

6. ELEMENTI STRUTTURALI IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

Novembre 2016 – v. 11.0

- Pag. 6.1 -

Elementi strutturali in Cemento Armato Precompresso

6.1. Generalità

Le strutture in Cemento Armato Precompresso, dette comunemente in c.a.p., sono caratterizzate dalla presenza permanente di particolari coazioni, azioni artificiali esterne di compressione, oltre ai carichi esterni applicati.

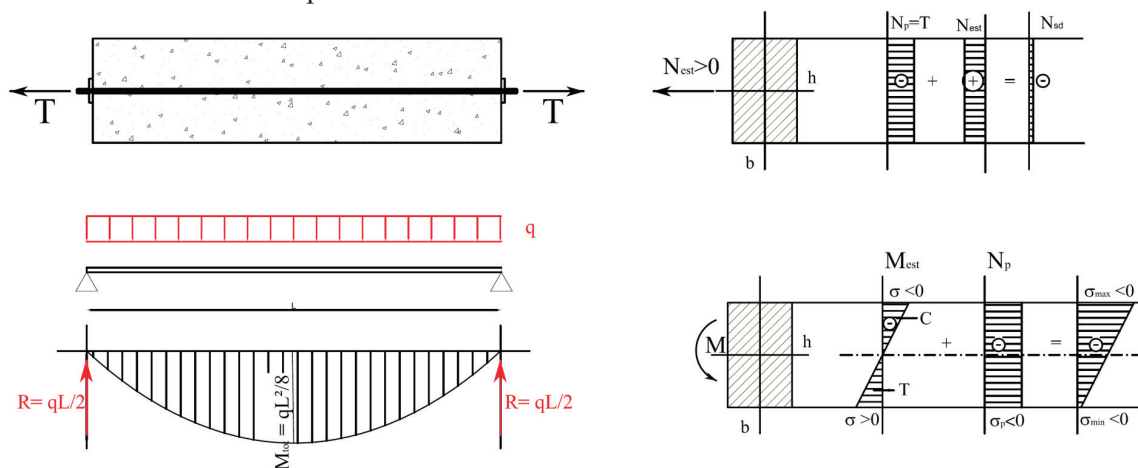
Uno stato di coazione è per definizione uno stato di sollecitazione interno al quale non corrisponde alcun sistema di forze esterno.

Esempi di coazioni applicate su strutture sono certamente:

- Distorsione termica impedita: si prenda una trave incastrata ai due estremi soggetta ad una variazione di temperatura uniforme ΔT . Poiché la trave è incastrata la deformazione risulta essere impedita con la conseguente nascita di forze interne, che possono essere facilmente determinate immaginando prima di deformare la trave e poi di ripristinare la congruenza, riportando la trave nella posizione originale. Quest'ultima operazione comporta l'applicazione di una forza normale che annulla completamente l'allungamento ΔL dovuto alla variazione di temperatura.
- Il ritiro del calcestruzzo: nelle travi in cemento armato tale fenomeno, se impedito, produrrebbe uno stato di coazione simile ad una diminuzione di temperatura con conseguente nascita di uno stato di trazione.

Nel Cemento Armato Precompresso c.a.p. le coazioni artificiali impresse hanno lo scopo di migliorare il comportamento della struttura in fase di esercizio, contenendo la deformabilità ed impedendo (o limitando) la fessurazione della trave. Infatti, la presenza di una sollecitazione artificiale di segno opposto a quello dovuto ai carichi applicati comporta tensioni risultanti minori di quelle che si avrebbero se ci fossero solamente carichi applicati.

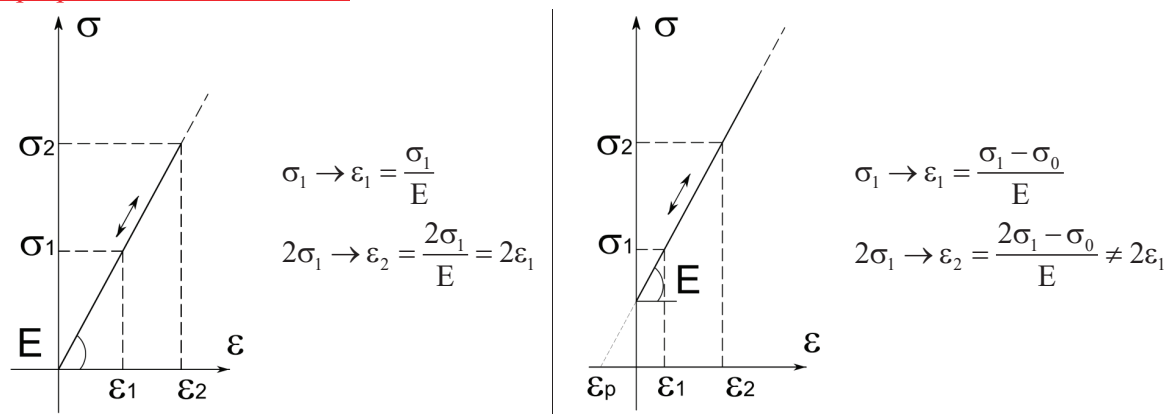
Generalmente la coazione è una compressione permanente che permette di ottenere una sezione resistente completamente reagente, di rigidezza mediamente doppia di una sezione fessurata. Lo stato di coazione viene impresso mediante acciai di elevate caratteristiche meccaniche.



Quando la pressollecitazione induce nella sezione solo tensioni di compressione (precompressione completa) il calcolo allo stato limite di servizio diventa molto semplice, in quanto i metodi di calcolo da adottare sono quelli classici della Scienza delle Costruzioni, cioè con sezione interamente reagente. In questa condizione vale la sovrapposizione degli effetti: la precompressione ed i carichi esterni si sommano per ottenere lo stato di sollecitazione finale.

La verifica in generale consiste in: $|\sigma - \sigma_p| \leq |\sigma_{adm}|$

Occorre osservare però che mentre la sovrapposizione degli effetti è del tutto lecita, il principio di proporzionalità viene meno.



In tal senso il metodo delle T.A. non può essere considerato valido anche ai fini della verifica a rottura.

Nel cemento armato precompresso occorre effettuare le verifiche in ogni fase della vita della struttura e poter valutare singolarmente ogni contributo agli sforzi interni, facilita tali operazioni.

Vantaggi:

- disponendo i cavi nella posizione opportuna si riesce ad annullare o quanto meno a ridurre notevolmente gli effetti dei carichi esterni;
- si ha l'annullamento o la riduzione delle tensioni di trazione nel calcestruzzo. Questo fa sì che tutto il materiale reagisca permettendo così sensibili riduzioni di sezione a parità di carichi esterni rispetto a travi in c.a. ordinario;
- gli sforzi di compressione vengono anch'essi notevolmente ridotti per la presenza di maggiore area resistente a compressione;
- sensibile riduzione delle tensioni principali di trazione dovute al taglio;
- sensibile riduzione degli effetti del ritiro. D'altronde il fenomeno del ritiro tende a diminuire lo stato di compressione contribuendo a diminuire il benefico effetto della precompressione;

- un elemento o una struttura in c.a.p. nelle varie fasi di costruzione è sottoposto di fatto a severi collaudi che garantiscono l'opportuna resistenza anche livelli di tensione che normalmente non vengono mai più raggiunti in fase di esercizio ma comunque presenti nelle fasi intermedie (ad esempio nella fase di precompressione);
- la tecnica della precompressione può essere applicata anche ad altre tipologie costruttive, quali le strutture miste acciaio-calcestruzzo e le stesse strutture metalliche.

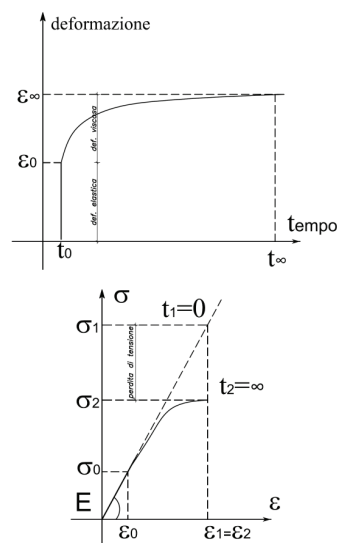
Svantaggi:

- malgrado la semplicità concettuale dei calcoli, la progettazione delle opere in c.a.p. richiede consapevolezza e senso di responsabilità ancora maggiori rispetto alle normali opere in c.a.; la tecnica della precompressione richiede un alto livello di specializzazione delle imprese costruttrici e delle maestranze. Si pensi alle operazioni di messa in trazione dei cavi, operazione che richiede l'uso di martinetti idraulici o alle operazioni di ancoraggio dei cavi che richiede particolari tecnologie che verranno esaminate in seguito;
- le costruzioni in c.a.p. devono essere realizzate con materiali più resistenti e dunque più costosi, infatti l'acciaio utilizzato deve essere in grado di sviluppare grandi deformazioni (allungamenti) in campo elastico, cioè possedere un elevato limite elastico.

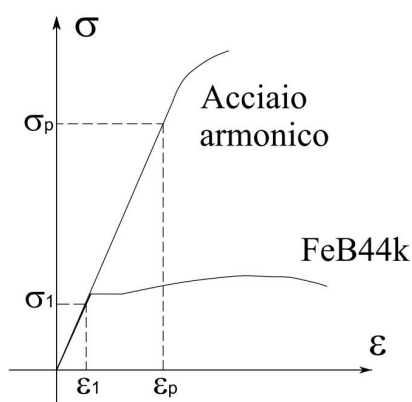
L'azione precompressione del cls è dovuta all'allungamento delle "barre di pressollecitazione" che, una volta rilasciate, creano un accorciamento del calcestruzzo: maggiore è la contrazione del cls, maggiore è la tensione di compressione nello stesso.

In realtà non viene sfruttato tutto l'allungamento imposto alle armature, in quanto una buona parte viene persa per effetto dei seguenti fenomeni:

- ritiro del calcestruzzo;
- deformazione viscosa del cls: in condizione di carico costante, scontata una prima deformazione elastica, si ha anche una deformazione viscosa (aumento della deformazione nel tempo a carico costante); questo fenomeno avviene in un periodo temporale di qualche mese;
- rilassamento delle armature di pressollecitazione: diminuzione nel tempo della forza necessaria a mantenere una determinata deformazione, cioè diminuzione del modulo elastico. Al contrario della deformazione viscosa, il fenomeno avviene nei primi giorni.



Queste perdite vengono dette Perdite Differite di pressollecitazione e vengono ridotte imponendo elevate deformazioni elastiche iniziali dell'acciaio.



In conclusione per ottenere un certo effetto bisogna tirare più del previsto, per scontare tutte le perdite.

6.2. Materiali

6.2.1. Il calcestruzzo

Il calcestruzzo impiegato nelle strutture in c.a.p. si differenzia da quello usato nel c.a. solamente per una resistenza più elevata, ciò perché deve essere associato ad acciai di elevata resistenza e perché nella fase di pressollecitazione i livelli di tensione raggiungibili possono essere estremamente elevati.

Secondo il **D.M. 14/01/2008**, la classe minima di resistenza per le strutture in c.a.p. è C28/35, mentre per il D.M.1996 era il $R_{ck}=30$ MPa (max $R_{ck}=55$)

Tabella 4.1.II – Impiego delle diverse classi di resistenza

STRUTTURE DI DESTINAZIONE	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA
Per strutture non armate o a bassa percentuale di armatura (§ 4.1.11)	C8/10
Per strutture semplicemente armate	C16/20
Per strutture precomprese	C28/35

A differenza del c.a., nelle strutture in c.a.p sono ammesse le trazioni (precompressione limitata), a patto di prevedere idonea armatura diffusa in grado di riprendere tale trazione.

Resistenza a compressione a lungo termine in esercizio (SLE):

Le massime tensioni normali di compressione σ_c , in esercizio a cadute di tensione avvenute, devono rispettare la seguente limitazione (D.M.2008):

$$\begin{aligned} \sigma_c &< 0.60f_{ck} \text{ per la combinazione caratteristica (rara)} \\ \sigma_c &< 0.45f_{ck} \text{ per la combinazione quasi permanente} \\ f_{ck} &= \text{resistenza caratteristica del cls a 28gg} \end{aligned}$$

Per spessori di calcestruzzo inferiori a 50mm, i valori vanno ulteriormente ridotti del 20%.

Resistenza a compressione iniziale in esercizio (SLE):

All'atto della tesatura, quindi della precompressione, le massime tensioni normali di compressione $\sigma_{c,i}$ iniziale, devono rispettare la seguente limitazione (D.M.2008):

$$\sigma_c < 0.70f_{ckj}$$

f_{ckj} = resistenza caratteristica del cls al j-esimo giorno

Solo nella zona di ancoraggio delle armature si possono tollerare compressioni locali σ_c prodotte dagli apparecchi di ancoraggio pari a:

$$\sigma_c < 0.90f_{ckj}$$

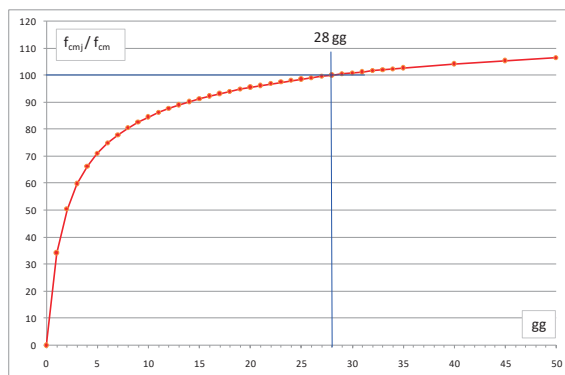
Valutazione della resistenza cilindrica nel tempo:

Per la valutazione della resistenza cilindrica del cls all'atto della precompressione, che avviene in genere per un tempo diverso dai 28gg di maturazione richiesti dalla norma, si può adottare la seguente formulazione (Ceb-Fip Model Code 1990):

$$f_{cm}(t) = f_{cm}(28gg) \times e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28gg}{t}} \right)}$$

dove:

- s è un coefficiente che dipende dal tipo di cemento:
 - s = 0.20 per cls a presa rapida ed alta resistenza
 - s = 0.25 per cls a resistenza normale e a presa rapida
 - s = 0.38 per cls a presa lenta
- t è il tempo di carico;
- $f_{cm}(28gg)$ è la resistenza cilindrica a 28 giorni

Resistenza a trazione a lungo termine in esercizio (SLE)::

Nel nuovo D.M. 14/01/2008 non viene citata la resistenza a trazione, mentre le precedenti normative (D.M. 2005 e D.M. 1996) riportavano:

In ambienti moderatamente/poco aggressivi, sono ammesse tensioni normali di trazione σ_t , in esercizio a cadute di tensione avvenute, che devono rispettare la seguente limitazione:

$$\sigma_t < 0.07 f_{ck} \quad \text{D.M. 1996}$$

$$\sigma_t < \frac{f_{ctk}}{\gamma_{m,c}} \quad \text{D.M. 2005 con } \gamma_{m,c} \text{ riportato in Tab 5.1-XII}$$

Resistenza a trazione iniziale in esercizio (SLE)::

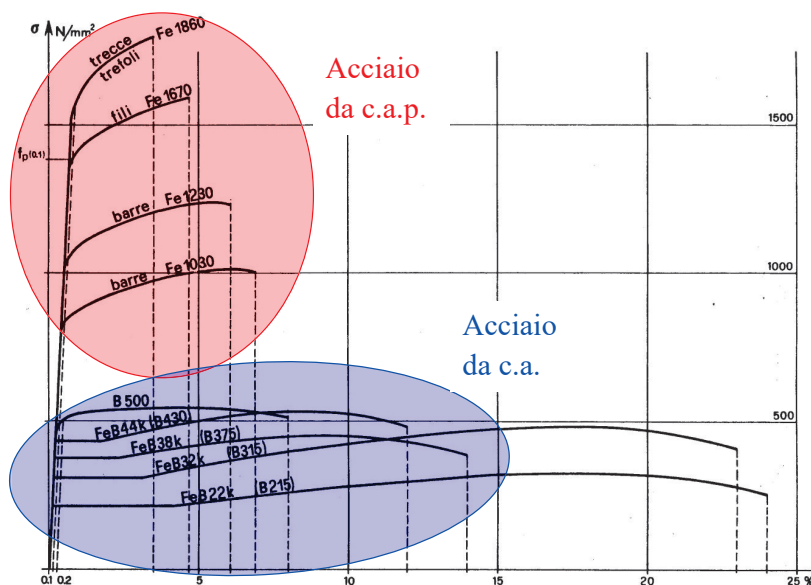
Analogamente, le precedenti normative (D.M. 2005 e D.M. 1996) riportavano:

“sono ammesse tensioni di trazione fino a $0,10 f_{ck}$ fermo restando l'obbligo di disporre armature metalliche che assorbono l'intera risultante delle trazioni.

Nelle travi ad armature pretese sono ammesse tensioni di trazione iniziali pari a $0,05 f_{ckj}$, senza aggiunta di armatura sussidiaria, purché l'armatura pre-tesa sia ben diffusa nella zona soggetta a trazione. In fasi intermedie e transitorie della costruzione è consentito superare nel conglomerato cementizio il limite a trazione innanzi stabilito, purché le fasi successive provochino l'annullamento dello stato di trazione.”

6.2.2. Gli acciai da precompressione

Per il cemento armato precompresso vengono utilizzati acciai ad alta resistenza (acciai armonici), che presentano pertanto elevati valori di allungamento al limite elastico, necessari per contenere le perdite. Essi presentano comportamento altamente fragile caratterizzato da una elevata resistenza in assenza o quasi di snervamento.

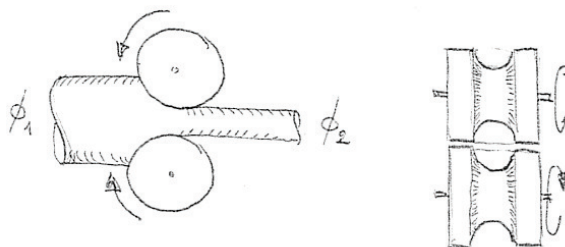


Per tale motivo si adotta la convenzione di utilizzare il valore della tensione allo 0.2% di deformazione residua o all'1% di deformazione sotto carico in sostituzione della tensione di snervamento.

Tale tipologia di acciai può arrivare a resistenze dell'ordine di **1500-1800 MPa**.

Confrontando questi valori con quelli dell'acciaio da c.a. (540 MPa circa), si osserva una resistenza superiore di 2÷3 volte. Tale aumento di resistenza si ottiene principalmente con i seguenti provvedimenti:

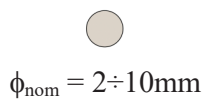
- aumento della percentuale di carbonio (circa 0.6% contro i 0.2% delle barre da c.a.);
- aggiunta di elementi, quali manganese, silicio, vanadio o cromo;
- incrudimento mediante lavorazione a freddo (trafilatura): nel caso dei fili si opera una trafilatura che prevede tensioni longitudinali di trazione e trasversali di compressione;
- trattamenti termici di tempra seguiti da rinvenimento.



In realtà spesso questi trattamenti vengono combinati assieme per far triplicare la resistenza, ciò fa comprendere il perché questi acciai non sono saldabili, sono molto sensibili alle alte temperature di un incendio, sensibili alla corrosione.

Gli acciai da c.a.p. sono disponibili sotto forma di fili, trecce, trefoli e funi generalmente forniti in rotoli o bobine, barre in fasci.

I fili

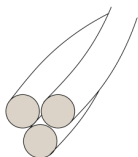


I fili, o vergella, sono un prodotto laminato di sezione piena, generalmente fornito sotto forma di rotoli.

I fili possono essere tondi o di altre forme; vengono individuati mediante il diametro nominale e non presentano snervamento.

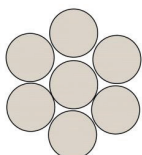
Non è consentito l'impiego di fili lisci nelle strutture precomprese ad armature pre-tese. Ciascun rotolo di filo liscio, ondulado o con impronte deve essere esente da saldature.

Le trecce



Una treccia è costituita da 2 o 3 fili avvolti ad elica intorno al loro comune asse longitudinale; passo e senso di avvolgimento dell'elica sono uguali per tutti i fili della treccia;

I Trefoli



Un trefolo è costituito da più fili avvolti ad elica intorno ad un filo rettilineo completamente ricoperto dai fili elicoidali.

Il passo ed il senso di avvolgimento dell'elica sono uguali per tutti i fili di uno stesso strato.

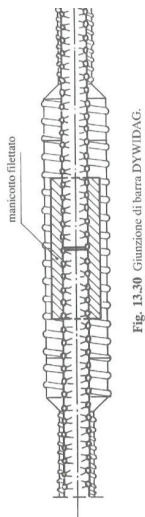
Le Funi



Le funi sono costituite da un gran numero di fili organizzati in vario modo.

Le funi sono generalmente utilizzate per gli apparecchi di sollevamento, come ascensori, montacarichi ed impianti a fune, e non per il cemento armato precompresso.

Le Barre



La barra da c.a.p. è un prodotto laminato di sezione piena, forniti soltanto in forma di elementi rettilinei e piuttosto rigidi. Le barre possono essere lisce, a filettatura continua o parziale, con risalti; vengono individuate mediante il diametro nominale.

Gli acciai da c.a.p. devono presentare le seguenti caratteristiche meccaniche secondo il D.M. 14.01.2008:

Tabella 11.3.VII

Tipo di acciaio	Barre	Fili	Trefoli	Trefoli a fili sagomati	Trecce
Tensione caratteristica di rottura f_{ptk} N/mm ²	≥1000	≥1570	≥1860	≥1820	≥1900
Tensione caratteristica allo 0,1 % di deformazione residua $f_{p(0,1)k}$ N/mm ²	-----	≥1420	-----	-----	-----
Tensione caratteristica all'1 % di deformazione totale $f_{p(1)k}$ N/mm ²	-----	-----	≥1670	≥1620	≥1700
Tensione caratteristiche di snervamento f_{pyk} N/mm ²	≥800	-----	-----	-----	-----
Allungamento sotto carico massimo A_{gt}	≥3,5	≥3,5	≥3,5	≥3,5	≥3,5

Per il modulo di elasticità si farà riferimento al catalogo del fornitore.

Resistenza a trazione in esercizio (SLE)::

La tensione massima σ_{sp} in esercizio a perdite avvenute di una armatura da c.a.p. di tipo pre-teso o post-teso, tenendo conto di tutte le sollecitazioni agenti, è pari a:

$$\sigma_{sp} < 0.80 \times (f_{p,(0.1),k}; f_{p,(1),k}; f_{p,y,k})$$

dove:

- $f_{p,(0.1),k}$ è la tensione di trazione caratteristica allo 0.1% di deformazione residua;
- $f_{p,(1),k}$ è la tensione di trazione caratteristica al 1% di deformazione;
- $f_{p,y,k}$ è la tensione di trazione caratteristica allo snervamento;

La tensione massima iniziale σ_{spi} all'atto della tesatura di una armatura da c.a.p. di tipo pre-teso, è pari a:

$$\sigma_{spi} < \min \left\{ \begin{array}{l} 0.90(f_{p,(0.1),k}; f_{p,(1),k}; f_{p,y,k}) \\ 0.80 \times f_{p,t,k} \end{array} \right\} \quad \text{pre-teso}$$

Nel caso di armatura di tipo post-teso, è pari a:

$$\sigma_{spi} < \min \left\{ \begin{array}{l} 0.85(f_{p,(0.1),k}; f_{p,(1),k}; f_{p,y,k}) \\ 0.75 \times f_{p,t,k} \end{array} \right\} \quad \text{post-teso}$$

È ammessa per ciascuna tipologia una sovratensione non superiore a $0.05 f_{p,(0.1),k}$

6.3. La tecnologia della precompressione

6.3.1. Grado di precompressione

Gli elementi in cemento armato precompresso possono essere classificati in base a diversi aspetti; una prima classificazione riguarda il grado di precompressione:

1. Cemento Armato Precompresso COMPLETO: la coazione di compressione iniziale è tale da annullare le trazioni in tutte le configurazioni di sollecitazione.
2. Cemento Armato Precompresso NORMALE: nella configurazione di sollecitazione finale sono presenti limitate tensioni nel cls.
3. Cemento Armato Precompresso PARZIALE: la coazione di compressione iniziale non è tale da annullare tutte le trazioni, che devono essere riprese dalla armatura ordinaria del c.a., detta armatura lenta.
4. Cemento Armato NORMALE: assenza di coazione di compressione iniziale, devono essere disposte le armature da c.a., per riprendere tutte le trazioni.

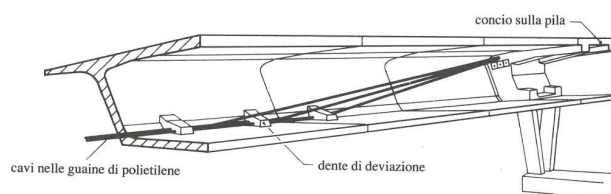
6.3.2. Precompressione interna, esterna o mista

1. Precompressione INTERNA:

E' la tecnica maggiormente utilizzata, la quale prevede l'applicazione della precompressione con cavi interni, cioè con cavi immersi nel getto di calcestruzzo. A seconda che il cavo sia teso prima o dopo l'indurimento del getto di cls si parla di pre-tensione o post-tensione;

2. Precompressione ESTERNA:

In questo caso il cavo passa esternamente alla sezione. Ha il vantaggio di avere cavi sempre ispezionabili e, se è il caso, possono essere ri-tesati o addirittura sostituiti. Si evita inoltre di avere getti difficoltosi normalmente tali per le esigue dimensioni delle nervature. I cavi esterni hanno però lo svantaggio di non avere riserve dovuta all'aderenza e di essere soggette maggiormente alla corrosione. Tale tecnica viene generalmente utilizzata in ponti a conci prefabbricati.



3. Precompressione MISTA:

La precompressione mista viene in genere realizzata con precompressione interna a livello di soletta inferiore e superiore e una precompressione esterna applicata a livello delle nervature verticali che possono essere così progettate con spessori minori essendo il getto meno difficoltoso. Esistono anche soluzioni con cavi interni non iniettati (protetti in stabilimento) che hanno il vantaggio di poter essere ri-tesati e/o sostituiti.

6.3.3. Precompressione a fili aderenti o ad armatura pre-tesa

È una tecnica di precompressione interna, tipica della prefabbricazione industrializzata eseguita in stabilimento, che prevede i cavi immersi nel getto di calcestruzzo ed trasferimento della forza per aderenza.

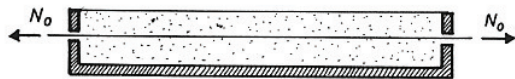


I) Nella cassaforma vuota si mettono in tiro le trecce (fig. 14.3).



Fig. 14.3

II) Si esegue il getto di conglomerato. Le trecce sono sempre tenute in tiro dall'esterno (fig. 14.4).



III) Si bloccano dai loro ancoraggi esterni (fig. 14.5).

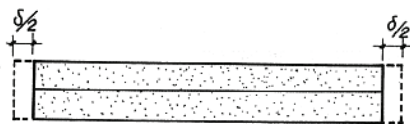


Fig. 14.5

Fase I: si dispongono i cavi (trecce e trefoli) di precompressione all'interno del cassero prima del getto nella posizione voluta, tesati con uno o due martinetti idraulici vincolati a due blocchi di ancoraggio solidali con il terreno;

Fase II: la trazione voluta viene mantenuta per il tempo necessario ad effettuare il getto di calcestruzzo e per realizzarne la presa e l'avvio del suo indurimento.

Fase III: Eseguito il getto e raggiunto così un'opportuna caratteristica di resistenza del cls, i fili vengono tagliati in corrispondenza delle sezioni terminali dell'elemento.

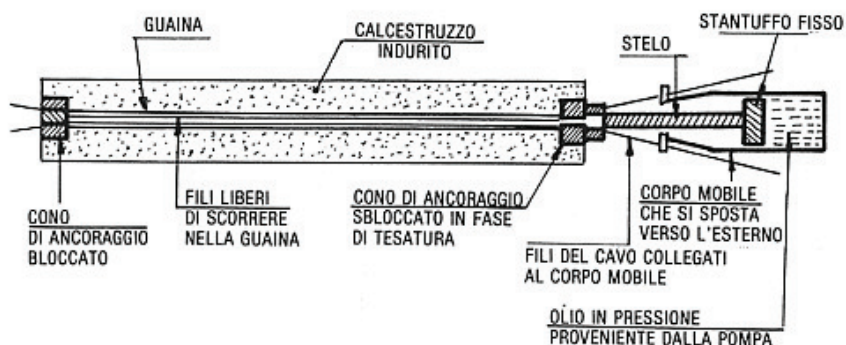
I fili non più tesi tenderanno ad accorciarsi, fenomeno al quale si oppone il cls che di conseguenza risulta essere luogo di uno stato di coazione (precompressione). Si osservi che a questo punto i cavi presentano una sollecitazione di trazione inferiore a quella iniziale, perché anch'esse si sono accorciate con il calcestruzzo di δ .

6.3.4. Precompressione a cavi scorrevoli o ad armatura post-tesa

Questa tecnica di precompressione può essere sia interna che esterna e consiste principalmente nel mettere in tensione un cavo (treccia o trefolo) libero di scorrere in una guaina all'interno o esterno dell'elemento già gettato. In questo caso il trasferimento della forza avviene alla testata del manufatto.

Le fasi sono le seguenti:

Fase I: si prepara la cassaforma con all'interno i cavi contenuti entro guaine (quindi liberi di scorrere) ed i dispositivi di fissaggio; si esegue il getto del manufatto; in alcuni casi, vengono inserite solamente le guaine, infilando in un secondo momento i cavi.



Fase II: a getto avvenuto ed al raggiungimento delle opportune caratteristiche meccaniche del calcestruzzo (resistenza necessaria ad assorbire in sicurezza le coazioni imposte), i cavi vengono messi successivamente in tensione da martinetti idraulici a contrasto con l'elemento di calcestruzzo; la tesatura può avvenire su entrambe le facce oppure una sola dopo aver bloccato l'estremo opposto.

Fase III: raggiunto il livello di tensione voluto che corrisponde evidentemente allo stato di precompressione voluto si procede al bloccaggio dei cavi attraverso opportuni dispositivi brevettati, solitamente a forma di cono; si tolgono i martinetti e si procede con l'iniezione della malta di cemento nelle guaine.

L'efficacia del metodo dipende evidentemente dall'efficacia degli ancoraggi terminali.

Con questa tecnica, in ogni istante si ha sempre l'uguaglianza fra l'azione sul calcestruzzo N_c e quella di trazione sul cavo N_{sp}

Al contrario del metodo precedente, il cavo può essere tesato più volte fin tanto che la guaina non viene iniettata e sigillata.

6.3.5. I sistemi di ancoraggio

I sistemi di ancoraggio sono diversi e spesso brevettati dalle singole ditte, ma sostanzialmente derivano tutti dalle due seguenti tipologie:

1. Ancoraggio a cuneo (Fressinet)

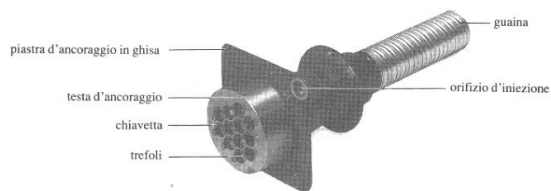


Fig. 13.26 Ancoraggio mobile VSL.

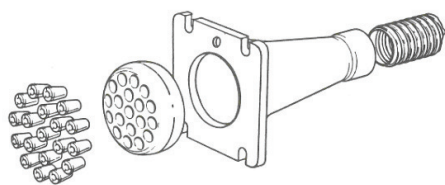
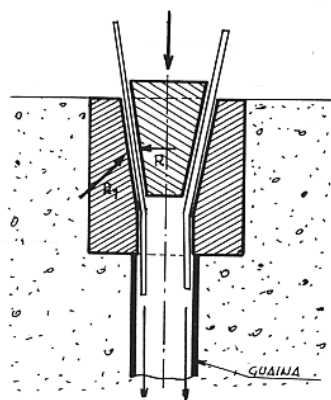


Fig. 13.27 Ancoraggio mobile FREYSSINET.



Il tronco di cono centrale viene trascinato all'interno dell'elemento dalla forza di trazione e quindi premuto contro la sua sede, fino ad auto bloccarsi.

2. Ancoraggio a testa cilindrica

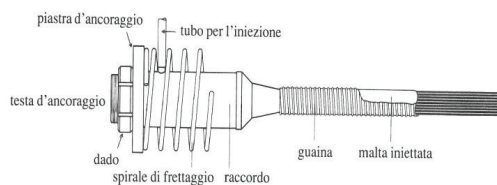
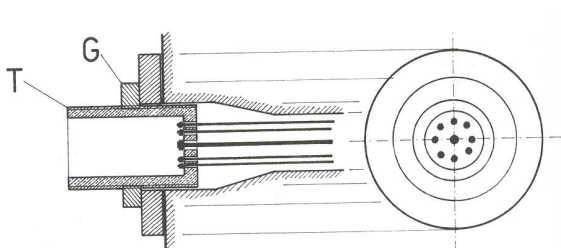
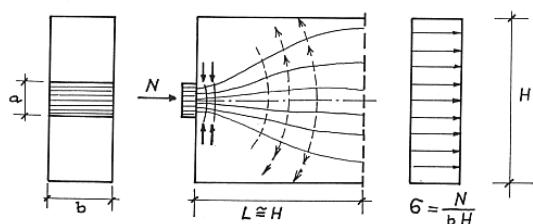


Fig. 13.25 Ancoraggio mobile BBRV.

In entrambi i dispositivi bisogna prestare molta attenzione alla zona di ancoraggio: infatti nel punto di contatto e trasferimento della forza di pre-compressione si generano picchi di tensione molto elevati. La forza di precompressione induce tensioni di compressione elevate nella direzione del cavo, ma anche tensioni di trazioni ortogonali alle precedenti.



Per riprendere le tensioni di trazione e contemporaneamente confinare il cls soggetto a compressioni elevate bisogna prevedere un'armatura trasversale molto fissa (staffe molto ravvicinate), detta armatura di frettaggio.

6.3.6. Iniezione dei cavi

Nei manufatti ad armature post-tesi, dopo la tesatura finale, si deve procedere alla sigillatura della guaina al cui interno scorre il cavo. La sigillatura avviene con l'iniezione di miscele cementizie (malte con inerti molto fini) o resine ad hoc.

L'iniezione viene eseguita per i seguenti scopi:

- Protezione dell'acciaio post-teso dalla corrosione;
- Realizzare l'aderenza fra il cavo e la guaina (e quindi il calcestruzzo) per migliorare le condizioni di sicurezza a rottura. A tal fine si possono anche utilizzare guaine opportunamente corrugate all'interno e esterno.

Dopo l'iniezione il cavo da pressollecitazione “vale” anche come armatura lenta, cioè può riprendere le trazioni presenti nell'elemento in c.a.