



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1319

ANNO: 2014

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Raviglione

MATERIA: Cemento Armato Precompresso, Prof. Taliano

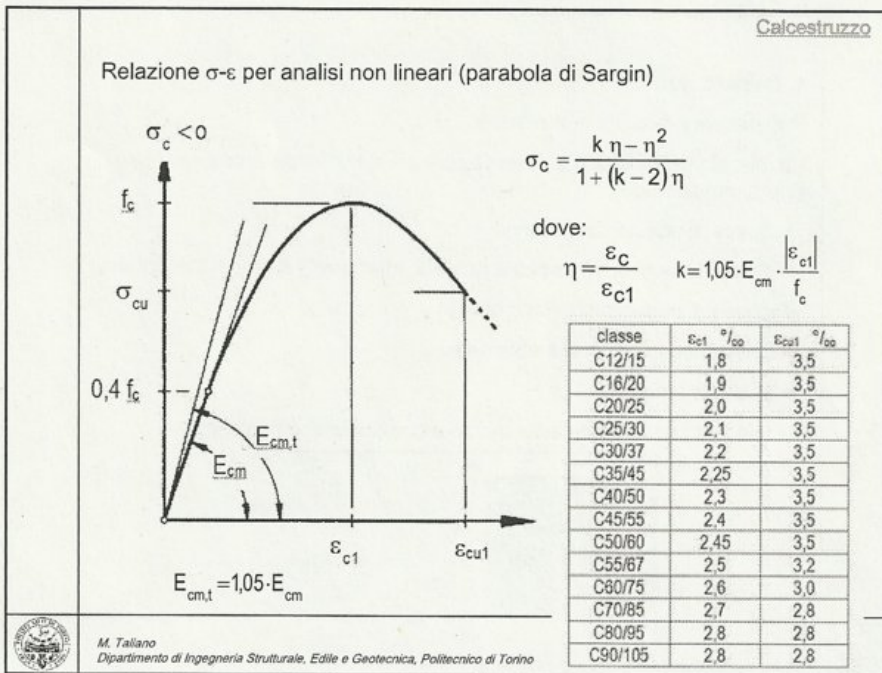
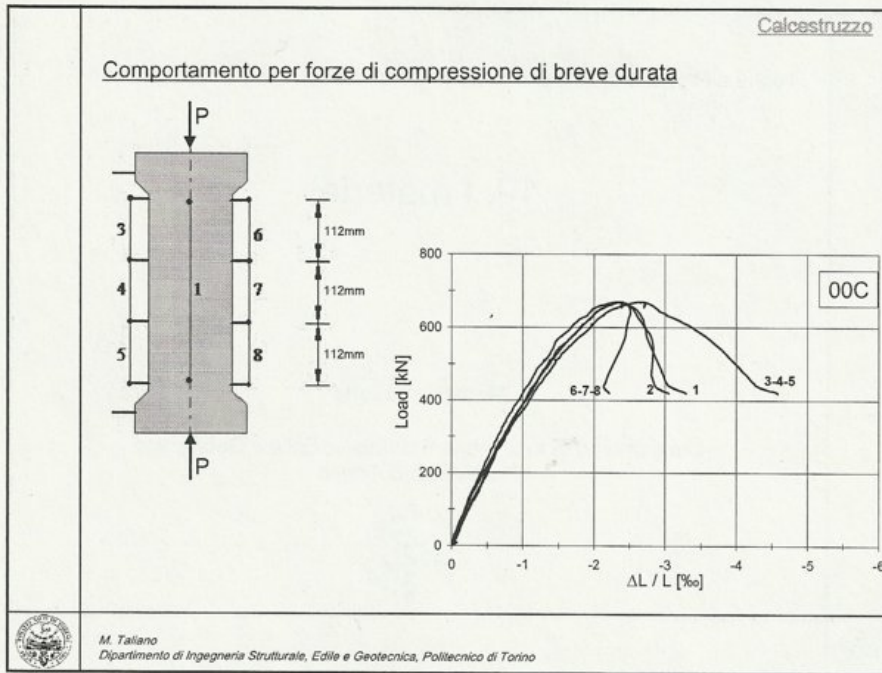
Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

CEMENTO  
ARMATO  
PRECOMPRESSO

Prof. Toliano



Calcestruzzo

Modulo di elasticità longitudinale

Per aggregati costituiti da quarziti:

$$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm} / 10)^{0.3}$$

E' funzione crescente nel tempo t (temperatura media di 20°C):


$$E_{cm}(t) = \left[ \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right]^{0.3} \cdot E_{cm}$$

Coefficiente di Poisson

Per calcestruzzo non fessurato  $\nu = 0,20$ .

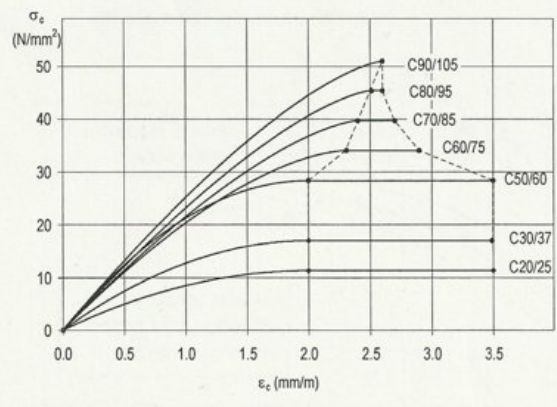
Coefficiente di dilatazione termica lineare

$$\alpha_T = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$


 M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino


Calcestruzzo

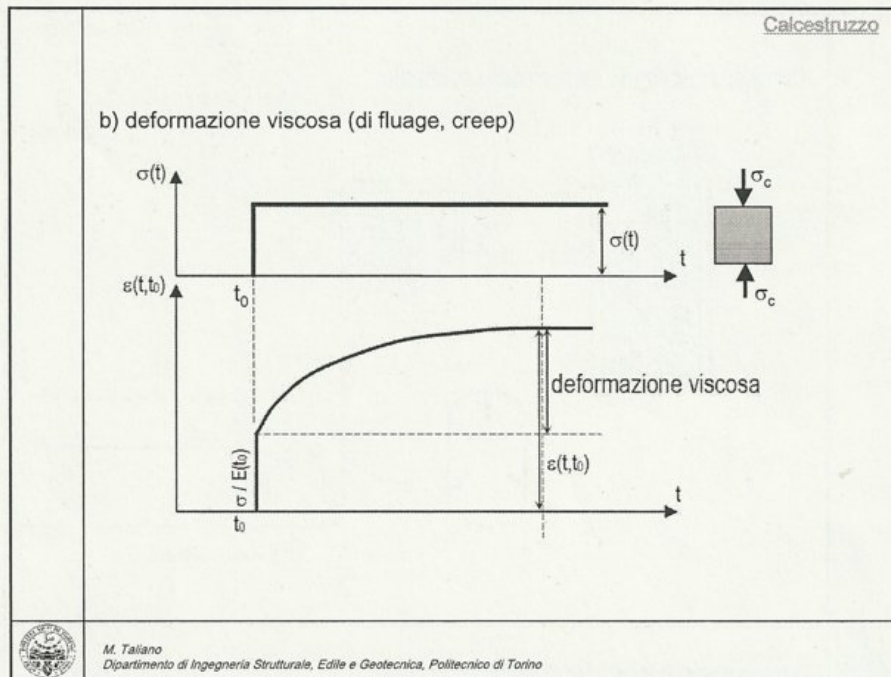
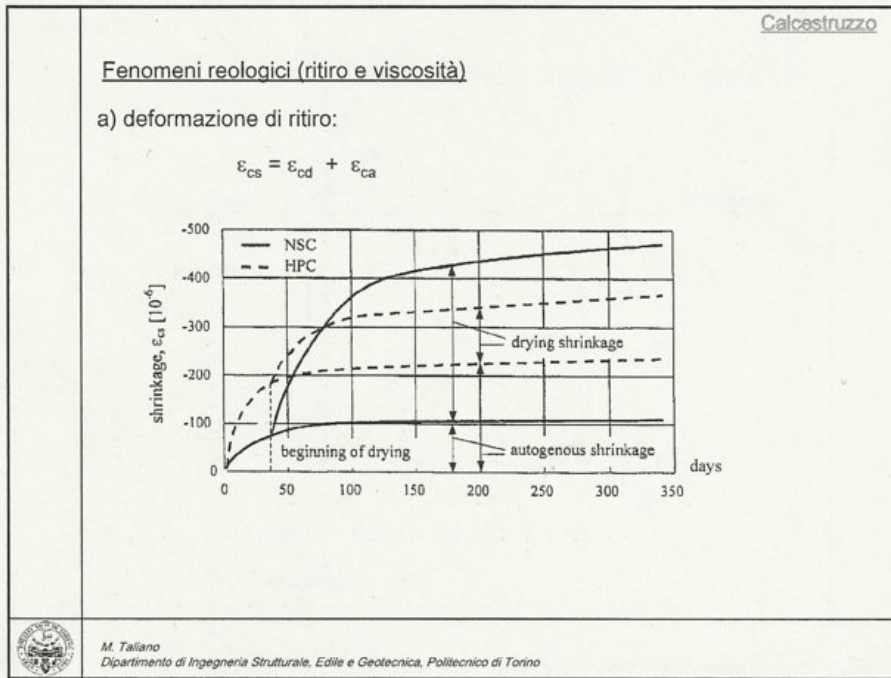
Relazione  $\sigma$ - $\epsilon$  per verifiche allo s.l.u.



$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,5}$

Relazione  $\sigma$ - $\epsilon$  per verifiche allo s.l.e.


 M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino



Calcestruzzo

Il coefficiente di viscosità  $\varphi(t, t_0)$  definito sopra è valido per tensioni di compressione non superiori a  $0,45 \cdot f_{cm}(t_0)$ . Per tali valori infatti si può ammettere proporzionalità tra la tensione e la deformazione viscosa. Per livelli di tensioni superiori, quali quelli che si potrebbero avere per la precompressione, la deformazione viscosa ha un andamento esponenziale e il coefficiente di viscosità non lineare  $\varphi_k(t, t_0)$  può essere valutato con l'espressione:

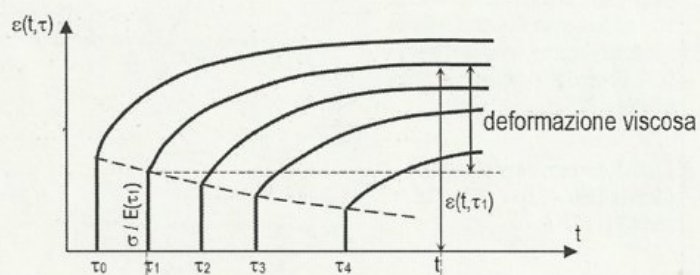
$$\varphi_k(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot e^{\left[1,5 \left( \frac{\sigma_c}{f_{cm}(t_0)} - 0,45 \right)\right]}$$



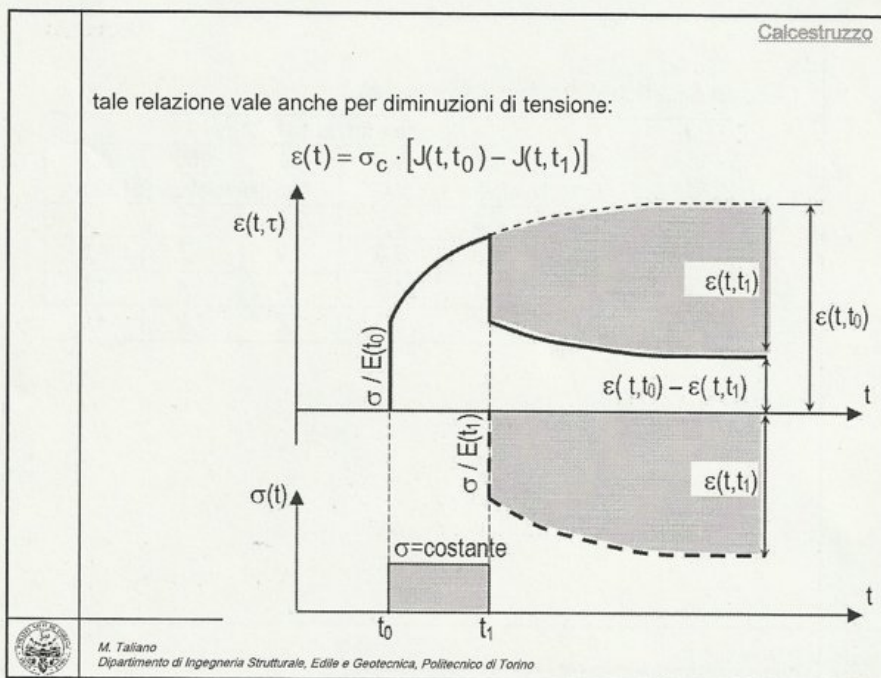
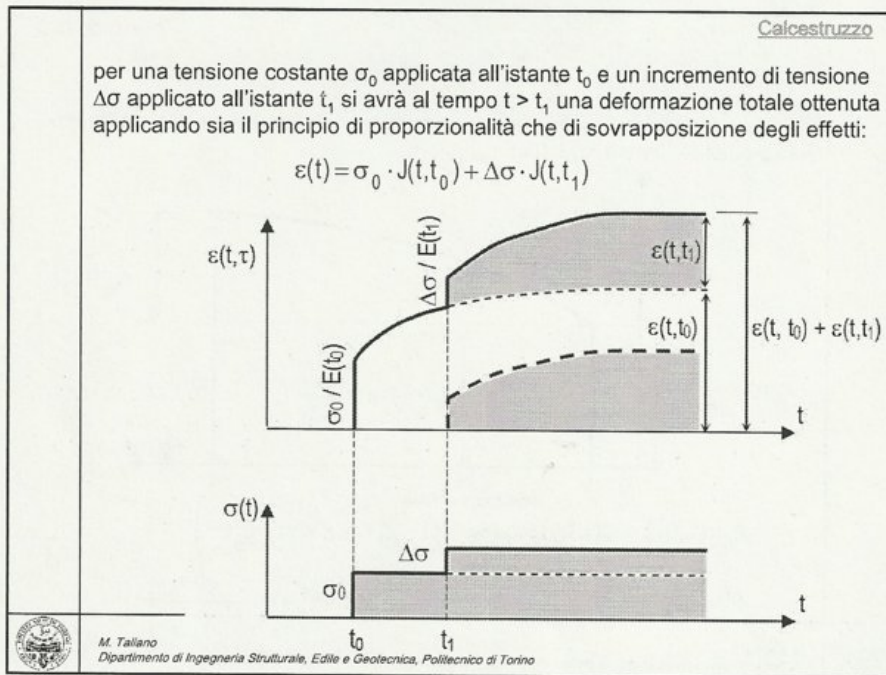
M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Calcestruzzo

Per diversi tempi di applicazione del carico:



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino





Calcestruzzo

Se le tensioni variano in misura modesta e si assume un modulo elastico del calcestruzzo costante nel tempo si ricava


$$\varepsilon(t, t_0) = \sigma \cdot \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c,28}} \right] = \frac{\sigma}{E_c(t_0)} \cdot [1 + \varphi(t, t_0)]$$

da cui si definisce il modulo efficace del calcestruzzo (metodo Effective Modulus):

$$E_{c,eff} = \frac{E_c(t_0)}{1 + \varphi(t, t_0)}$$

Questo metodo di calcolo consente di trattare i problemi della deformazione viscosa con le relazioni elastiche assumendo un modulo elastico modificato per il calcestruzzo ovvero un **coefficiente di omogeneizzazione efficace**:

$$\alpha_{e,eff} = \frac{E_s}{E_{c,eff}}$$

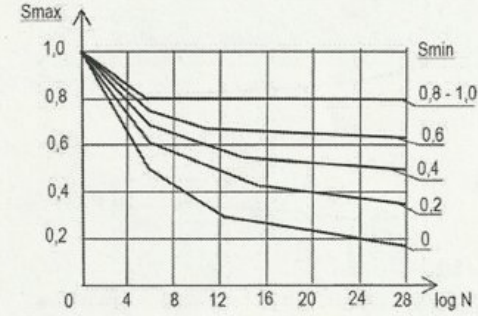
 M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Calcestruzzo

Fatica


Il calcestruzzo sottoposto ad azioni cicliche (ponti, strutture portanti mezzi in movimento o macchine di lavorazione, strutture particolarmente esposte all'azione del vento) manifesta resistenza a compressione anche notevolmente minori di quella statica.

$$S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{f_{ck,fat}}$$



$$S_{min} = \frac{\sigma_{min}}{f_{ck,fat}}$$

$f_{ck,fat} = \beta_{cc}(t) \cdot \beta_{c,sus}(t, t_0) \cdot f_{ck} \cdot (1 - f_{ck}/250)$  resistenza a fatica di riferimento per tensioni di compressione

 M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

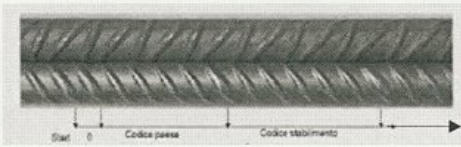
Guardando la barra è possibile riconoscere il produttore: con 1 passo di circa 1 metro si trova un ingrossamento delle nervature.

Si inizia a contare da 2 nervature ingrossate, si conta quante nervature normali ci sono e questo determina il numero della nazione (Italia 4) → Paese produttore

Dopo l'ultima nervatura ingrossata c'è il n° associato al produttore della barra relativo a quel dato paese.

Acciaio per c.a.

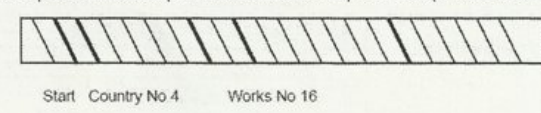
**Marchatura delle barre:**




**Identificazione del codice paese**

Country	Country number
Austria, Czech Republic, Germany, Poland, Slovakia	1
Belgium, Netherlands, Luxembourg, Switzerland	2
France, Hungary	3
Italy, Malta, Slovenia	4
UK, Ireland, Iceland	5
Denmark, Estonia, Finland, Latvia, Lithuania, Norway, Sweden	6
Portugal, Spain	7
Cyprus, Greece	8
Other countries	9

**Esempio di marchatura per l'identificazione del produttore (in base alle nervature ingrossate)**



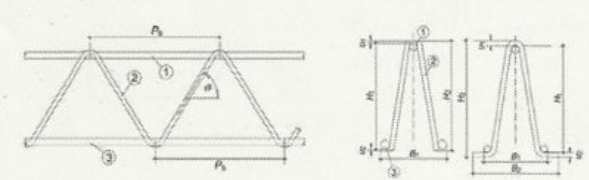
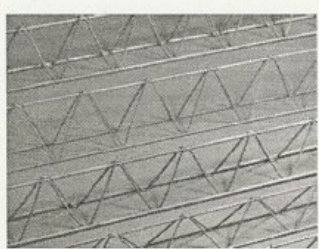
Start Country No 4 Works No 16



 M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Attestato qualificatore = segno che sancisce la sequenza esatta del marchio del produttore

Acciaio per c.a.

**Tralicci:**



 M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Acciaio per c.a.

Controlli di accettazione in cantiere (reti e tralicci)

I controlli sono obbligatori e devono essere effettuati su tre saggi ricavati da tre diversi pannelli, nell'ambito di ciascun lotto di spedizione.

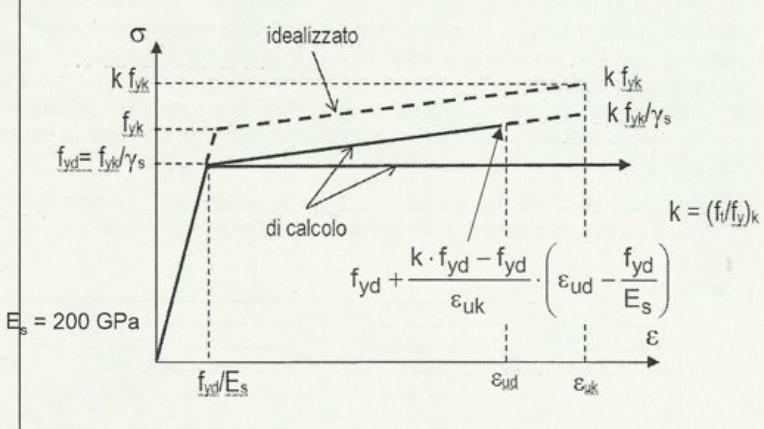
Devono soddisfare i requisiti previsti nelle norme tecniche relativamente ai valori di snervamento, resistenza a trazione del filo, allungamento, rottura e resistenza al distacco.



*M. Taliano*  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino


Acciaio per c.a.

Relazione  $\sigma$ - $\epsilon$  per verifiche allo s.l.u.



$$f_{yd} + \frac{k \cdot f_{yd} - f_{yd}}{\epsilon_{uk}} \cdot \left( \epsilon_{ud} - \frac{f_{yd}}{E_s} \right)$$

Relazione  $\sigma$ - $\epsilon$  per verifiche allo s.l.e.



*M. Taliano*  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Acciaio per c.a.

L'impiego di acciai con elevato rapporto  $f_t/f_y$  assicura regioni plastiche adeguatamente estese, quindi migliore sfruttamento delle caratteristiche meccaniche dei materiali su un tratto più esteso e maggiore capacità di rotazione plastica a parità di massima curvatura plastica raggiunta.

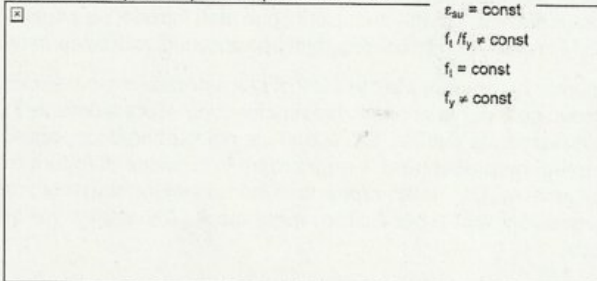
Infatti si consideri la trave della figura, armata con due tipi di acciaio (tipo 1 e tipo 2) di uguale resistenza a trazione  $f_t$ , ma diversa tensione di snervamento  $f_y$ , ad esempio  $f_{y1} > f_{y2}$ . Poiché  $M_{plastico,1} = M_{plastico,2}$  e  $M_{y,1} > M_{y,2}$ , l'estensione della zona plasticizzata per il secondo tipo di acciaio sarà maggiore rispetto a quella ottenuta mettendo in opera il primo tipo di acciaio.


$\epsilon_{su} = \text{const}$

$f_t/f_y \neq \text{const}$

$f_t = \text{const}$

$f_y \neq \text{const}$



 M. Tallano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Acciaio per c.a.

Aderenza

Prove di aderenza: beam test (elevata dispersione dei valori sperimentali)

Controllo geometrico:  
indice di aderenza,  $f_R$

$$f_R = \frac{k \cdot F_R \cdot \sin\beta}{\pi \cdot d \cdot c}$$

La resistenza tangenziale di aderenza di calcolo  $f_{bd}$  vale (D.M. 14/01/2008):

$$f_{bd} = f_{bk} / \gamma_C \quad \text{dove:}$$

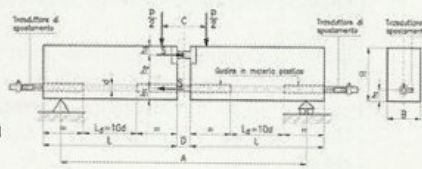
$f_{bk}$  è la resistenza tangenziale caratteristica di aderenza data da:


$$f_{bk} = 2,25 \cdot \eta \cdot f_{ctk}$$

$\eta = 1,0$  per barre di diametro  $\leq 32$  mm

$\eta = (132 - f)/100$  per barre di diametro maggiore.

Nel caso di armature molto addensate o ancoraggi in zona di calcestruzzo teso, la resistenza di aderenza va ridotta dividendola almeno per 1,5.



 M. Tallano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Acciaio per c.a.

In assenza di dati sperimentali diretti, la relazione tra il numero di cicli  $N_R$  che porta a rottura per l'ampiezza di oscillazione  $\Delta\sigma_{Rsk}$  è data da:

$$\Delta\sigma_{Rsk}^m \cdot N_R = \text{costante}$$

(rif. to Model Code 1990)

Tabella 4.11 Coefficienti delle curve di fatica degli acciai ad aderenza migliorata

Barre diritte o piegate con $D \geq 25\phi$	$N^*$	Esponenti della curva		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [MPa]	
		$k_1$	$k_2$	a $N^*$ cicli	a $10^6$ cicli
$\phi \leq 16$ mm	$10^6$	5	9	210	125
$\phi > 16$ mm	$10^6$	5	9	160	95

Per valutare il danno cumulativo di cicli di sollecitazioni variabili, si applica la regola di Miner, secondo la quale la rottura si verifica quando il danneggiamento cumulativo è uguale ad 1:

$$D_i = \frac{n_{Si}}{N_{Ri}} \quad \Rightarrow \quad D = \sum D_i = 1$$

essendo  $n_{Si}$  il numero di cicli relativi alla sollecitazione  $S_i$  (rappresentata dai valori  $S_{c,max}$  e  $S_{c,min}$ ) e  $N_{Ri}$  il numero di cicli che porta a rottura per fatica allo stesso livello di tensione

M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

*Resistenza molto elevata perché ste precompressa e ottenuta per messa in tensione barre e poi bloccata, getto cls, dopo che cls è indurito si elimina il vincolo e la barra tenderebbe a rientrare e il cls tenderebbe a essere compresso → indurimento di uno stato di coazione. A causa dei fenomeni reologici del cls e reologici della barra (rilassamento) avviene perdita di tensione nella barra con il tempo, ma si vede che se la barra è stata sottoposta a tensione elevata, tale rilassamento è circa il 15-20% dopo pochi anni.*

**3. Acciaio per cemento armato precompresso**

Per le armature di precompressione è richiesta:

- elevata resistenza meccanica,
- sufficiente duttilità
- limitata perdita di tensione per rilassamento
- adeguata resistenza a fatica
- adeguata resistenza alla corrosione
- adeguata resistenza per stati di tensione pluriassiali.

Gli acciai per la precompressione sono forniti sotto forma di:

- fili
- trecce e trefoli
- barre

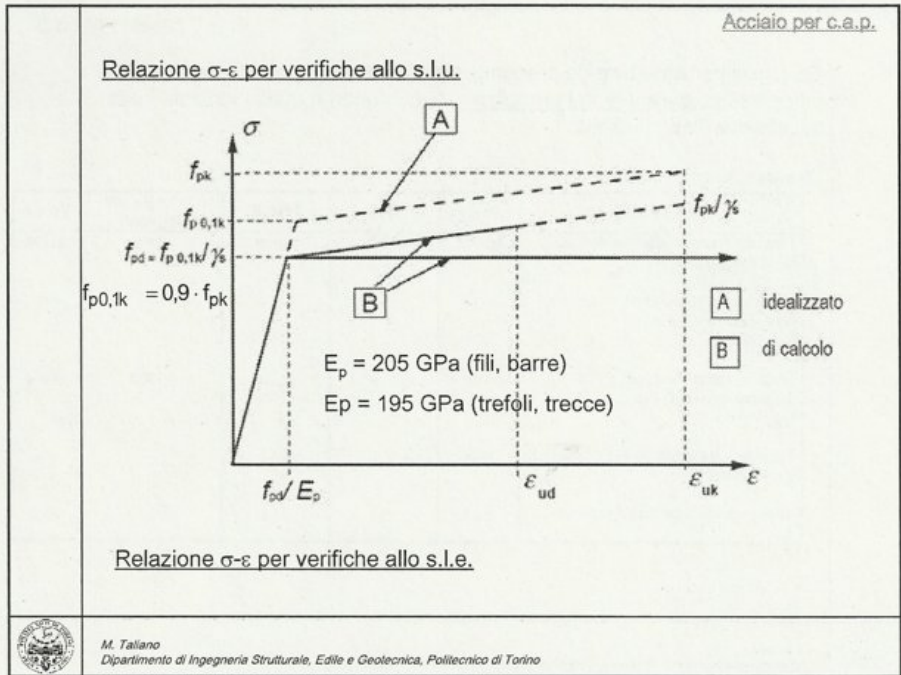
*A ciascuno ≠ valori caratteristici*

*ductilità + buona per avere resistenza usipoi*

*picole deviazioni da T.C e sono + simili quindi devono essere + precisi*

M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

$f_{ptd} = \frac{0,9 \cdot f_{ptk}}{\gamma_s \uparrow 1,15}$   
 valore di progetto



Acciaio per c.a.p.

Fili (wires)

I fili sono prodotti trafilati a freddo di sezione piena, forniti in rotoli. → *vergelle*

Sono ottenuti da una vergella d'acciaio laminata a caldo costituita da acciai ad alto tenore di carbonio (0,4 - 0,8%).

La vergella subisce un trattamento termico (patentamento) mediante il quale la struttura dell'acciaio viene trasformata in perlitite fine che la rende adatta alla trafilatura.

Segue un trattamento chimico (decapaggio) per l'eliminazione dell'ossido superficiale e per l'aggiunta di additivi superficiali che facilitano la trafilatura.

La trafilatura, effettuata a temperatura ambiente, consiste nel far passare la vergella entro la trafila che produce una deformazione plastica con la riduzione progressiva del diametro, fino al 70-80% di quello iniziale. Ciò determina un sensibile incremento della resistenza a trazione dell'acciaio e la perdita del gradino dovuto allo snervamento nella prova di trazione. Più piccolo è il diametro del filo, maggiore è la resistenza.

Segue un ulteriore trattamento termico (rinvenimento) sotto trazione per rendere il prodotto autoraddrizzante e ridurre le perdite per rilassamento.

Infine il prodotto viene avvolto su bobine di diametro non inferiore a 250 volte il diametro del filo, per essere commercializzato.

In alcuni casi, per migliorare l'aderenza con la malta, il filo può essere indentato.

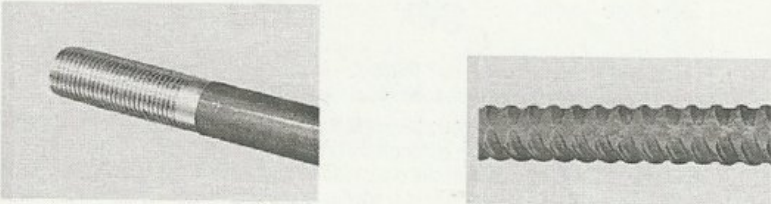
I diametri dei fili variano da 3 mm a 11 mm. Il filo srotolato deve autoraddrizzarsi.

M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Acciaio per c.a.p.

**Barre**

Le barre sono prodotti laminati di sezione piena, forniti in forma di elementi rettilinei. Sono ottenute con acciai ad alto tenore di carbonio per laminazione a caldo. Possono subire un incrudimento a freddo mediante stiramento o torsitura a cui segue un rinvenimento.

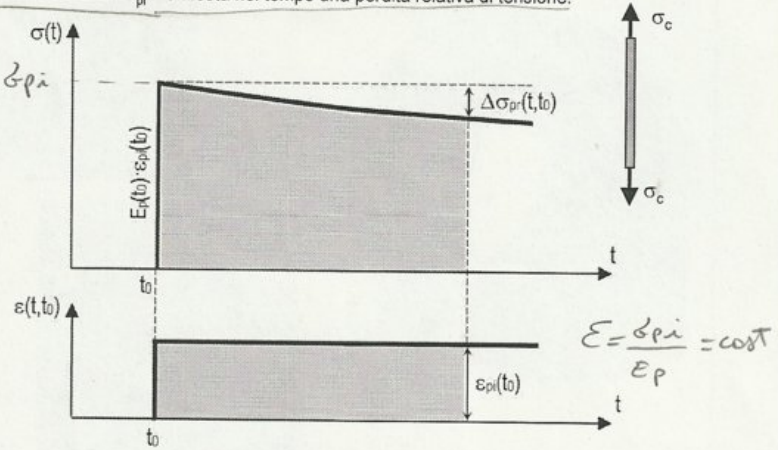


M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Acciaio per c.a.p.

**Fenomeni reologici: rilassamento**

Un provino sottoposto ad una deformazione assiale costante nel tempo corrispondente ad una tensione iniziale  $\sigma_{pi}$  manifesta nel tempo una perdita relativa di tensione.



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Esempio:  $\sigma_{pi} = 1350 \text{ MPa}$   $\rightarrow \mu = \frac{1350}{1860} = 0,725 \rightarrow 72,5\%$   
 $\sigma_{pk} = 1860 \text{ MPa}$   
 interpolazione lineare  $\rightarrow \mu = 72,5\%$ , dunque  $\alpha \rightarrow 3$   
 $\frac{\Delta \sigma_{pr, 1000}(t_{20})}{\sigma_{pi}} \approx 3 \cdot \Delta \sigma_{pr, 1000} \Rightarrow 9\%$  in passato  
 oggi:  $\alpha$  parte formula sotto:  $\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1 - 0,725)} = 3,61$   
 $t = 500000 \text{ ore} \rightarrow t_{20}$

Complessivo  $\alpha$ :

$\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 3 \cdot 3,61$   
 $\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 10,8\%$   
 $\Delta \sigma_{pr} = 10,8\% \cdot 1350$   
 $= 142 \text{ MPa}$   
 $\sigma_p(t_{20}) = 1350 - 142$   
 $= 1208 \text{ MPa}$

Acciaio per c.a.p.

L'EC2 e il D.M.14/01/2008 riportano le relazioni analitiche che forniscono la perdita per rilassamento al tempo generico t (in ore) per una tensione iniziale espressa dal rapporto  $\mu = \sigma_{pi}/\sigma_{pk}$ :

{

Classe 1:

$\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 \rho_{1000} e^{0,7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$

(per fili, trecce, trefoli a normale rilassamento)

{

Classe 2:

$\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \rho_{1000} e^{0,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$

(per fili, trecce, trefoli a basso rilassamento)

{

Classe 3:

$\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \rho_{1000} e^{2,0\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$

(per barre)

Effetto della temperatura sulla caduta per rilassamento (secondo Model Code 2010)

Acciaio per c.a.p.

**Comportamento a fatica**

In assenza di dati sperimentali diretti, la relazione tra il numero di cicli  $N_R$  che porta a rottura per l'ampiezza di oscillazione  $\Delta \sigma_{Rsk}$  è data da:

$$\Delta \sigma_{Rsk}^m \cdot N_R = \text{costante}$$

(rif.to Model Code 1990)

Tabella 4.12 Parametri delle curve di fatica degli acciai da precompressione

Acciaio da precompressione	N*	esponenti		Δσ <sub>Rsk</sub> [MPa]	
		k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	a N <sup>*</sup> cicli	a 10 <sup>6</sup> cicli
Pretensione: armatura rettilinea	10 <sup>6</sup>	5	9	160	95
Post-tensione: cavi curvi	10 <sup>6</sup>	3	7	120	65
Cavi rettilinei	10 <sup>6</sup>	5	9	160	95
Connettori meccanici	10 <sup>6</sup>	3	5	80	30

Per valutare il danno cumulativo di cicli di sollecitazioni variabili, si applica la regola di Miner, secondo la quale la rottura si verifica quando il danneggiamento cumulativo è uguale ad 1:

$$D_i = \frac{n_{Si}}{N_{Ri}} \Rightarrow D = \sum D_i = 1$$

essendo  $n_{Si}$  il numero di cicli relativi alla sollecitazione  $S_i$  (rappresentata dai valori  $S_{c,max}$  e  $S_{c,min}$ ) e  $N_{Ri}$  il numero di cicli che porta a rottura per fatica allo stesso livello di tensione

M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino



Acciaio per c.a.p.

**Acciai per c.a.p. previsti dalla norma EN 10138**

I fili sono contrassegnati con una sigla, es: EN10138-2 (Y) 1770 C 5,0 I

norma di riferimento → (Y) → armatura per precompressione  
 cold drawn wire → 1770 → diametro → 5,0 I

Le trecce e i trefoli sono contrassegnati con una sigla, es: EN10138-3 Y 1860 S 7 15,7 G

strand → S 7 → diametro → 15,7 G  
 per trefolo compattato

Le barre sono contrassegnate con una sigla, es: EN10138-4 Y 1030 H 26 R

hot rolled bar → H 26 R  
 diametro filettatura continua R (Ribbed) o liscia P (Plain)

Tipo di acciaio	Resistenza a trazione $f_{yk}$ [MPa]	Diametro [mm] - (Area della sezione) [mm <sup>2</sup> ]					
		4,5 (10,0)	4,85 (11,64)	6,5 (21,1)	6,8 (23,4)	7,5 (29,0)	8,6 (37,4)
Y1860S3	1860						
Y1860S7	1860	6,9 (29)	7,0 (30)	8,0 (38)	9,0 (50)	9,3 (52)	9,6 (54,8)
		11,0 (69,7)	11,3 (75)	12,5 (83)	12,9 (100)	13,0 (102)	15,2 (140)
		15,7 (150)	16 (156)		0,5"		0,6"

M. Tallano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

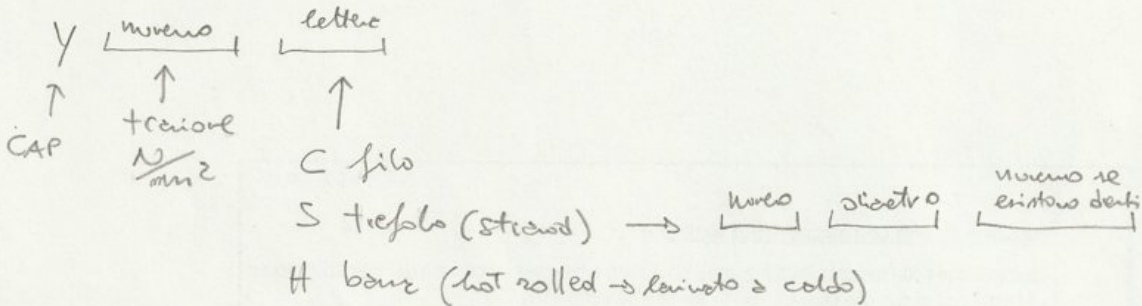



Tabella: a seconda del diametro e classe, viene fissato un area di precompressione, è un area nominale che deve rispettare il produttore (e il progettista deve usare quell'area).

1. Tipologie di strutture precomprese

**Elementi precompressi a cavi post-tesi aderenti al calcestruzzo**


**Elementi precompressi a cavi post-tesi non aderenti al calcestruzzo (e.g. unbonded monostrand prestressing system)**


 M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

1. Tipologie di strutture precomprese

**Elementi precompressi a cavi post-tesi esterni**

**Elementi precompressi tramite stati di coazione indotti**


 M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

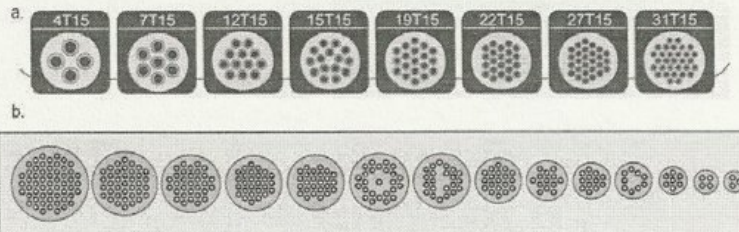


Fig. 4.37 Esempi di formazione di cavi di precompressione (a. Alga Cable, b. Freyssinet)



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

Guaine

Le guaine sono fabbricate con nastri di lamiera d'acciaio laminata a freddo di spessore variabile in funzione del suo diametro (0,2-0,35 mm). Hanno forma corrugata.



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

Per tracciati del cavo ondulati: sfiati per consentire la fuoriuscita dell'aria durante la fase di iniezione. Altra interruzione può essere fatta nei punti di minimo, nei quali possono essere disposte delle valvole di scarico.

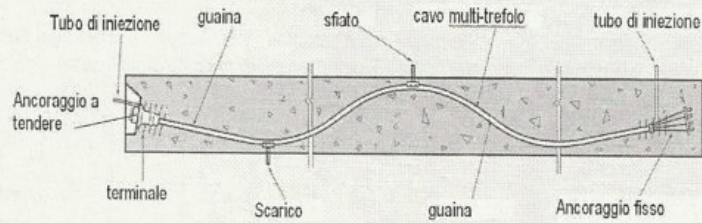


Fig. 4.40 Tracciato di un cavo con un ancoraggio a tendere e un ancoraggio fisso



M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

Ancoraggi attivi e ancoraggi fissi

Le estremità di ogni cavo devono essere ancorate al calcestruzzo mediante apposite apparecchiature che hanno lo scopo di trasferire lo sforzo di precompressione al conglomerato.

Si distinguono: gli ancoraggi a tendere o attivi e gli ancoraggi fissi. Vari sistemi sono possibili a questo riguardo.

L'ancoraggio attivo è composto dal terminale e dalla testa di ancoraggio.

Il terminale, prima del getto, viene fissato al cassero mediante viti che sono rimosse al momento della scasseratura. E' inserito in una nicchia ricavata nel calcestruzzo.



M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

L'armatura di frettaggio può essere parte integrante dell'apparecchio di ancoraggio attivo.

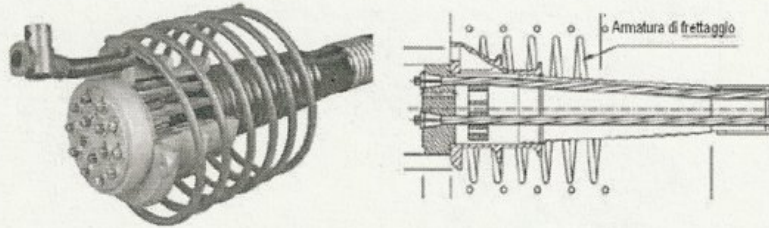


Fig. 4.43 Ancoraggio a tendere Dywidag



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

Per cavi disposti prima del getto del calcestruzzo, sono impiegati ancoraggi fissi di tipo meccanico, per aderenza e a cappio.

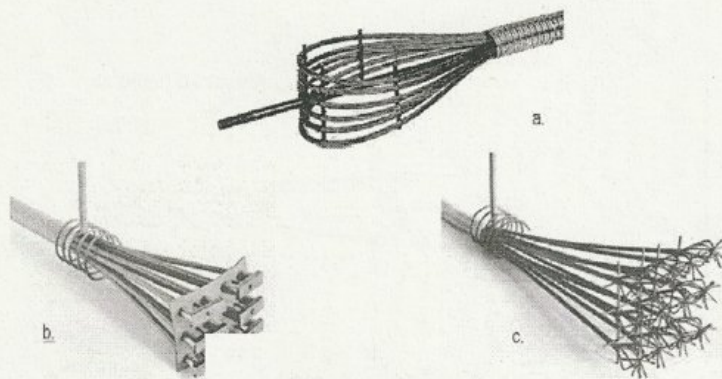
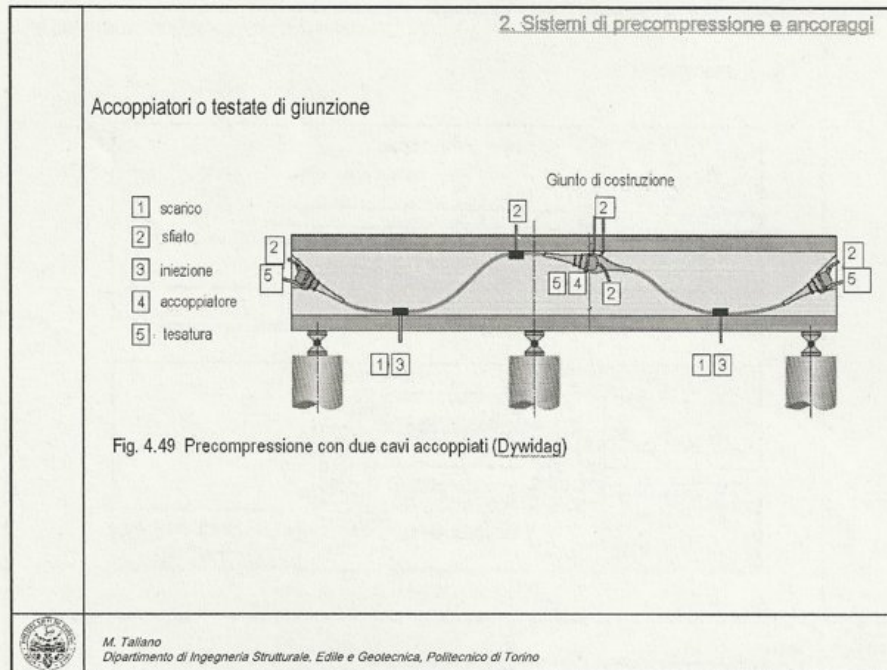
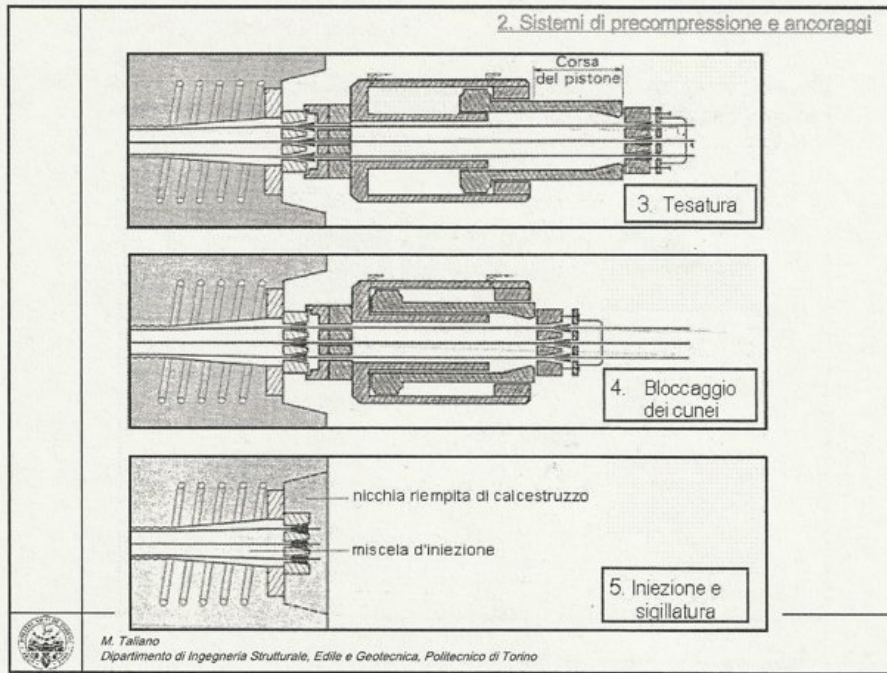


Fig. 4.46 Ancoraggi fissi inseriti nel getto del calcestruzzo (b. c. Alga Cable)



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino



2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

- *tesatura*: un'asta di tensione viene avvitata su un manicotto a sua volta avvitato sulla testa di ancoraggio. Lo sforzo di trazione è applicato tramite un martinetto idraulico. L'allungamento del cavo porta la testa di ancoraggio nella posizione della figura b) ove viene fissata tramite una ghiera di bloccaggio;

- *iniezione*: si procede quindi all'iniezione della malta nella guaina e la protezione della testata.

**A lavori ultimati**

- Piastre di ripartizione
- Spessori d'appoggio
- Testa d'ancoraggio

Sigillatura della nicchia

**b.**

M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

Sistemi per post-tensione con barre

Solitamente usato per barre singole. Il sistema presenta una guaina e due ancoraggi di estremità. L'ancoraggio avviene tramite un dado che si avvita sull'estremità della barra e contrasta contro una piastra di ancoraggio.

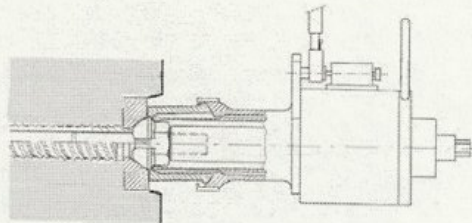
**a.** ancoraggio attivo

**b.** ancoraggio fisso

**Fig. 4.55** Sistemi di ancoraggio di barre (a. barra a filettatura continua, b. barra liscia) (Dywidag)

M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

2. Sistemi di precompressione e ancoraggi



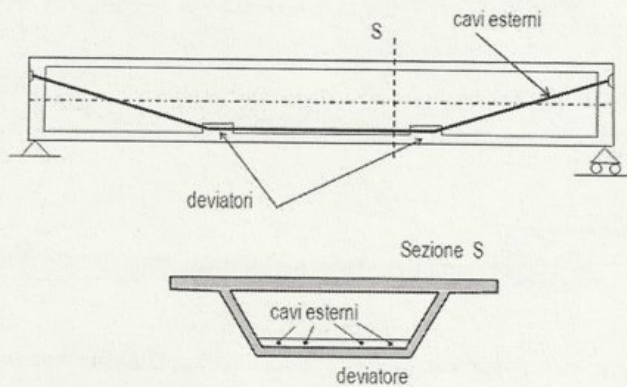
Martinetto per la tesatura di una barra



M. Tallano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

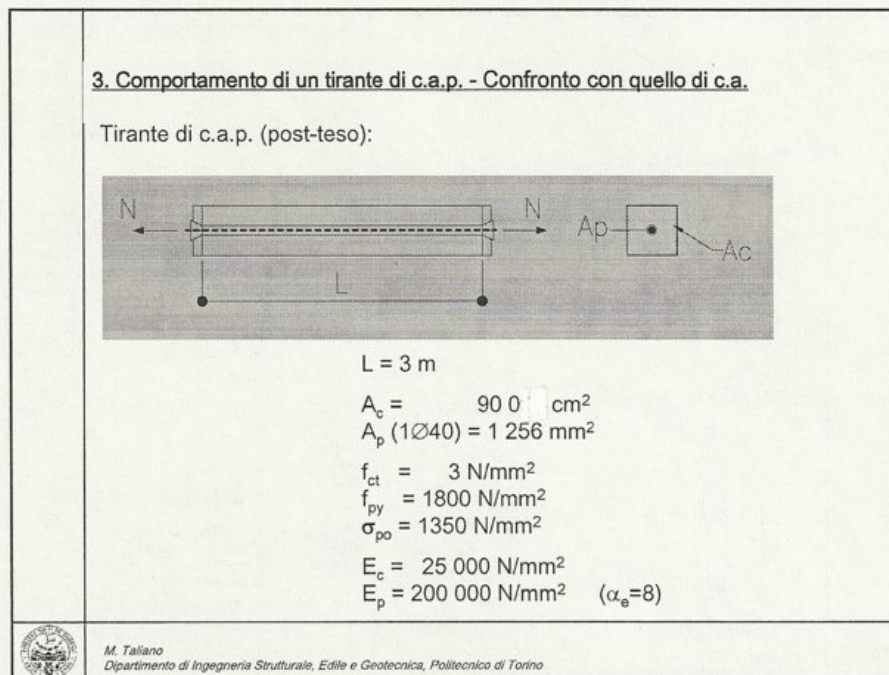
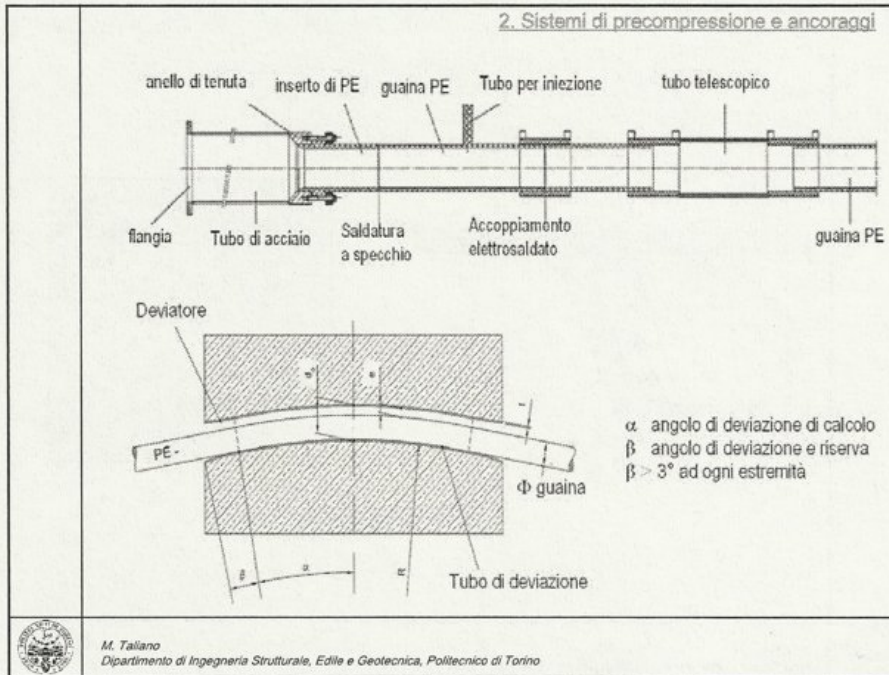
2. Sistemi di precompressione e ancoraggi

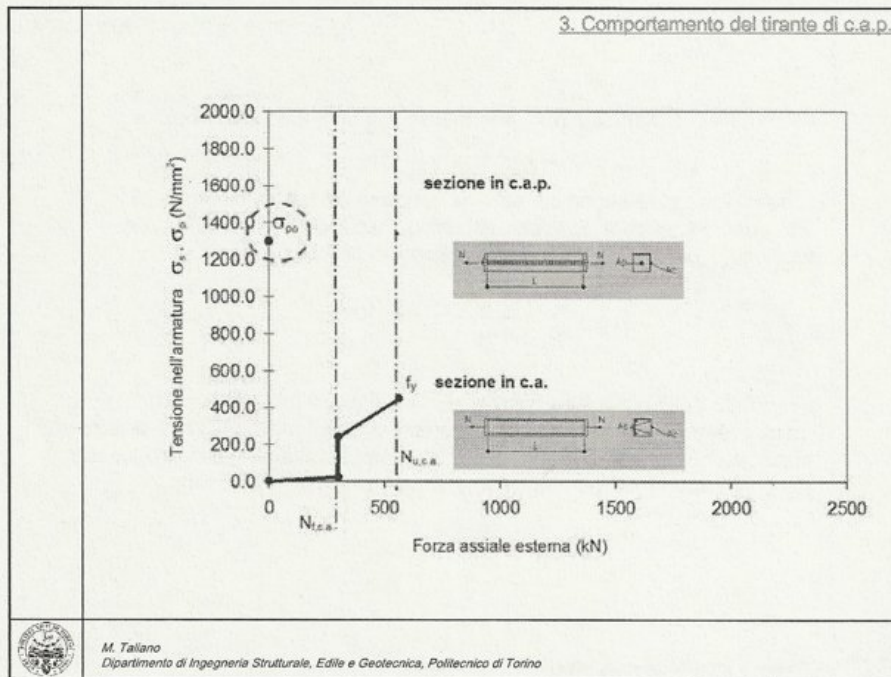
Sistemi per post-tensione a cavi esterni



M. Tallano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino







3. Comportamento del tirante di c.a.p.

Successivamente, si applica una forza assiale gradualmente crescente.

Per  $N < N_{f,c.a.p.}$  (stadio I-non fessurato) la sezione è interamente reagente con:

- tensione sul calcestruzzo:  $\sigma_c = \sigma_{c0} + \frac{N}{A_c + nA_p}$
- tensione sull'acciaio:  $\sigma_p = \sigma_{p0} + \frac{nN}{A_c + nA_p}$
- allungamento dell'elemento:  $\Delta L = \frac{NL}{E_c (A_c + nA_p)}$

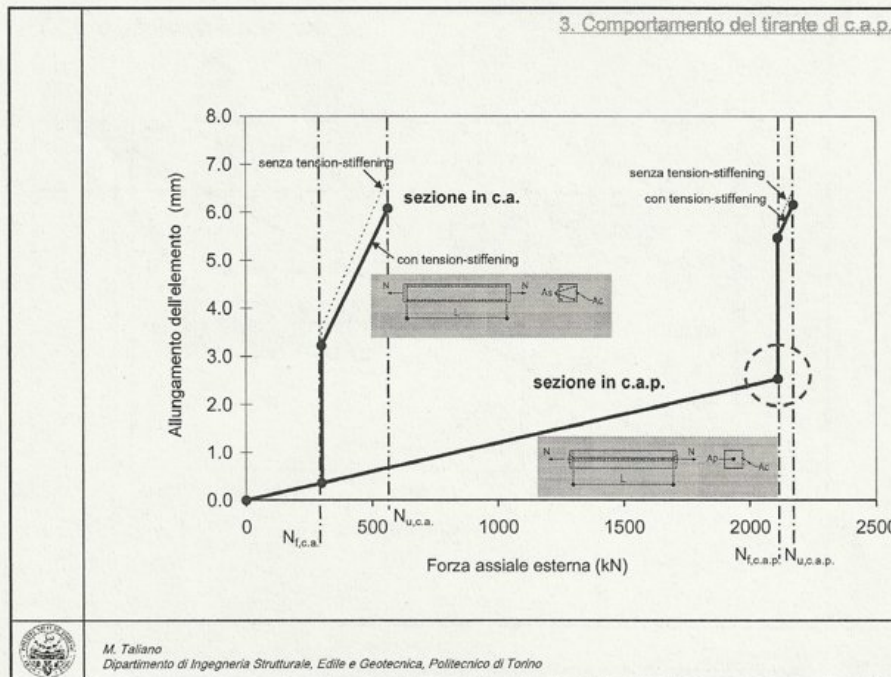
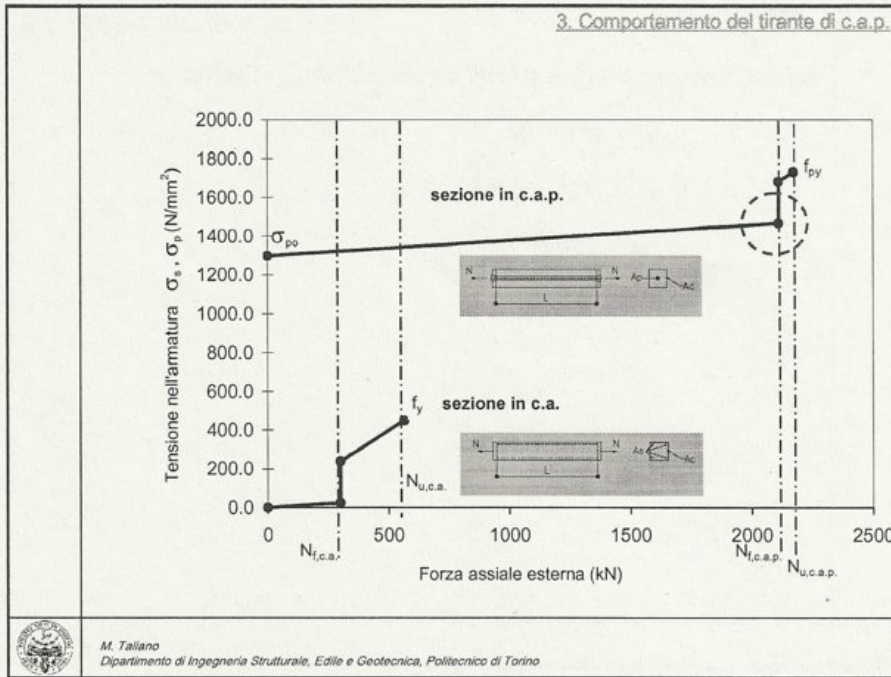
La decompressione della sezione si verifica per un valore di forza assiale  $N_{dec}$  tale che  $\sigma_c = 0$ , ossia

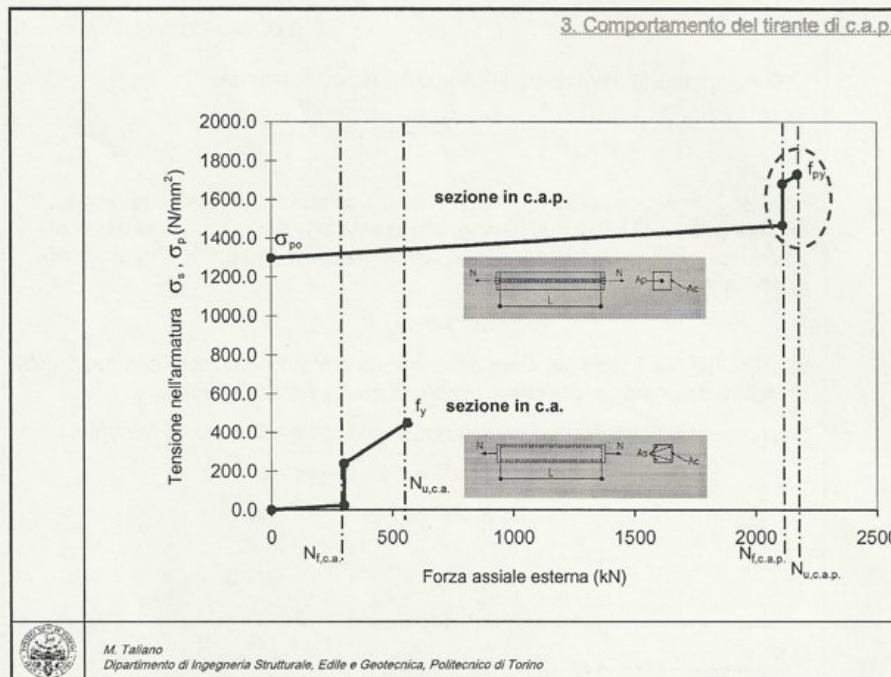
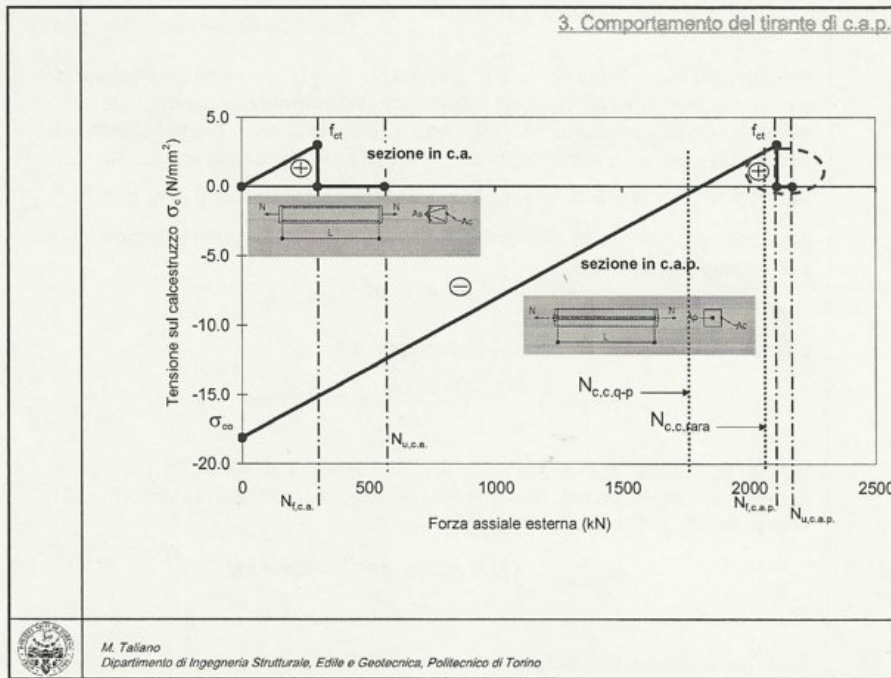
$$N_{dec} = -\sigma_{c0} \cdot (A_c + nA_p) = -(-18,84) \cdot 100\,048 \cdot 10^{-3} = 1885 \text{ kN}$$

La fessurazione della sezione si verifica per un valore di forza assiale  $N_{f,c.a.}$  tale che  $\sigma_c = f_{ct}$ , ossia :

$$N_{f,c.a.p.} = (f_{ct} - \sigma_{c0}) (A_c + nA_p) = [3 - (-18,84)] \cdot 100\,048 \cdot 10^{-3} = 2185 \text{ kN}$$

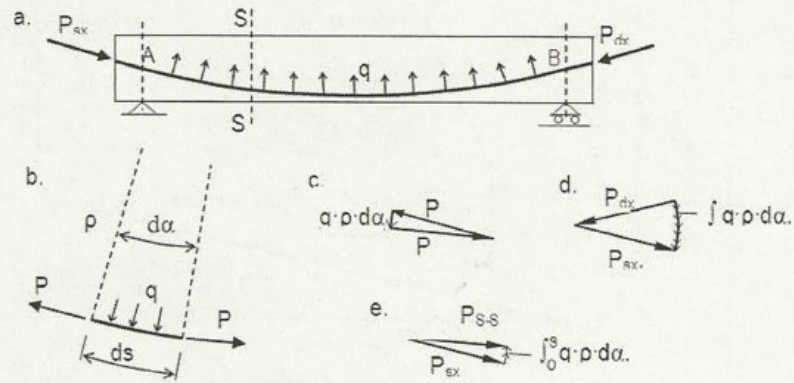
M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino





#### 4. Concetti di base della precompressione

Effetto della precompressione su una trave isostatica



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

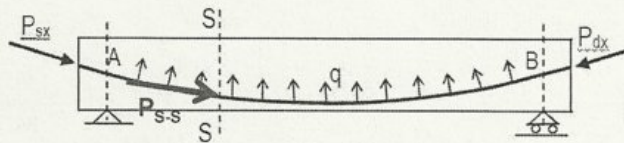
Se si considera un tronco infinitesimo di cavo di lunghezza  $ds$  e raggio di curvatura  $\rho$ , sotteso da un arco  $d\alpha$  le azioni agenti su di esso dovranno essere in equilibrio. Pertanto dovrà essere:

$$P \cdot \sin d\alpha - q \cdot ds = 0$$

e quindi essendo  $d\alpha$  un angolo piccolo e

$$ds = \rho \cdot d\alpha \text{ si ha } P \cdot d\alpha = q \cdot \rho \cdot d\alpha \text{ da cui } q = \frac{P}{\rho}$$

In ogni sezione di una struttura isostatica l'effetto della precompressione può essere considerato come quello di una forza concentrata applicata a livello del cavo e diretta secondo la retta tangente al cavo e di intensità pari a quello presente nel cavo in corrispondenza della sezione

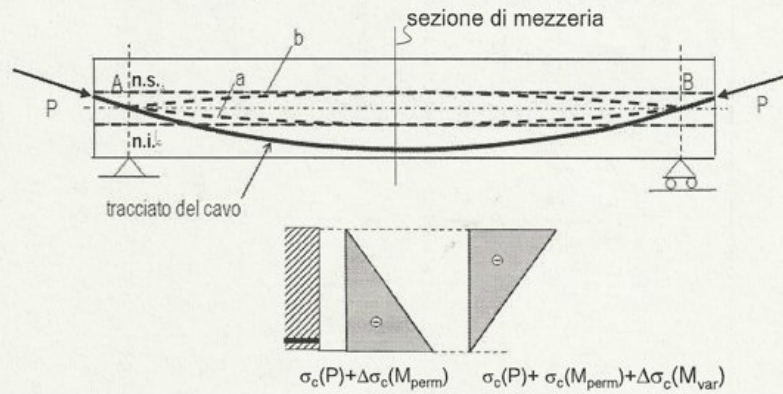


M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

*Curva delle pressioni*

Rappresenta il luogo geometrico dei punti di applicazione delle successive risultanti.

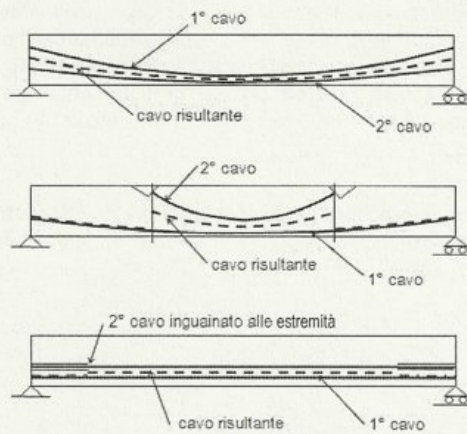
In assenza di altre azioni esterne, nelle strutture isostatiche il tracciato del cavo coincide con la curva delle pressioni.



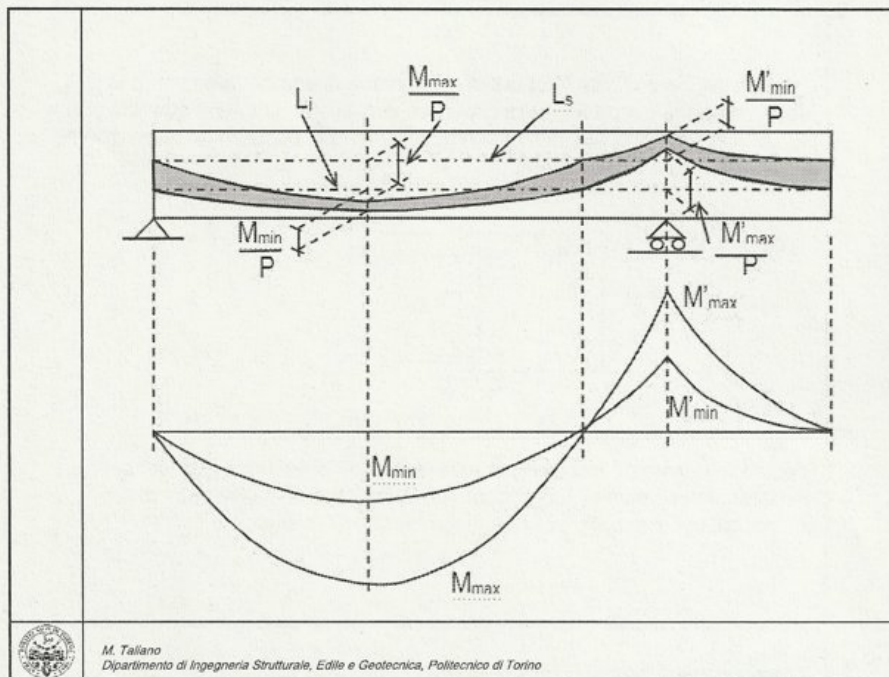
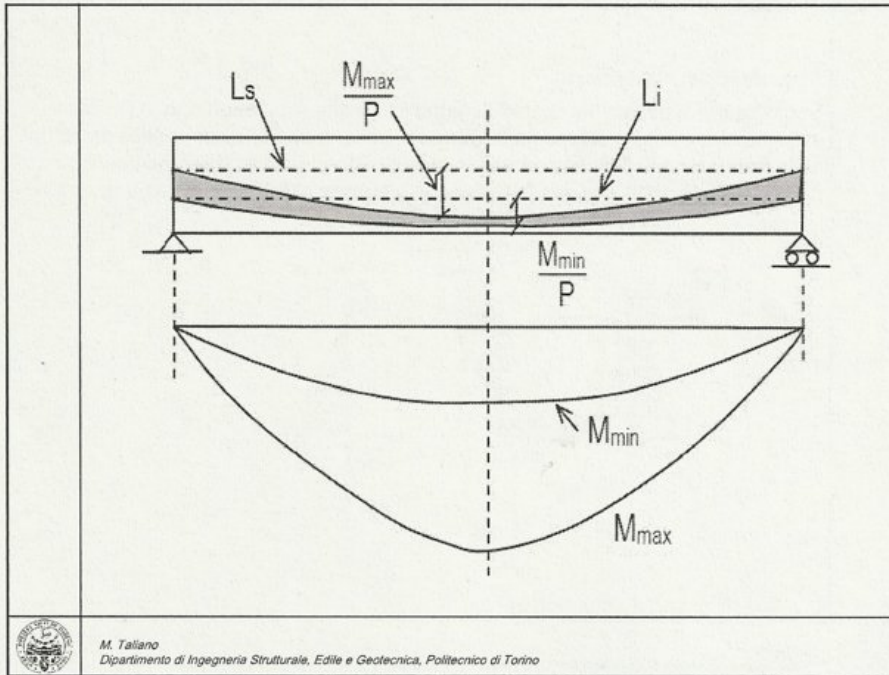
M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

*Cavo risultante*

Rappresenta il luogo geometrico dei punti di applicazione della risultante degli sforzi agenti nei diversi cavi di precompressione.



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

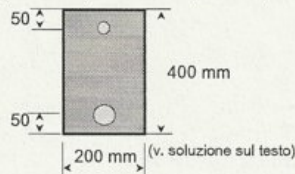


**Calcolo delle tensioni sulla sezione**

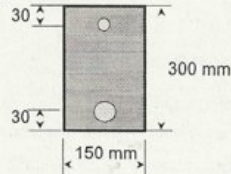
- metodo delle forze concentrate
- metodo degli stati di coazione

$$\lambda = \frac{\alpha}{A_{omog}} \sum \bar{\varepsilon}_{pi} \cdot A_{pi} \quad \mu = \frac{\alpha}{J_{omog}} \sum \bar{\varepsilon}_{pi} \cdot y_{pi} \cdot A_{pi}$$

Applicazioni (sezioni di c.a.p. a cavi pre-tesi):



$A_{p,sup} = 150 \text{ mm}^2$   
 $A_{p,inf} = 400 \text{ mm}^2$   
 $\sigma_{p0} = 1300 \text{ MPa}$   
 $E_c = 30 \text{ GPa}, E_p = 200 \text{ GPa}$



$A_{p,sup} = 90 \text{ mm}^2$   
 $A_{p,inf} = 225 \text{ mm}^2$   
 $\sigma_{p0} = 1000 \text{ MPa}$   
 $E_p = 200 \text{ GPa}, \alpha_s = 6$



M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

**Esercizio n. 1**

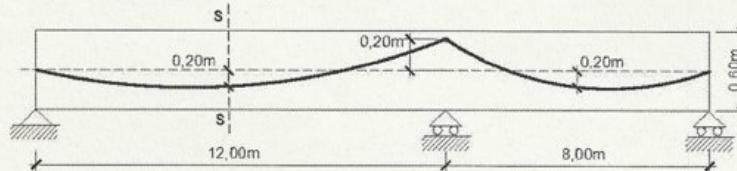
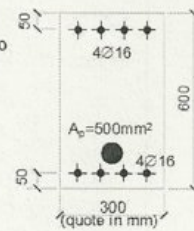
Data la trave parzialmente precompressa con tracciato schematico del cavo e sezione costante indicati in figura, determinare il massimo momento flettente di calcolo allo stato limite ultimo dovuto ai carichi esterni che è possibile applicare nella sezione di mezzeria S-S della prima campata (trascurare le perdite di tensione lungo cavo).

Materiali:

- calcestruzzo: C30/37
- acciaio ordinario: B450C
- acciaio da precompressione:  $f_{ptk} = 1860 \text{ N/mm}^2$

Altri dati:

- tensione di precompressione:  $\sigma_p = 1400 \text{ N/mm}^2$



M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

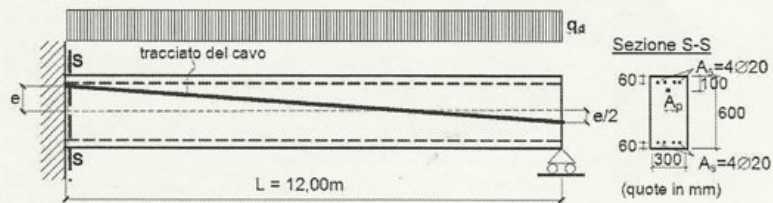


**Esercizio n. 4**

Data la trave iperstatica precompressa di figura,  
 ⇒ effettuare il calcolo elastico delle sollecitazioni allo stato limite ultimo;  
 ⇒ verificare la sezione S-S allo stato limite ultimo per flessione.

Altri dati:

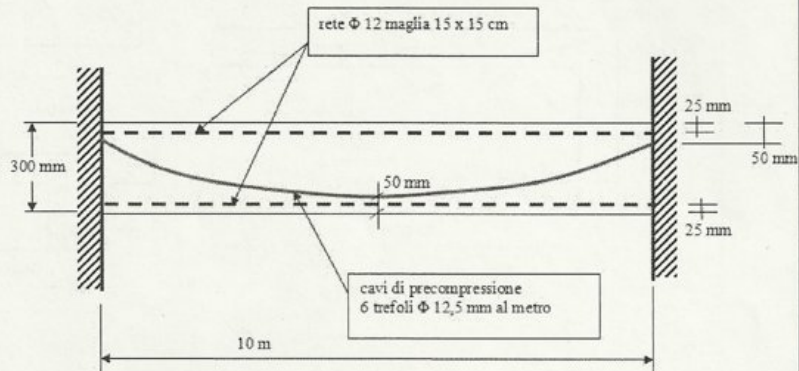
- calcestruzzo ( $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ ), acciaio ordinario (B450C),
- acciaio in trefoli ( $f_{ptk} = 1860 \text{ N/mm}^2$ ,  $\epsilon_{pk} = 3,5\%$ );
- armatura di precompressione  $A_p = 600 \text{ mm}^2$  (4 trefoli  $\varnothing = 15 \text{ mm}$ );
- tensione iniziale di tesatura del cavo:  $\sigma_{p0} = 1300 \text{ N/mm}^2$ ;
- eccentricità:  $e = 200 \text{ mm}$ ;
- carico totale allo stato limite ultimo:  $q_d = 25 \text{ kN/m}$ .



M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

**Esercizio n. 5**

Verificare allo stato limite ultimo per flessione le sezioni di incastro e di mezzera del solaio in getto pieno, incastrato alle estremità, precompresso con cavi aderenti a tracciato parabolico.  
 Calcestruzzo  $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ , acciaio da precompressione  $f_{ptk} = 1860 \text{ MPa}$ , acciaio ordinario B450C.  
 Tensione di tesatura del cavo pari a  $1350 \text{ MPa}$  (assumere  $\gamma_s = 1$ ).  
 Azioni: peso proprio, carico permanente portato fisso  $3 \text{ kN/m}^2$ , carico variabile  $14 \text{ kN/m}$



M. Taliano  
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

All'introduzione della forza di precarpressione ho lo scorcio automatico. La forza in mezzo è eccentrica, produce una coppia di trasporto  $\rightarrow$  la trave si inflette verso l'alto (controspinta alla struttura) senza più compensare gli effetti dei carichi successivi gravitazionali.

#### - CAVI POST-TESI (UNBONDED)

Cavi non aderenti nel cls. Situazione che si verifica alle piastre: la precarpressione  $\uparrow$  la resistenza ma  $\downarrow$  le dimensioni  $\square$  la resistenza è incrementata del 30%.

Post-tesi: il cavo precarpresso è formato multi-strand (trefolo)

Piastre: cavi ravvicinati tutti monostand, essi sono formati già all'interno della guaina  $\rightarrow$  all'interno di uno strato grosso che fa sì che non avvenga aderenza cls-ancora.

#### - CAVI POST-TESI ESTERNI

Caricamento di strutture esistenti  $\rightarrow$  precarpressione esterna

Tramite ancore vengono messi in tensione i cavi con guaina che sono esterni al cls, no aderenza (punti travi e cerniere). Ancorare il cavo alla str. che subisce forze concentrate  $\square$  dove ha derivazione del cavo  $\rightarrow$  zone di discontinuità più pericolose perché non ha il comportamento alla Saint-Venant.

#### - STATI CARICAZIONE

martinetto piatto che tende a espandersi e determina la precarpressione. A causa dei fenomeni reologici essa tende a perdersi nel tempo  $\rightarrow$  precarpressione non è stabile nel tempo.

Sistemi di precarpressione e ancoraggi:

#### - post tensione con trefoli

L'ancora viene inserita all'interno del cavo tramite unchingegno che scivola la bobina e la nocchia spingi trefolo.

guaine: realizzate con lamine acciaio o di polietilene: hanno una forma corrugata per avere una certa rigidità, no a seguito dell'iniezione  $\uparrow$  l'aderenza con il cls.

L'area trasversale deriverebbe almeno il doppio dell'area totale dei trefoli costituenti.

Armatura di frettaggio non ancora approvato CE (ha solo il benestare tecnico). Viene posta a spirale: in seguito all'applicazione delle forze di precompressione, fino a una certa distanza le tensioni non sono regolarizzate (casi de Saint-Venant) avrà una zona intermedia di discontinuità. Le tensioni confluiranno all'interno del ds e si diffonde su tutto l'elemento,  $L \sim H$ . All'introduzione delle forze ha max deviazione delle linee isostatiche di compressione che sono associate alle linee isostatiche di trazione.

Estremità fissa: gli ancoraggi fissi vengono messi prima del getto di ds a coppia  $\rightarrow$  bloccano l'armatura di precompressione oppure netto un sistema di teste di ancoraggio usi i nocchietti bloccano fin da subito l'armatura di P (simile alla zona attiva).

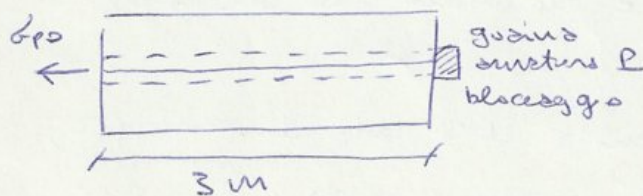
Giunti della guaina denominati decoppiatori.

Post-tensione con fili: sono sistemi più piccoli

Bare  $\rightarrow$  geotecnica  $\rightarrow$  tiranti

Bare passive: non viene introdotta una forza di precompressione iniziale ma se avviene uno spostamento essa agisce.

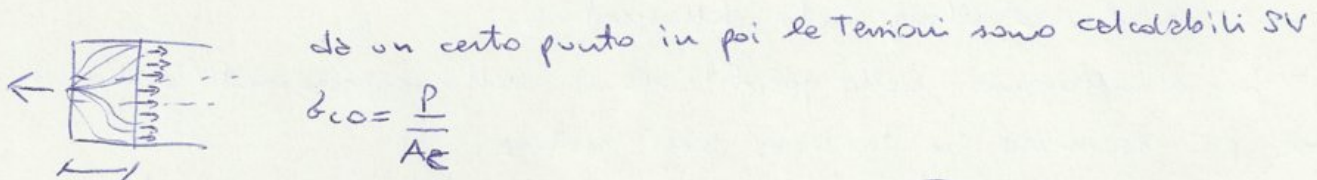
• Concetto di calcolo



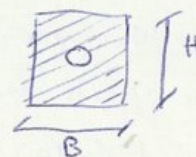
guaina separata dal ds  
 $\sigma_{p0} = 1350 \text{ MPa}$  tensione applicata al tempo  $t_0$

$P = \sigma_{p0} \cdot A_p$  forza di precompressione che deve applicare il viterietto

Il viterietto contrasta le forze regolarizzate



$A_c$  è l'area reggente è il ds dotato di fono



$A_c = 900 \text{ cm}^2 = B \cdot H - A_{\text{guaina}}$

$A_{\text{guaina}} = 2 \cdot A_p$  (due capi di precompressione)

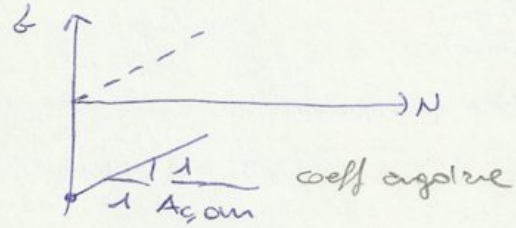
$$\Delta \sigma_c = \frac{N}{A_{c,om}} \quad \text{de suo stato } \sigma_{c0} \rightarrow \sigma_c = \sigma_{c0} + \Delta \sigma_c$$

↳ tensione iniziale

Stessa cosa nell'ambito di precompressione.

$$\Delta \sigma_p = d \varepsilon \frac{N}{A_{c,om}} + \sigma_{p0}$$

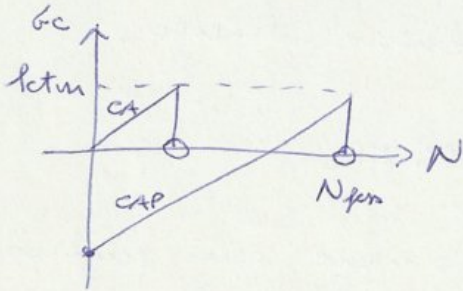
All'  $\uparrow \sigma$ ,  $\uparrow$  il valore di  $N$



Il tratto è parallelo se avessimo lo stesso area di  $A_c$  nel CA.  
Punto dell'origine.

CAP si sposta in zona compressa, lo stato compresso iniziale è lo stato di coazione.

Il comportamento si mantiene tale fino al raggiungimento dell' $N_{fess}$ .



La tensione sarà la stessa, perché la fessurazione avviene a  $\sigma_c = fctm$  ma lo sforzo normale causato la fessurazione sarà molto maggiore, a parità di resistenza di cls.

Dalla formula di primo netto  $N_{fess}$  con  $\sigma_c = fctm$

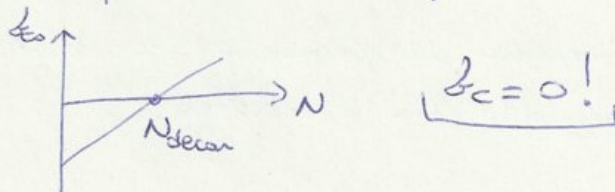
$$\sigma_c = \sigma_{c0} + \Delta \sigma_c$$

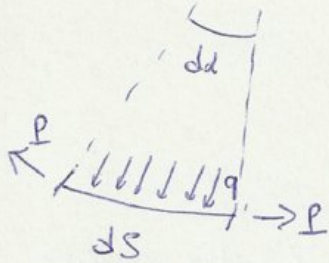
$$fctm = \sigma_{c0} + \frac{N_{fess}}{A_{c,om}}$$

$$N_{fess} = (fctm + |\sigma_{c0}|) \cdot A_{c,om}$$

Risultato maggiore di quello a CA perché c'è il tensore  $\sigma_{c0}$  → stato di compressione iniziale.

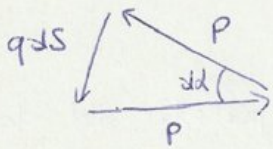
Decompressione: è l'intercetta con l'asse delle  $N$ , da lì in poi il tirante in CAP si comporta come l'cuselogo in CA con aumento ad alto limite elastico.





Per effetto delle due forze, il cavo tende a linearizzarsi ma esso è impedito dalla nascita di tensioni radiali  $q$ .

Per sapere quanto vale  $q$ : equilibrio del tratto di struttura:



$$ds = \rho \cdot dd \rightarrow q \rho dd$$

$\rho$  = raggio di curvatura

Per l'equilibrio le tensioni  $q$  sono bilanciate da  $P$  inclinate da  $\Delta$  verso di infinitesimi di ordine superiore al primo

$$q \cdot \rho \cdot dd = P dd \rightarrow q \cdot \rho = P \rightarrow q = \frac{P}{\rho}$$

rappresenta il carico equivalente che mostra l'effetto della precarpressione.

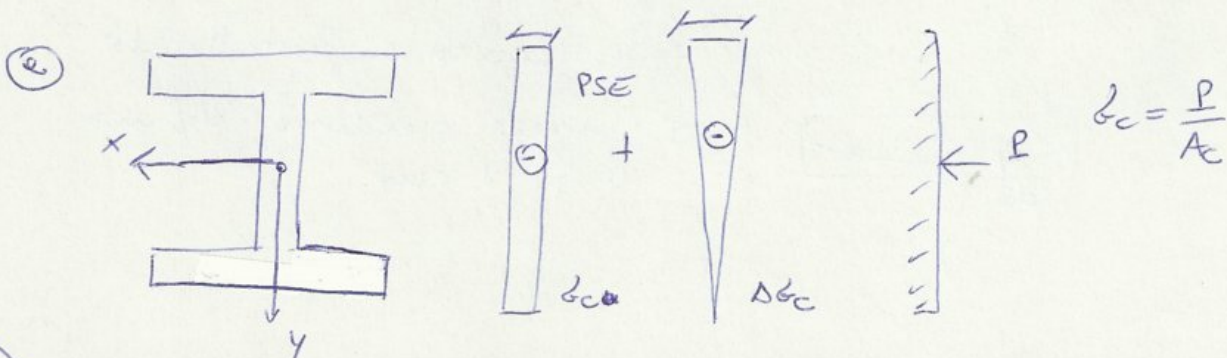
È uno stato di tensione introdotto, non dà luogo a reazioni vincolari.

Stato di tensione non congruente ma compatibile con i vincoli esterni (non fa nascere delle isostatiche di precarpressione). La comparsa di deformazioni elastiche fa nascere delle tensioni interne che produce uno stato tensionale autoequilibrato:

$$\text{ovvero } \int_A \sigma_z \cdot dA = 0$$

In ogni sezione di una struttura isostatica l'effetto della precarpressione può essere considerato come quello di una forza concentrata a livello del cavo e diretta secondo la retta tangente al cavo e di intensità pari a quello presente nel cavo in corrispondenza della sezione.

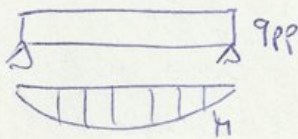
Ipotesi: trascurare la componente verticale della  $F_{\text{precarpressione}}$ , solo componente  $H$ . Sezione doppia  $T$  cui considero 3 elementi separati:



Momento utile aggiunto: quello de fessio per far partire il peso proprio.  
 Tale calcolo viene fatto solo nella sezione più sollecitata (nerenia) le  
 altre distribuzioni saranno trapezie.

Questo ci permette di orientare il braccio di leva della risultante  
 di S.U.

cdp: totalità dei punti di applicazione delle successive risultanti  
 cdp per strutture isostatiche è il tracciato del capo.



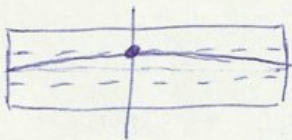
determino uno spostamento verso l'alto della  

$$cdp = \frac{M_p + M_{pp}}{P} = e^*$$
 quando considero la  
 precompressione e il peso  
 proprio.

$$e^* = \frac{P \cdot e + M_{pp}}{P} = e + \frac{M_{pp}}{P}$$

$M_{pp}$  è il momento minimo cui può essere sottoposta la str.

Ma quando agisce  $M_{max}$  (in esercizio è combinazione carico caratteristico:  
 tutti i carichi permanenti + variabili) per  $M_{max}$  colpi:



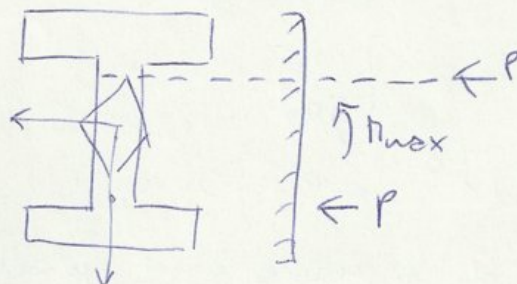
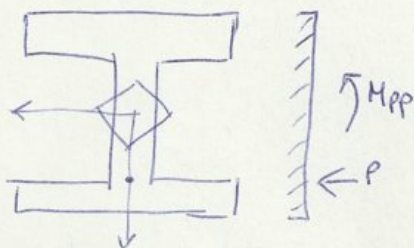
interseca in nerenia l'estremo superiore della  
 regale di nocciolo.

Non ottengo la fermazione della sezione più sollecitata.

Strutture a precompressione integrale: non considero eventuali snature  
 presenti nelle strutture di fuori della sicurezza.

pericolose: se considero anche quelle snature.

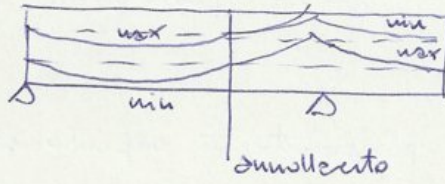
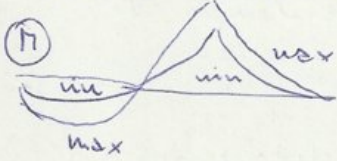
$M_{min}$



Avrò una distribuzione a trapezio se privilegio una delle due curve.  
se quella inferiore



$Z_{max}$  o momento negativo si invertano



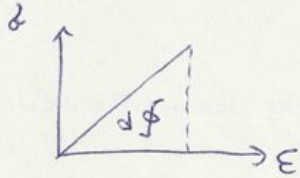
Vedi disegni slide

• Stabilità della precaricazione

Viene voluta l'energia potenziale elastica  $\phi$  che si genera nella struttura per la messa in tensione dell'armatura, e legato allo stato di coazione.

$\uparrow$  energia,  $\uparrow$  stabilità

3 casi slide su come può essere introdotta la precaricazione.



$$d\phi = \frac{1}{2} \sigma \cdot \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma^2}{2E}$$

$$\phi = \int_V \frac{\sigma^2}{2E} dV \quad \text{energia potenziale elastica totale}$$

$$\bar{\phi} = \frac{\sigma_c^2}{2E_c} A_c \cdot l \quad \text{quella del cls}$$

$$\bar{\phi} = \frac{\sigma_p^2}{2E_p} A_p \cdot l \quad \text{quella della messa in tensione del corno}$$

$\bar{\phi}$  totale

Caso C: mediante martinetti idraulici non si ha il tensore legato alla precaricazione, solo tensore sul cls.

Svolgendo i calcoli (?)

$$\bar{\phi}_a = 20,65 \text{ kNm}$$

$$\Delta l_p = 24,3 \text{ mm}$$

$$\bar{\phi}_b = 10,81 \text{ kNm}$$

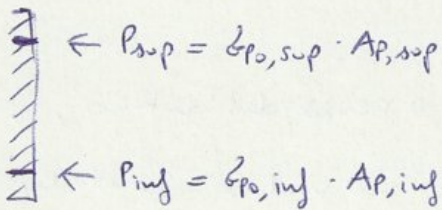
$$\Delta l_p = 13,15 \text{ mm}$$

$$\bar{\phi}_c = 0,97 \text{ kNm} \quad (\text{comune in tutti i casi per il cls})$$

$$\Delta l_c = \frac{18}{25000} \cdot 3000 = 2,16 \text{ mm} \quad \text{comune in tutti gli elementi}$$

## Metodo delle forze:

consiste nel determinare lo stato di tensione inducendo a rappresentare l'effetto della precarpressione tramite forze concentrate sul baricentro dell' struttura precarpressa.



pre-tesi:  $A_p$  solo di precarpressione no lante.

Le ancore risultano aderenti al cls fin da subito e quindi si usano le proprietà geometriche della sezione omogeneizzata dove l'ancora precarpressa interviene con contributo  $d_e (A_c + d_e A_p)$

post-tese: sono spesso accompagnate da ancore lante.

Lo tensione iniziale indotta dalla precarpressione  $\sigma_{po}$  è valutata in diversi istanti, cioè a righe dovrebbero essere distinte:

- istante della messa in tensione del cavo: il nostretto esercita una forza all'estremità  $\rightarrow$  tensioni lungo il cavo
- rientro ancoraggi: toglie il nostretto, interviengono i cunei di bloccaggio e la tensione si riduce di un quantitativo.

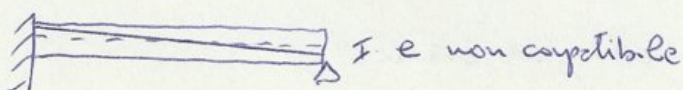
Si tratta di ancore non aderenti, messa in tensione e rientro degli ancoraggi sulla sezione di riferimento: da interessante reggente più ancore aderenti ed eventuale con fono  $\rightarrow$  area della griglia.

## Metodo degli stati di tensione:

usato solo per strutture a cavi pre-tesi perché il comportamento della str è più aderente a questa tipologia.



$$\sigma_{po} = \frac{\sigma_{po}}{E_p}$$



sempre non congruate

Lo deformazione è localizzato a livello del pto  $\rightarrow$  baricentro dell' area di precarpressione.



$$S_{om, b_{inf}} = \frac{BH^2}{2} + (d_E - 1) A_{p, inf} \cdot 30 + (d_E - 1) A_{p, sup} \cdot 270 =$$

$$= \frac{150 \cdot 300^2}{2} + 5 \cdot 225 \cdot 30 + 5 \cdot 90 \cdot 270 = 6905250 \text{ mm}^3$$

baricentro =  $h_G = 148,3 \text{ mm}$

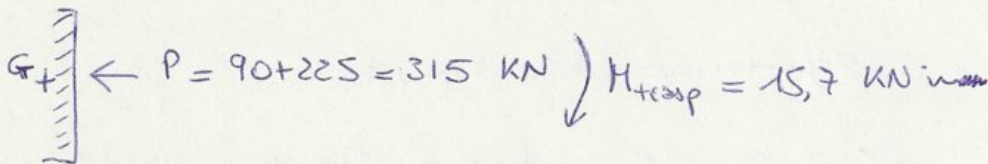
$I_{x, om} = 3,6004 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

Forze interne concentrate:

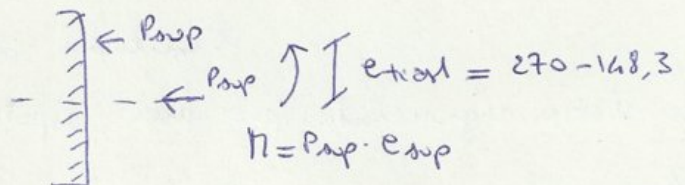
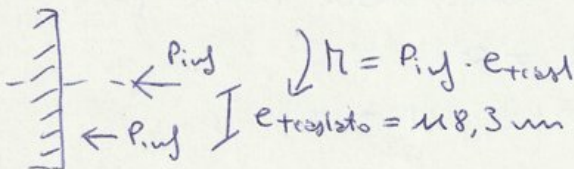
$\leftarrow P_{sup} = \rho_{po} \cdot A_{p, sup} = 1000 \cdot 90 \cdot 10^{-3} = 90 \text{ kN}$

$\leftarrow P_{inf} = \rho_{po} \cdot A_{p, inf} = 1000 \cdot 225 \cdot 10^{-3} = 225 \text{ kN}$

Esse costituiscono un sistema vettoriale equivalente (ridotto al baricentro con il momento di trasporto).



ottenuto mediante:



$M = 26,6 \text{ kN} \cdot \text{mm}$  (antiorario)

$M = 11,0 \text{ kN} \cdot \text{mm}$  (orario)

Calcolo delle tensioni: [formulare  $\sigma_N$ ]

$$\sigma_c = \frac{P_{tot}}{A_{c, om}} + \frac{\overset{\text{ricompensino}}{\sum P_i \cdot e_i}}{I_{x, om}} y$$

$$= \frac{315}{46575} + \frac{15,7 \cdot 10^3}{3,6004 \cdot 10^8} \cdot 148,3 = -13,23 \text{ MPa}$$

tensione usata di compressione

$\Delta \sigma_p = d_E \sigma_c$   
 posto a livello dell'armatura

Rappresenta la perdita di tensione elastica della sola sezione precomprensata con pre-tensioni indotte dalla deflessione elastica dell'elemento.

Effetto della precompressione  $\geq$  livello della struttura:

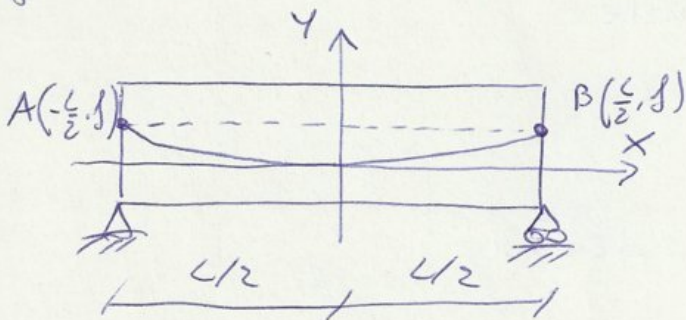
- isostatica: non si effettuano altri calcoli perché lo stato di coazione non modifica nulla  $\rightarrow$  il calcolo tensionale è sufficiente per determinare le tensioni nelle varie sezioni.
- iperstatica: si ha un effetto secondario (isostatica) ma anche uno iperstatico. Risolvibile con:
  - metodo delle forze PCU
  - corichi equivalenti

• Metodo delle forze: si considera l'iperstatica e si rimuove il vincolo sovrabbondante, si mettono i carichi sull'isostatica associata e su un'altra isostatica l'incognita iperstatica pari a 1.

Corichi equivalenti: l'effetto della precompressione attraverso i

corichi equivalenti:  $q = P \cdot \left(\frac{l}{r}\right)$  costante nel caso

generale; con almeno un andamento parabolico.



$f$  = fleccia del cavo: fra il cavo nella sezione di rinvio e lo congiunge i centri delle sezioni di estremità.

$y = e x^2$  eq. della parabola del cavo.

$$f = e \frac{l^2}{4} \rightarrow e = \frac{4f}{l^2}$$

$y = \frac{4f}{l^2} x^2$  è l'eq. della parabola in funzione della fleccia

$\frac{1}{r}$  può essere inteso come la derivata seconda della funzione:

$$2 \cdot \frac{4f}{l^2} = \frac{1}{r} \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{8f}{l^2} \text{ ha validità generale}$$

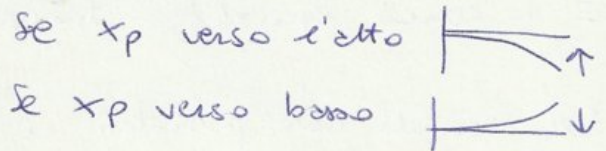
$$\cancel{\Sigma R_e \delta_B} + \Sigma F_e \cdot \delta_B = \int_L \pi_A \frac{1}{r_b} dz + \text{trascuro i termini di NeT}$$

$$0 = \int_L \pi_a \frac{\pi_b}{EI} dz$$

$\pi_b$  = effetto isostatico della prec compressione  
 $\pi_{op} = P \cdot e$   
 Sezione per sezione, è l'effetto di un cui se la str uscente isostatica

effetto ipustatico della + prec compressione

$\pi_{xp} = \pi_e \cdot x_p$   
 Sulle travatura principale dovuta all'incognita iperstatica:



Inserendo nell'eq del PLV:

$$0 = \int_L \pi_a \frac{\pi_{op} + \pi_e \cdot x_p}{EI} dz$$

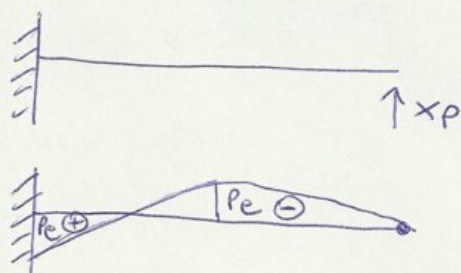
$EI$  posso portarlo fuori dell'integrale solo se l'inerzia è costante su tutta la lunghezza.

$$\int_L (\pi_a \cdot \pi_{op} + \pi_e^2 \cdot x_p) dz = 0$$

$$\int_L \pi_a \cdot \pi_{op} dz + \int_L \pi_e^2 x_p dz = 0$$

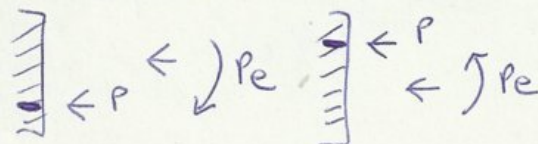
$$x_p = - \frac{\int_L \pi_a \pi_{op} dz}{\int_L \pi_e^2 dz}$$

$\pi_{op}$



mezzeria

estimità



(momento isostatico di prec compressione)



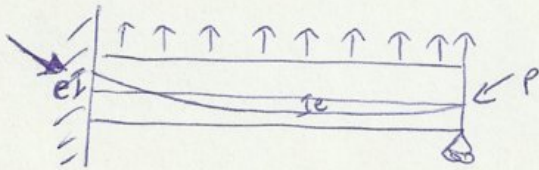
— CdP  
 - - - tracciato cavo

Osservazione 2

Nella combinazione delle azioni di SLE/SCU, il tenore  $P$  è preso in conto come effetto della forza anisale applicata a livello del cavo. Significa che nel calcolo della  $e$  l'effetto isostatico è già tenuto in conto come sforzo normale eccentrico rispetto al baricentro. Quindi si considererà solo l'effetto iperstatico della precompressione. Solo se la str è iperstatica si aggiungerà quel tenore nella combinazione.

• Metodo dei carichi equivalenti

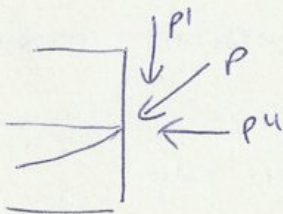
Si considerano le forze concentrate alle estremità ( $P$ ) e lungo lo sviluppo della struttura, il carico distribuito  $q_{eq} = P \frac{1}{L}$



$$\frac{1}{L} = \frac{1.8}{L^2}$$

In questo caso:  $f = \frac{3}{2} e$        $\rightarrow q_{eq} = \frac{P \cdot 1.8 e}{L^2}$

Nei calcoli non si considerano le forze inclinate, ma le 2 componenti:

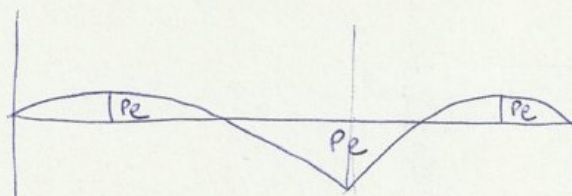


$P'$  non si considera perché si scarica direttamente sui vincoli  
 $P^u$  forza anisale

Questo metodo è molto usato nella progettazione però bisogna fare attenzione di introdurre tutti i carichi equivalenti!

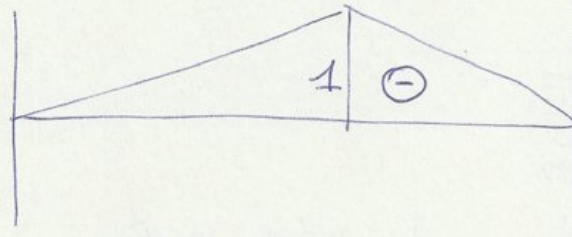
Però la soluzione è più facile da trovare. Infatti:

$\pi_{op}$



momento isotatico

$\pi_{xp}$



momento iperstatico  
introdotta sulla sezione  
un momento di continuità  
 $\pi_p \uparrow \quad \pi_{xp}$

Soluzione = 
$$X = - \frac{\int_L \pi_{op} \pi_p dz}{\int_L \pi_{op}^2 dz}$$

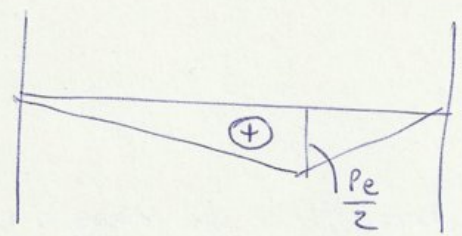
$$\int_L \pi_{op} \pi_p dz = \frac{3}{2}L \cdot \frac{1}{6} \left[ \phi + 4(-p_e) \left(-\frac{1}{2}\right) + p_e(-1) \right] + \frac{L}{6} \left[ p_e(-1) + 4\left(-\frac{1}{2}\right)(-p_e) + \phi \right] = \frac{p_e L}{4} + \frac{p_e L}{6} = \frac{5 p_e L}{12}$$

$$\int_L \pi_{op}^2 dz = \frac{1}{3} \left( \frac{3}{2}L \right) + \frac{1}{3}L = \frac{5}{6}L$$

$$X = - \frac{\frac{5 p_e L}{12}}{\frac{5}{6}L} = - \frac{p_e}{2}$$

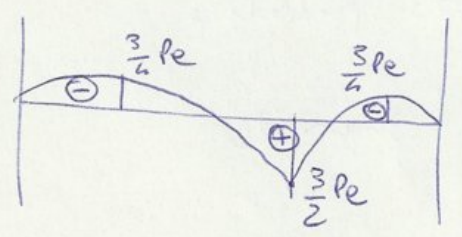
il diagramma di precompressione avrà verso opposto.

$M_{xp}$



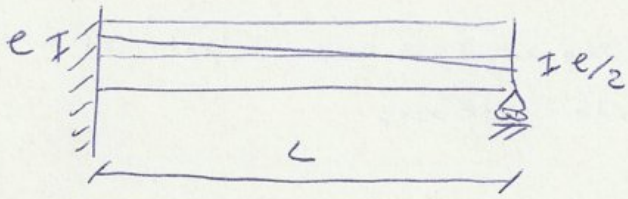
Somma con  $\pi_{op}$

$\pi_{tot}$

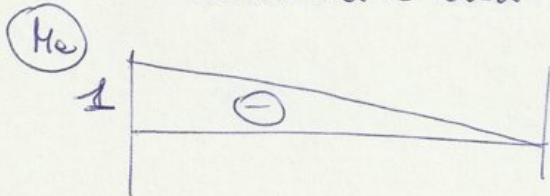
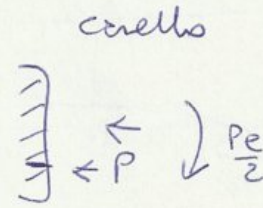
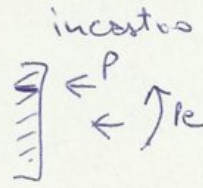
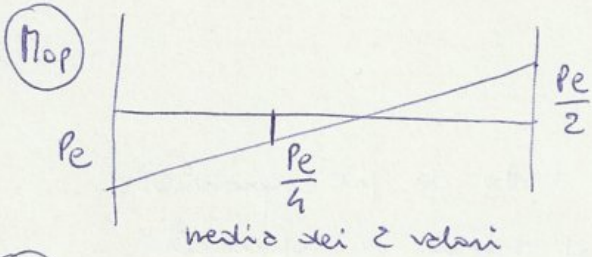
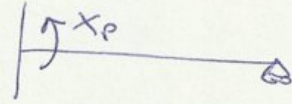


## Applicazione 4

Cavo no parabolico no rettilineo → tipico delle str a cavi pe-ten



PCU → vincolo sovrabbondante: incastrato



$$\int M_e M_{op} dz = \frac{L}{6} \left[ Pe(-1) + 4 \frac{Pe}{4} \left(-\frac{1}{2}\right) + 0 \right] = -\frac{PeL}{4}$$

$$\int M_e^2 dz = \frac{L}{3} \cdot 1 \cdot 1 = \frac{L}{3}$$

$$x_p = -\frac{-\frac{PeL}{4}}{\frac{L}{3}} = \frac{3}{4} PeL$$

Combinazione delle azioni SCU →  $x_p = 1$  no effetto solo iperstatico.

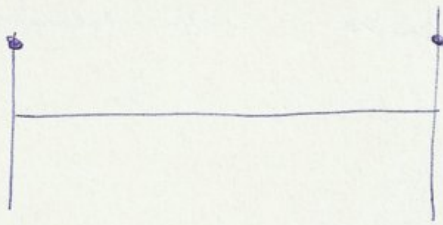
$q_d = 25 \text{ kN/m}$  vuol dire  $N_{ed} = \frac{25 \cdot l^2}{8}$

Verifica della sezione più sollecitata: incastrato

$M_{rd}$  con il cavo eccentrico contiene già al suo interno l'effetto iperstatico.

$$N_{ed} \leq M_{rd}$$

$\Pi_{tot}$



$$\frac{1}{12} \frac{16Pe}{L^2} \cdot L^2 = \frac{4}{3} Pe$$

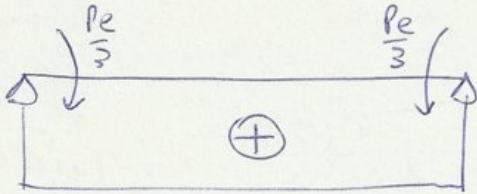
Nell'  $\Pi_{op}$  all'estremità ho  $P \cdot e$

$e$  = eccentricità per il caso e l'asse geometrico della sezione è  $\neq$  dalle fibre!

quindi 
$$x_p = \frac{4}{3} P \cdot e - P \cdot e = \frac{Pe}{3}$$

Questo lo faccio nelle sezioni in cui ho l'incognita iperstatica:

$\Pi_{xp}$



Cdp : tracciato cavo sollevato di : 
$$\frac{Pe/3}{P} = \frac{e}{3}$$

## 2. Limitazione delle tensioni nell'armatura di precompressione

L'esigenza di avere una precompressione stabile richiede di tesare il cavo a tensioni iniziali più alte possibili. La tensione massima  $\sigma_{p,max}(x)$  deve essere:

$$\sigma_{p,max}(x) \leq \min(0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k})$$

E' ammessa una sovratensione fino al valore di  $0,95 \cdot f_{p0,1k}$  se la forza applicata dal martinetto può essere misurata con una accuratezza del  $\pm 5\%$ .

La tensione di precompressione  $\sigma_{pm0}(x)$ :

$$\sigma_{pm0}(x) \leq \min(0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k})$$

La tensione di precompressione  $\sigma_{pm,t}(x)$  nella combinazione di carico rara:

$$\sigma_{pm,t}(x) \leq 0,75 \cdot f_{pk} \quad (0,80 \cdot f_{pyk} \text{ secondo D.M. 14/01/2008})$$



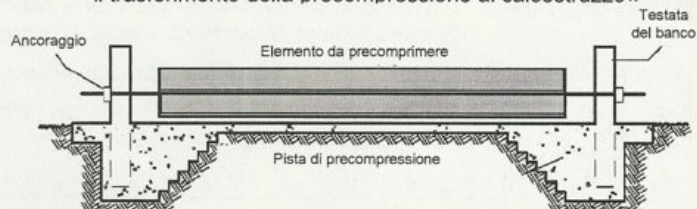
M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

## 3. Perdite di precompressione iniziali, $\Delta P_i(x)$ , nelle strutture a cavi pre-tesi

Sono dovute a:

durante la messa in tensione

- attrito,  $\Delta P_\mu(x)$ , nel caso di cavi deviati, con effetti localizzati in corrispondenza del deviatore;
- rientro degli ancoraggi,  $\Delta P_{si}$ ;
- rilassamento dell'acciaio da precompressione,  $\Delta P_r$ , nel periodo compreso tra la messa in tensione dei cavi e la precompressione del calcestruzzo (prima del trasferimento della precompressione al calcestruzzo);
- deformazione elastica dell'elemento al rilascio dei cavi,  $\Delta P_{el}$  (dopo il trasferimento della precompressione al calcestruzzo).



M. Talliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino



Perdite iniziali nelle strutture a cavi pre-tesi

**Applicazione 2**

Il solaio semplicemente appoggiato, di luce 6,5 m, soggetto a carichi permanenti e variabili, è realizzato con travetti precompressi e getto di completamento di calcestruzzo. Calcolare le tensioni sul travetto al momento della precompressione e verificare una nervatura di solaio allo stato limite ultimo per flessione (interasse nervature = 50 cm).

**Materiali:**

- calcestruzzo (travetto):  $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ ;
- calcestruzzo (in opera):  $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ ;
- acciaio in trefoli:  $f_{ptk} = 1860 \text{ N/mm}^2$ ;  $\epsilon_{ptk} = 3,5\%$ ;
- $A_{sp} = 120 \text{ mm}^2$ ;  $A'_p = 40 \text{ mm}^2$ ;  $\sigma_{p,initiale} = 0,80 f_{ptk}$

**Azioni:**

- peso proprio:  $g_{10} = 3,00 \text{ kN/m}^2$ ;
- carico permanente portato:  $g_{k1} = 2,00 \text{ kN/m}^2$
- carico variabile:  $q_k = 2,00 \text{ kN/m}^2$

*M. Taliano*  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

**3. Perdite di precompressione iniziali,  $\Delta P_i(x)$ , nelle strutture a cavi post-tesi**

Sono dovute a:

- attrito,  $\Delta P_{\mu}(x)$ , durante la messa in tensione;
- rientro degli ancoraggi,  $\Delta P_{si}$ ;
- deformazione elastica dell'elemento,  $\Delta P_{el}$ , nel caso di cavi tesati in tempi differenti per effetto dell'interazione reciproca.

*M. Taliano*  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Perdite iniziali nelle strutture a cavi post-tesi

Il calcolo pratico delle perdite per attrito può essere fatto introducendo alcune semplificazioni:

- a. se la lunghezza della proiezione del cavo sull'asse della struttura è grande rispetto agli spostamenti in direzione ortogonale, si può approssimare lo sviluppo reale del cavo con la sua proiezione sull'asse;
- b. il calcolo delle perdite può essere effettuato considerando il cavo risultante anziché il tracciato dei singoli cavi.
- c. nel caso di tracciato parabolico (equazione di secondo grado) tra due punti A e B distanti L, la deviazione angolare  $\theta$  è pari a

$$\theta = \frac{8 \cdot f}{L}$$

essendo f la freccia del cavo ad L/2;

- d. nel caso di cavo formato da più archi di parabola, la deviazione angolare totale è somma delle deviazioni angolari relative a ciascun tratto;
- e. se la deviazione angolare è piccola (ad es. minore di 0,25 rad) è lecito linearizzare l'andamento degli sforzi nei singoli tratti.



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Perdite iniziali nelle strutture a cavi post-tesi

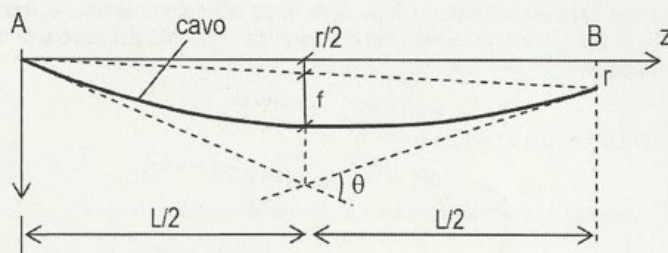


Fig. 5.4 – Calcolo delle perdite per attrito lungo un cavo parabolico.



M. Taliano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino