplici morsetti a piastre forate e bulloni, per cui in qualsiasi istante è possibile regolare a piacimento la loro tensione avvitando o svitando i dadi dei bulloni.

La figura 24 rappresenta l'interno del serbatoio a operazione di pretensione ultimata, in essa sono visibili gli ancoraggi di estremità delle funi e i rinforzi realizzati in sommità dei pilastri terminali

allo scopo di assorbire lo sforzo di taglio determinato dai tiranti.

Le prove di carico del serbatoio successivamente eseguite hanno dimostrato il pieno successo di questa duplice operazione di precompressione su di una struttura già gravemente compromessa.

Conclusioni

Gli esempi sopra riportati illustrano alcuni aspetti del campo applicativo di questo procedimento di precompressione che pare dotato di caratteristiche di un certo interesse. Infatti esso consente la precompressione di strutture di qualsiasi mole con un'attrezzatura relativamente modesta; le forze operanti sono relativamente piccole, dell'ordine di $\frac{1}{5}$ di quelle da realizzarsi nell'armatura;

il lavoro teoricamente necessario nell'operazione di precompressione è uguale, a parte gli attriti, al solo lavoro di deformazione elastica dell'armatura; mentre il lavoro teoricamente necessario ove si preprima una struttura cilindrica mediante avvolgimento di un filo sotto tensione è uguale, oltre che al lavoro di deformazione elastica, al lavoro di avvolgimento del filo sotto la tensione definitiva (3).

Limitatamente al caso delle strutture cilindriche ci sembra comunque poter concludere che questo procedimento presenta vantaggi particolarmente evidenti ove si tratti di realizzare la precompressione di strutture di grande diametro, quali serbatoi, grandi condotte forzate gettate in posto ecc.

Il fatto di poter utilizzare come armatura, in luogo del filo, delle funi di acciaio anche di grande

(3) Questo lavoro è di gran lunga maggiore del precedente e pari al prodotto della lunghezza del filo per lo sforzo di trazione su di esso esercitato. E immediato rendersi conto del valore molto elevato del rapporto dei lavori meccanici teoricamente necessari alla realizzazione della pretensione dell'armatura per i due procedimenti in esame. Ove si trascurino gli effetti dell'attrito questo valore è dato da $\frac{1+dl}{dl}$ dove l è la lunghezza dell'armatura e dl il suo allungamento elastico; facendo lavorare l'acciaio a una tensione $\sigma_f = 100 \text{ Kg/mm}^2$, nel caso di un'armatura costituita da un filo di acciaio ($E = 21.000 \text{ Kg/mm}^2$) si avrà:

$$\frac{1+dl}{dl} = \frac{E}{\sigma_f} + 1 = \frac{21.000}{100} + 1 = 211.$$

Fig. - 23. - Serbatoio a operazione di precompressione ultimata.

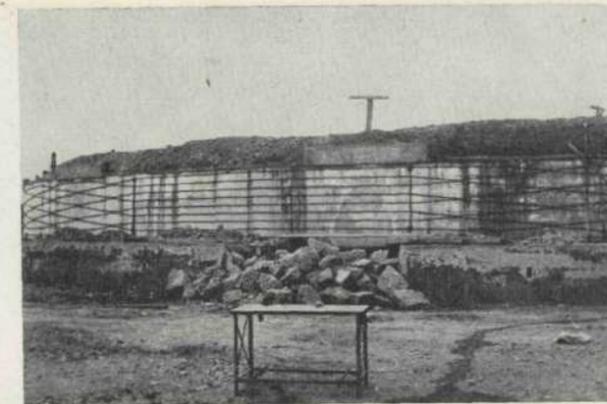
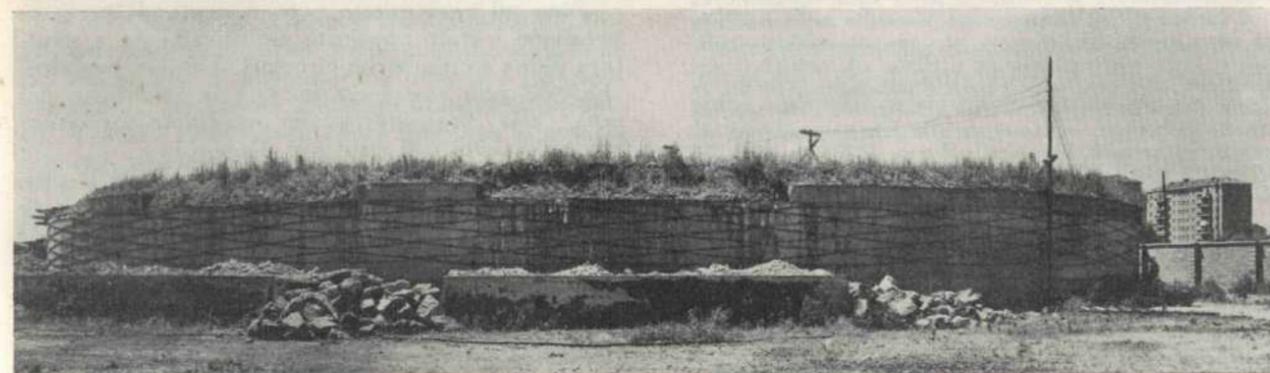


Fig. 22. - Serbatoio prima della messa in tensione della fune di acciaio negli ultimi quattro campi.

diametro presenta diversi lati positivi. La lunghezza dell'avvolgimento risulta notevolmente ridotta e con essa le probabilità di sezioni di minore resistenza; si elimina l'inconveniente di dover procedere a giunzioni tra diversi elementi di armatura; si realizza una migliore costanza dello stato di precompressione nel tempo, dato che il modulo di elasticità apparente di una fune è sensibilmente più basso del modulo dei fili. È evidente che le variazioni di diametro che possono verificarsi nel cilindro influiscono tanto meno sulla tensione dell'armatura, e quindi sullo stato di precompressione, quanto più basso è il valore del modulo di elasticità dell'armatura stessa.

Considerazioni analoghe alle precedenti hanno portato i costruttori di tubazioni in acciaio ad abbandonare il procedimento inizialmente adottato, come si disse, nella costruzione delle bocche da fuoco, sostituendo con funi di acciaio i fili avvolti in tensione in uno o più strati (4).

D'altro canto si possono fare alcuni appunti al procedimento di precompressione qui illustrato, per esempio a proposito della possibile disuniformità di tensioni in punti diversi dell'armatura derivante dal fatto che la messa in tensione dei vari campi non avviene simultaneamente. In realtà si tratta di variazioni di tensione molto modesta, al massimo dell'ordine del 10%. All'atto di ogni operazione di avvicinamento di due tratti di armatura

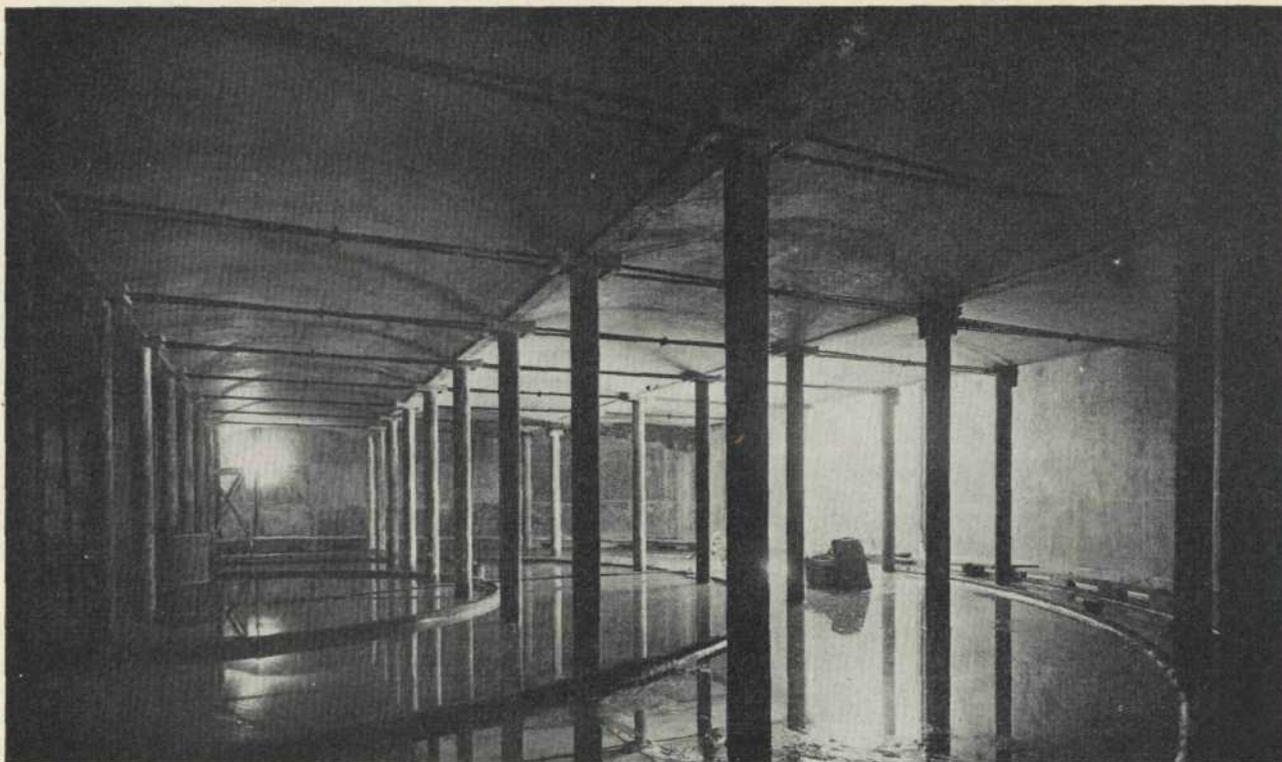


Fig. 24. - Interno del serbatoio dopo la messa in tensione delle funi di acciaio agenti come catene delle volte di copertura.

si verifica infatti una redistribuzione delle tensioni nelle zone contigue già poste in tensione, non esistendo alcun vincolo, ove si escludano gli ancoraggi di estremità, fra l'armatura e la parete del cilindro da precomprimere ⁽⁵⁾.

Un'altra critica potrebbe essere mossa a questo procedimento di precompressione, specialmente ove si tratti di adottare funi di grosso diametro, a proposito della loro azione cerchiante localizzata in punti eccessivamente distanti tra loro a scapito

⁽⁴⁾ Si vedano a questo proposito le pubblicazioni di G. Ferrand sulle tubazioni di acciaio surpressato a blindaggio flessibile costruite dagli stabilimenti Bouchayer e Viallet.

Aspetti analoghi tra il procedimento di precompressione qui descritto e quello adottato dai costruttori di tubazioni in acciaio surpressato a blindaggio flessibile si ritrovano, in un certo qual modo, anche nella realizzazione della messa in tensione delle funi. Non sarebbe infatti possibile avvolgere attorno al tubo, sia di acciaio, sia di calcestruzzo, funi di grosso diametro sotto la tensione definitiva, dato il valore rilevante degli sforzi che entrerebbero in gioco e che comprometterebbero la resistenza stessa delle tubazioni. Si tratta dunque di realizzare questa messa in tensione delle funi dopo averle avvolte sotto una piccola tensione, sufficiente a farle aderire in modo perfetto alla superficie dei tubi. Mentre nel caso delle condotte metalliche la messa in tensione definitiva viene realizzata deformando plasticamente la parete di lamiera, col sottoporre la tubazione ad una sovrappressione interna adeguata, nel caso delle condotte in calcestruzzo tale tensione può essere ottenuta agendo direttamente sulle funi nel modo sopra descritto.

⁽⁵⁾ Allo scopo di controllare sperimentalmente l'entità di questa disuniformità di tensioni, ultimata l'operazione di precompressione, si sono in più casi ripresi con la pressa diversi punti di avvicinamento misurando al manometro la pressione necessaria per liberare le funi dalle graffe, si sono riscontrate per l'appunto variazioni massime dell'ordine del 10%.

della uniformità di precompressione nel calcestruzzo.

Esperienze accurate eseguite dall'ingegnere Coyne sulla condotta forzata in calcestruzzo precompresso dell'impianto idroelettrico di Marèges hanno permesso di constatare che disponendo di cerchiature indipendenti ad intervalli pari a quattro volte lo spessore della parete si realizza ancora sulla faccia interna della parete del tubo una precompressione praticamente costante.

Ora nel caso del procedimento qui descritto il passo dell'elica di avvolgimento originaria (distanza media delle armature in tensione) è per lo più circa eguale allo spessore del cilindro da precomprimere; se poi, oltre a ciò, si tien conto che non si tratta qui di anelli indipendenti ma di una vera e propria maglia continua di armature in tensione chiusa su tutta la superficie esterna del tubo, si ha ragione di ritenere, e l'esperienza lo ha confermato, che in ogni punto della parete si realizza una buona uniformità di precompressione.

Sino ad oggi questo procedimento di precompressione è stato applicato esclusivamente a strutture piane e cilindriche circolari, è chiaro per altro che esso può essere esteso, con le modifiche del caso, alla precompressione mediante armature esterne flessibili di strutture diverse.

In particolare si può con esso risolvere il problema della precompressione di volte sottili di varia foggia nonchè di strutture sferiche, per esempio di serbatoi destinati al contenimento di gas compressi.

Giovanni Tournon

Politecnico di Torino.