

Corso di Tecnica delle Costruzioni

A.A. 1996/97

Seminario Sul Tema

**Strutture in
Cemento Armato Precompresso**

Ing. F. Neri

*con piccole aggiunte e
ordine modificato da A. Ghersi, 1999/2000
e alcune aggiunte successive (data 2004)*

Generalita'

Il calcestruzzo è un materiale con buone caratteristiche di resistenza a compressione ma basse prestazioni per quanto riguarda la resistenza a trazione. Infatti oltre a non essere superiore il valore medio di quest'ultima al 10% di quello a compressione la resistenza a trazione si presenta con un elevato indice di dispersione. Nella pratica tecnica si trascura la resistenza a trazione e si ammette che non appena viene indotta una tensione di trazione questa provoca la fessurazione della sezione.

Da questa ipotesi scaturisce che una sezione realizzata interamente in calcestruzzo non è in grado di supportare una sollecitazione di flessione pura. In realtà ciò non è del tutto vero in quanto queste sollecitazioni sono sopportabili fintanto che non inducono in un punto della sezione uno stato tensionale di trazione superiore alla relativa resistenza. Potendo sopportare solo sforzi di compressione, una sezione in calcestruzzo non armata è in grado di resistere ad azioni la cui risultante ricade all'interno del nocciolo centrale di inerzia.

Per ovviare a questi limiti del calcestruzzo, per una sezione inflessa, si rende necessario introdurre delle barre di acciaio in quelle zone della sezione in cui si prevedono degli sforzi di trazione. In una trave in c.a. si ha una sezione reagente costituita dall'acciaio che resiste a trazione e da una parte del calcestruzzo che reagisce a compressione. La risultante degli sforzi di compressione risulteranno applicati in corrispondenza del baricentro degli sforzi medesimi, mentre la risultante degli sforzi di trazione in corrispondenza del baricentro delle armature. Nel complesso queste due forze consentiranno di creare una coppia tale da bilanciare il momento esterno.

In conseguenza della non resistenza a trazione del calcestruzzo tutta la parte della sezione che giace al di sotto dell'asse neutro risulterà fessurata e quindi non contribuisce in modo alcuno ai fini della resistenza e assume il solo compito di trasferire gli sforzi di trazione alle armature tese inferiori e di resistere alle azioni di taglio.

Tutto questo volume di calcestruzzo (circa 2/3 di quello totale per una sezione di forma rettangolare) in definitiva rappresenta solo un peso che deve essere «portato» dalla trave stessa.

Va inoltre considerato come per tutte le fibre che giacciono al di sotto dell'asse neutro essendo presenti solamente tensioni tangenziali le isostatiche di trazione sono inclinate a 45° rispetto all'asse della trave ed assumono valori pari alla tensione tangenziale stessa, una eventuale presenza di tensioni di compressione ridurrebbe sia il valore della isostatica di trazione che il piano sul quale agisce con effetti benefici per quanto riguarda la resistenza della sezione nei confronti delle azioni taglianti.

Per ovviare a questi limiti del calcestruzzo si è pensato sin dalla fine del secolo scorso di eliminare in qualsiasi punto della sezione sforzi di trazione mediante l'applicazione di un'azione di compressione impressa artificialmente detta *presollecitazione*. Questa *presollecitazione* ha lo scopo di generare all'interno della sezione uno stato tensionale che sovrapposto a quello indotto per effetto dei carichi esterni ne riduca gli effetti.

La tecnica della precompressione viene utilizzata correntemente oltre che per le strutture cementizie anche per altre tipologie di materiali (muratura) le quali hanno gli stessi limiti di resistenza nei confronti della trazione.

Questo stato di coazione viene introdotto in svariati modi mediante l'applicazione artificiale di forze di compressione in punti particolari della struttura o distribuite lungo di essa. Per le strutture cementizie la precompressione viene realizzata mettendo in trazione delle armature metalliche che per tale motivo vengono dette *pretese* mentre il calcestruzzo che durante la sua vita beneficia di questi sforzi di compressione viene detto *precompresso*.

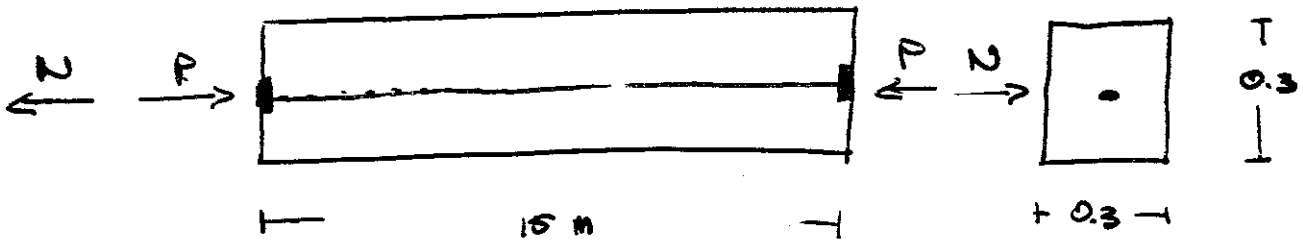
Esempio1 con sforzo normale centrato Tirante

Esempio2 con sforzo normale centrato Flessione

Esempio3 con sforzo normale eccentrico Flessione

TIRANTE IN C.A.P.

E. 1



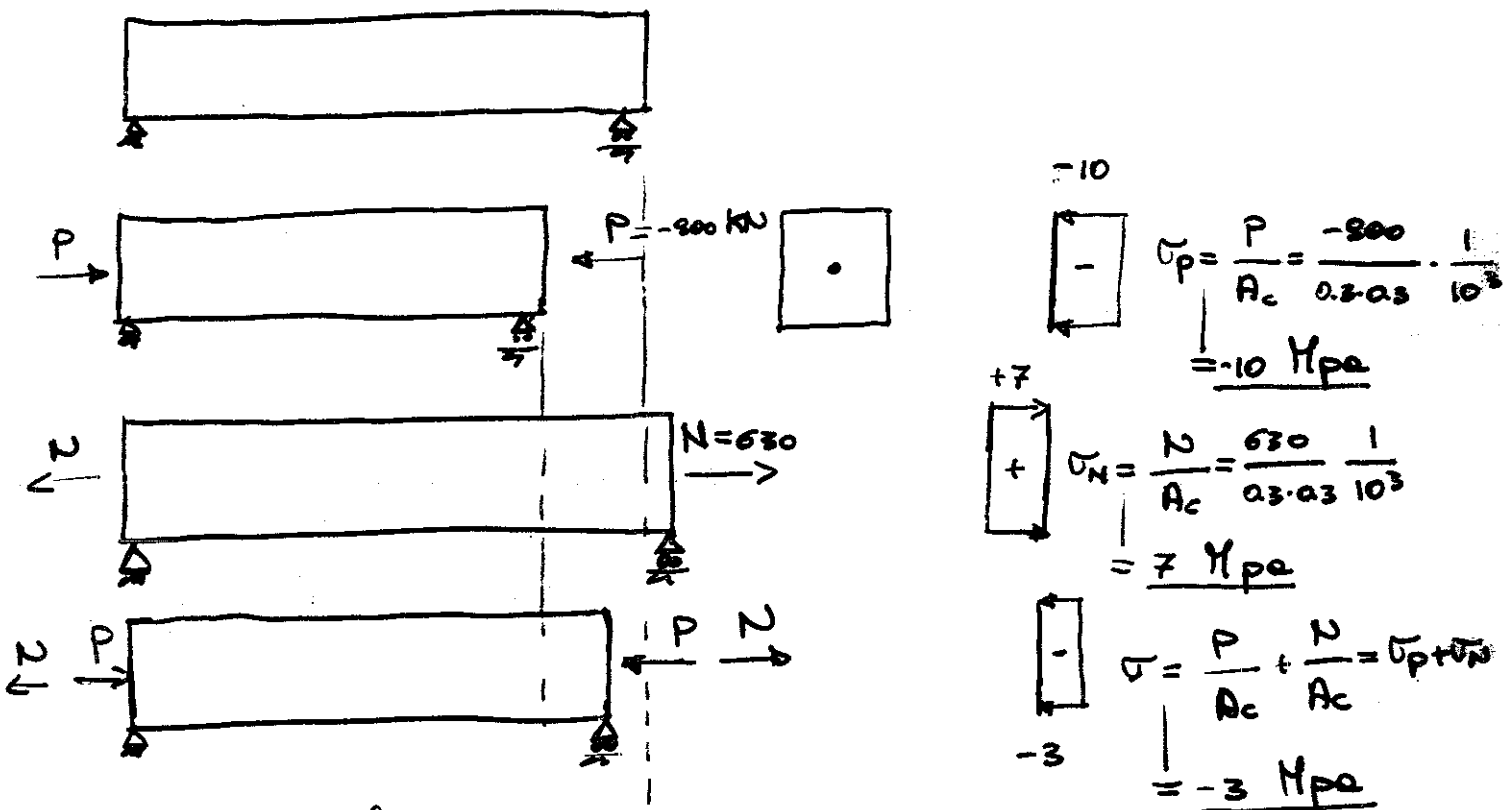
La trave è sottoposta ad una forza di precompressione

$$P = -800 \text{ kN}$$

e uno sforzo di trazione

$$N = 630 \text{ kN}$$

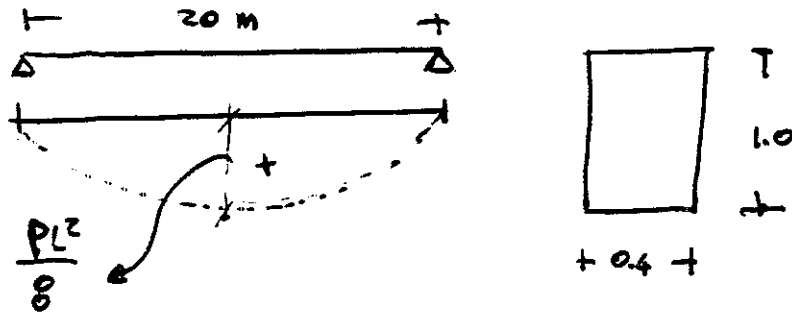
1) Determinare lo stato tensionale di quest'azionario ed il loro effetto congiunto



2) Determinare la trazione che decomprime la sezione

$$\sigma = \frac{P}{A_c} + \frac{N}{A_c} = 0 \Rightarrow N = -P = \underline{\underline{800 \text{ kN}}}$$

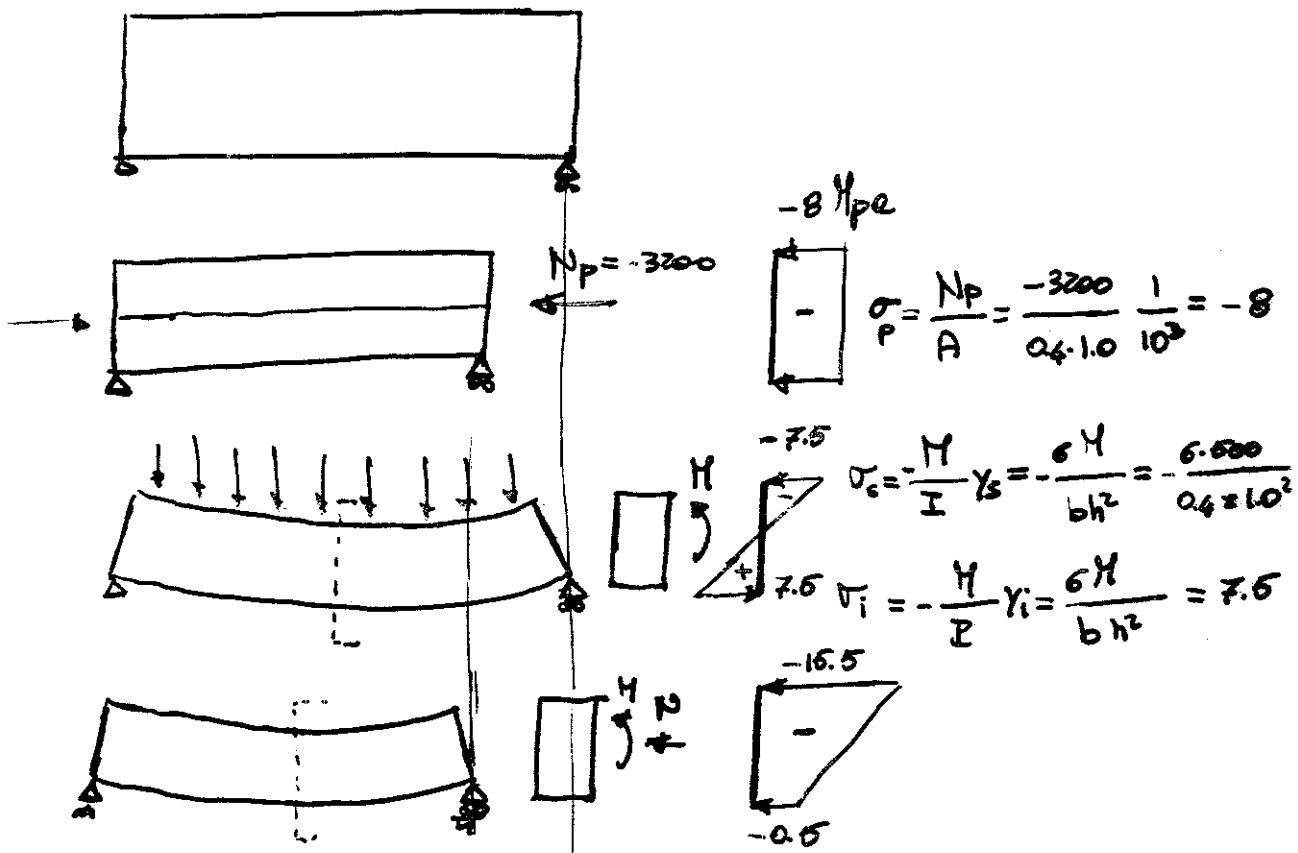
Trave in flessa



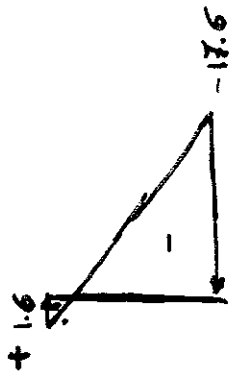
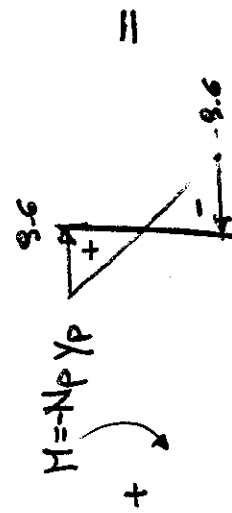
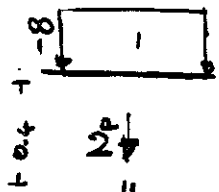
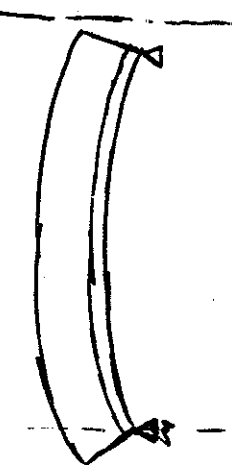
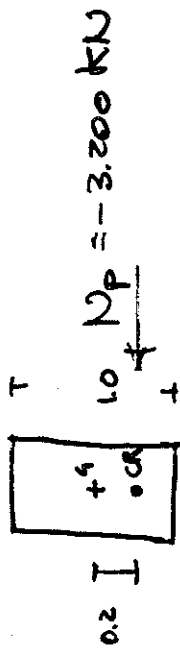
La trave è soggetta al solo peso proprio $p = 10 \text{ KN/m}$ e caricata con una precompressione il cui (C.R.) passa x l'asse geometrico della trave (A.G.) e di valore $P = -3200 \text{ kN}$

→ Determinare le tensioni al fondo superiore ed inferiore trave

Il momento in mezzaria $M = \frac{10 \cdot 20^2}{8} = \frac{4000}{8} = 500 \text{ KNm}$



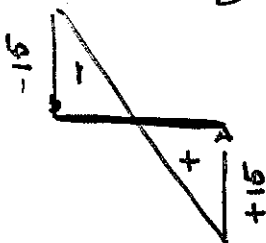
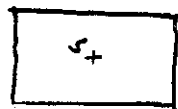
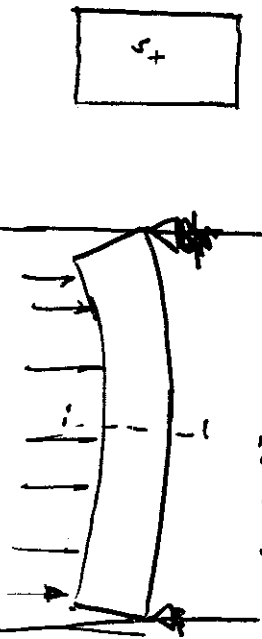
$$\sigma = \frac{N_p}{A} - \frac{M}{I} y$$



$$\sigma = \frac{N_p}{A} = \frac{3200}{0.4 \times 10^2} = -8$$

$$\sigma = \frac{M \cdot Y_p}{I} = \frac{6 \times 10^3}{0.4 \times 10^2} = 15$$

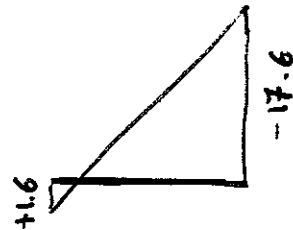
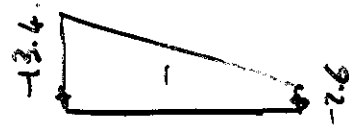
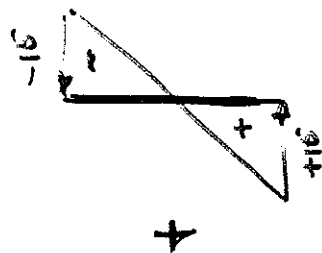
$$\sigma = \frac{6 \times 1000}{0.4 \times 10^2} = 15 \text{ MPa}$$



$$\sigma = \frac{M \cdot Y_p}{I} = \frac{6 \times 1000}{0.4 \times 10^2} = -15 \text{ MPa}$$

$$\sigma = -\frac{M}{I} \cdot Y_p = \frac{6 \times 1000}{0.4 \times 10^2} = 15 \text{ MPa}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{20 \cdot 100}{8} = 2500 \text{ kNm}$$



TECNICHE DI PRECOMPRESSIONE

Precompressione a cavi pretesi (cavi aderenti)

Questa tecnica di precompressione viene di regola effettuata in stabilimento o in cantieri importanti, in quanto richiede la realizzazione di impianti di notevoli dimensioni ed elevati costi le così dette piste di precompressione che di norma possono raggiungere lunghezze anche superiori ai 100 m. Queste sono costituite da due capisaldi fissi (elementi molto rigidi) posti alle estremità della pista ai quali si affida il compito provvisorio di assorbire lo sforzo di precompressione.

In una prima fase viene realizzata la pretensione dei cavi, successivamente dopo che viene effettuato il getto del calcestruzzo e non appena questo ha raggiunto un sufficiente grado di maturazione (7-28gg), questi vengono rilasciati e accorciandosi elasticamente trasferiscono per attrito la forza di precompressione dai capisaldi all'elemento di calcestruzzo.

In conseguenza dei tempi morti che intercorrono fra la fase del getto ed il rilascio dei cavi che non permettono un ulteriore utilizzo della pista di precompressione questa viene utilizzata per realizzare la precompressione di più elementi prefabbricati disposti in serie, e allo stesso tempo si utilizzano tecniche particolari per accelerare la maturazione del calcestruzzo (maturazione a vapore).

In generale la disposizione dei cavi all'interno della trave segue un tracciato rettilineo e di conseguenza tale sarà anche l'andamento del cavo risultante. La presollecitazione a cavi aderenti può essere realizzata anche con tracciato del cavo risultante secondo una spezzata, a tal scopo sono necessarie delle forze che siano in grado di deviare il cavo di precompressione. Queste forze vengono applicate durante la fase del getto mediante dei dispositivi di deviazione di difficile realizzazione e successivamente dal calcestruzzo il quale è sottoposto ad elevate pressioni in corrispondenza della zona di deviazione che quindi necessita di opportuni provvedimenti.

Precompressione a cavi post-tesi (cavi scorrevoli)

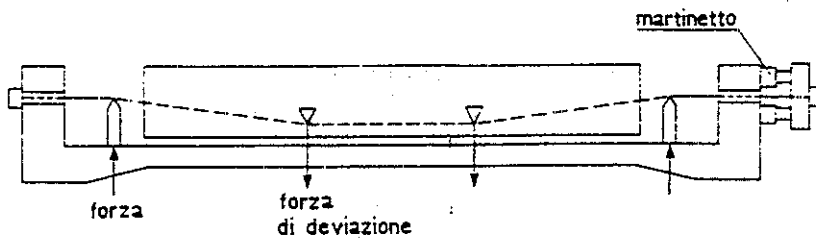
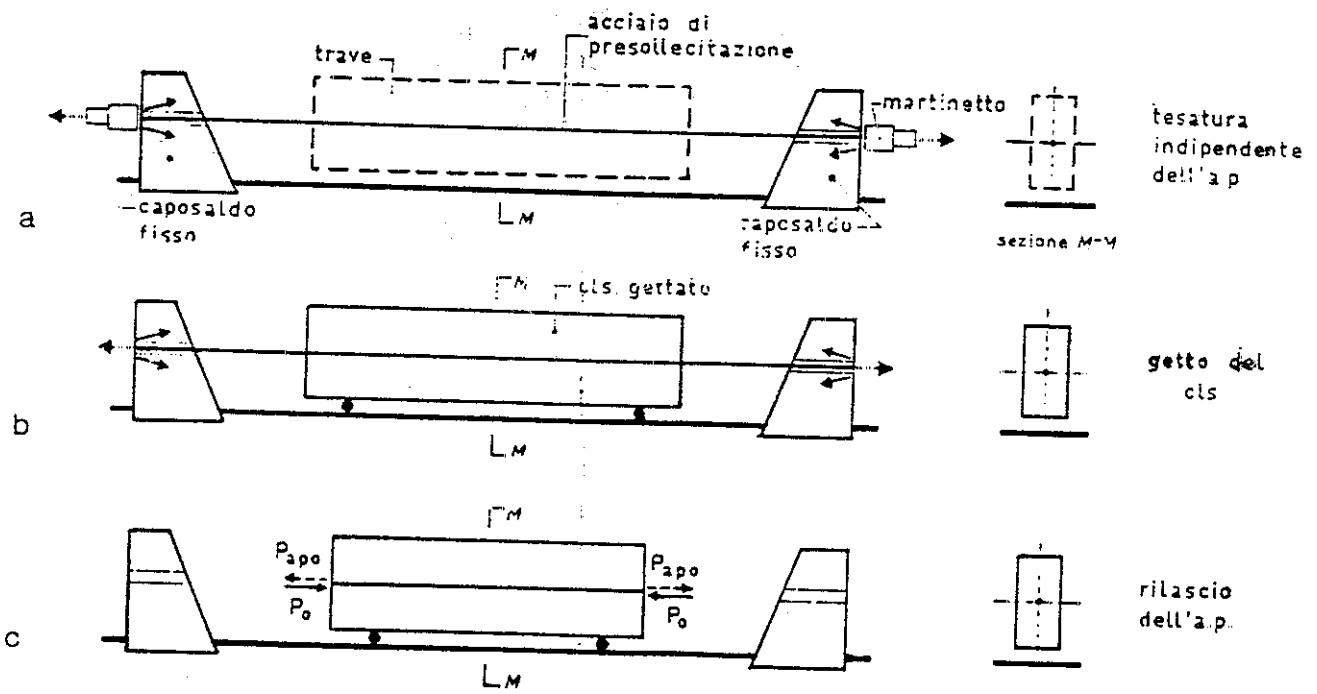
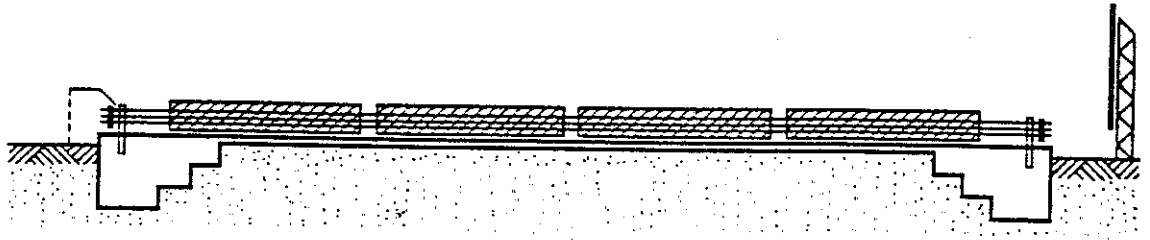
A differenza della tecnica precedentemente descritta in questo caso prima si effettua il getto del calcestruzzo dentro le casseformi e solo successivamente a maturazione avvenuta si mette in trazione l'armatura di precompressione.

I cavi da precompressione vengono fatti passare all'interno di apposite guaine (realizzate per es. in lamierino) che vengono predisposte all'interno della trave ed ancorate saldamente alla gabbia di ferri in modo tale da evitare deviazioni accidentali durante la fase del getto, fino al momento del tiro questi cavi sono liberi di scorrere all'interno di queste guide.

Una volta che il calcestruzzo raggiunge un certo grado di maturazione viene effettuata la tesatura dei cavi per mezzo di martinetti idraulici che agiscono per contrasto contro le testate della trave, in questa fase l'acciaio subisce un allungamento mentre il calcestruzzo si contrae. Successivamente i cavi vengono bloccati in modo tale da non perdere l'effetto della precompressione e per consentire la rimozione dei martinetti ed un loro ulteriore utilizzo.

Successivamente si suole riempire lo spazio libero fra il cavo e la guaina con della malta cementizia iniettata sotto pressione, con lo scopo di renderlo aderente alla trave (da questo momento lo stato deformativo del cavo e dell'acciaio sono congruenti) e di proteggerlo dagli agenti atmosferici. I cavi resi aderenti mediante l'iniezione risentono in maniera maggiore rispetto ai non iniettati dell'azione dei carichi esterni.

Tale tecnica di precompressione, vista la semplicità della messa in tensione delle armature, si presta oltre che alle realizzazioni in stabilimento anche per le strutture realizzate in opera in quanto viene richiesto solamente di portare sul posto solamente i martinetti necessari.



Acciai

5

In base alla funzione che svolgono gli acciai possono essere divisi in:

A. per strutture di precollezione hanno il compito di realizzare la precompressione e di mantenerla nel tempo

A. per strutture ordinarie svolgono un compito passivo proprio delle strutture in C.A. E.

Colcestuzzi

Sono colcestuzzi identici a quelli utilizzati per le strutture in C.A. E. ma con un maggior controllo in fase di confezionamento che consente:

- ▲ di raggiungere resistenze più elevate
 $55 \text{ Mpa} \geq R_{ek} \geq 30 \text{ Mpa}$
- ▲ un livello di affidabilità superiore

ACCIAI DA PRECOMPRESSIONE

La tecnica della precompressione è stata applicata per la prima volta sul finire del secolo scorso (1886) ma non trovò applicazioni pratiche fino a quando la tecnologia non rese disponibili acciai ad elevato limite elastico (1929) con tensioni di snervamento notevolmente superiori rispetto agli acciai da c.a.o.

La precompressione viene realizzata mettendo in trazione l'acciaio con un conseguente allungamento di questo, allungamento che viene con il passare del tempo ridotto per effetto dei fenomeni lenti che hanno sede nel calcestruzzo (fluage, rilassamento). Questi fenomeni provocano un accorciamento della trave e quindi una diminuzione dello stato tensionale della trave.

Nel caso di utilizzo di acciaio a basso limite elastico, come quelli disponibili in passato (vedi i normali acciai da c.a.o.) questi fenomeni lenti possono produrre cadute di tensioni tali da annullare nell'arco di un anno gli effetti della precompressione; trasformando l'elemento strutturale in una normale trave da cemento armato ordinario

Esercizio 1.1 - 1.2 Pag 4 Antonini

Si definisce rendimento dell'acciaio il rapporto tra la tensione a tempo infinito e la tensione all'atto del tiro

$$\eta = \frac{\sigma_{p\infty}}{\sigma_{p0}} = \frac{\sigma_{p0} - \Delta\sigma_{p\infty}}{\sigma_{p0}} = 1 - \frac{\Delta\sigma_{p\infty}}{\sigma_{p0}} = 1 - \frac{\lambda E_s}{\varepsilon_{pi} E_s} = 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon_{pi}}$$

λ deformazione provocata dai fenomeni viscosi ed in linea di massima indipendenti dalla deformazione iniziale

σ_{pi} tensione nell'acciaio all'atto del tiro

Essendo la deformazione conseguente ai fenomeni viscosi costante, il rendimento dell'acciaio precompresso è tanto maggiore quanto maggiore risulta la deformazione nell'acciaio all'atto del tiro

Fig 1.3 Antonini pag 6

de deformazioni per ritiro e fluage sono

$$\epsilon_{r+f} = 0.00075$$

■ Se la tensione massima per un acciaio al titanio è

$$\sigma_{p0} = 155 \text{ Mpa} \longrightarrow \epsilon_{p0} = \frac{\sigma_{p0}}{E_p} = \frac{155}{205.000} = 0.00075$$

la deformazione ϵ_{p0} viene annullata dal fluage + ritiro

$$\epsilon_{p\infty} = \epsilon_{p0} - \epsilon_{r+f} = 0.00075 - 0.00075 = 0$$

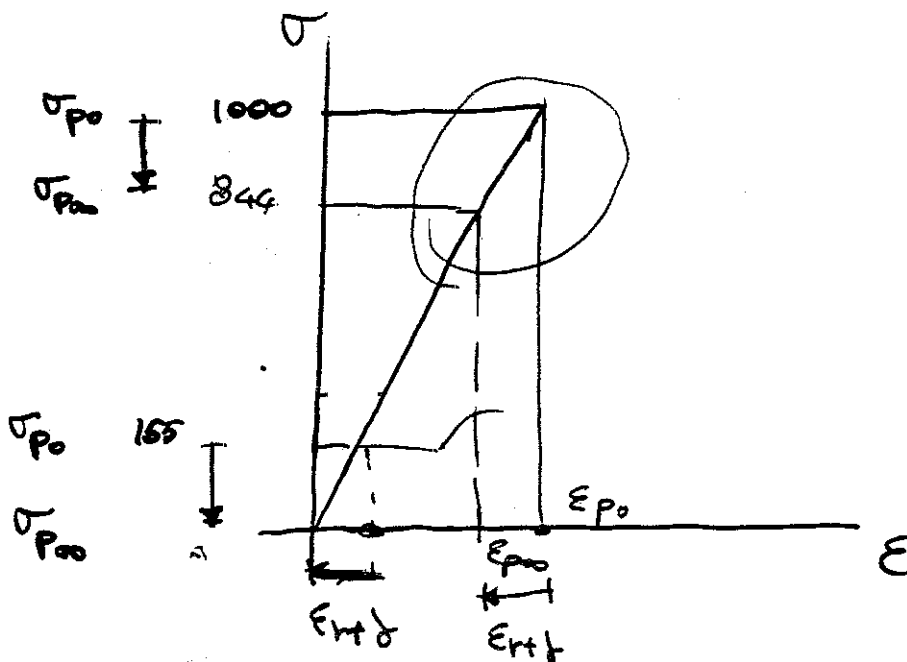
$$\sigma_{p\infty} = E_p \epsilon_{p\infty} = 0$$

■ Se l'acciaio è ad elevato limite elastico

$$\sigma_{p0} = 1000 \text{ Mpa} \longrightarrow \epsilon_{p0} = \frac{1000}{205.000} = 0.00485$$

$$\epsilon_{p\infty} = \epsilon_{p0} - \epsilon_{r+f} = 0.00485 - 0.00075 = 0.0041$$

$$\sigma_{p\infty} = E_p \epsilon_{p\infty} = 205.000 \cdot 0.0041 = 844 \text{ Mpa}$$



1.1 La presollecitazione: concetti fondamentali e applicazioni 5

forza di presollecitazione
sviluppata dall'a.p.:

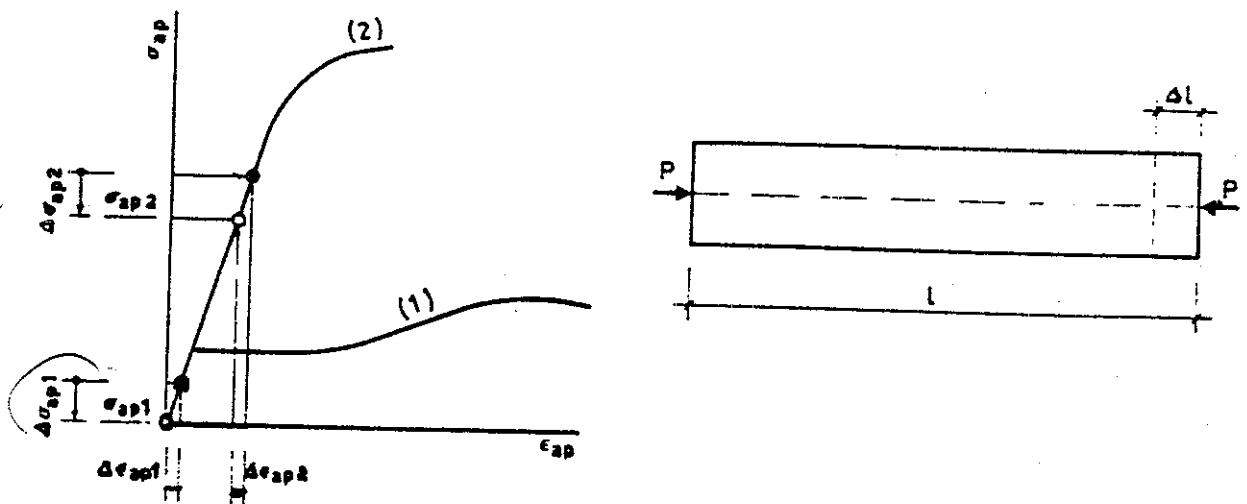
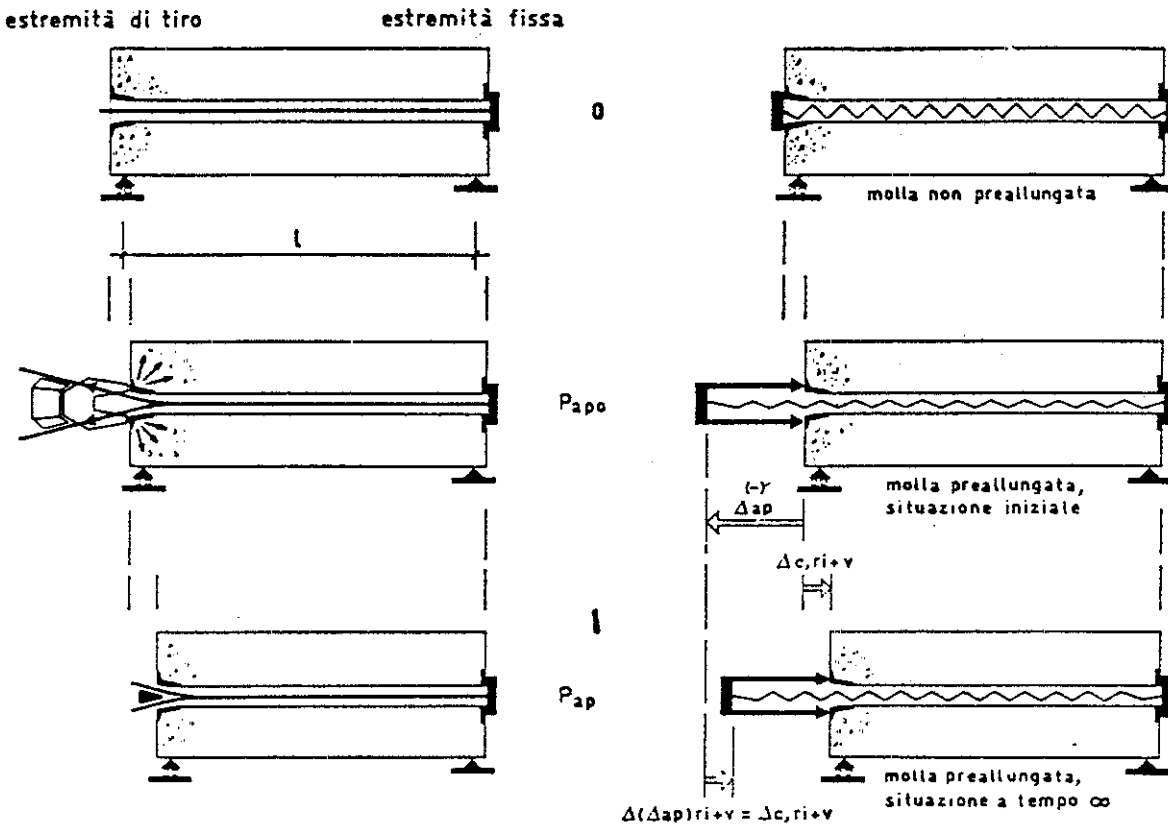


Fig. 1-3

Rendimento dell'acciaio

8

$$\eta = \frac{\sigma_{p00}}{\sigma_{p0}} = \frac{\sigma_{p0} - \Delta\sigma_{p00}}{\sigma_{p0}} = 1 - \frac{\Delta\sigma_{p00}}{\sigma_{p0}} = 1 - \frac{\lambda E_p}{E_{p0} E_p}$$
$$= 1 - \frac{\lambda}{E_{p0}}$$

σ_{p0} = tensione nell'acciaio a tempo 0

$\sigma_{p00} = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{p00}$ = tensione nell'acciaio dopo le cadute di

$\Delta\sigma_{p00}$ = entità delle cadute di tensione

$E_p = E_s$ modulo elastico dell'armatura de precompres-
sione

λ = deformazione dovuta ai fenomeni lenti

E_{p0} = deformazione iniziale nell'acciaio

DM 92

Tensioni ammissibili

	TIRO	ESERCIZIO
CALCESTRUZZO		
σ compressione	$0.48 R_{ckj}$	$0.38 R_{ck}$
σ trazione	$0.08 R_{ckj}$	$0.06 R_{ck}$
ACCIAIO		
a fili aderenti		
- filo/torcido	$0.90 f_{p(0.2)k}$	$0.6 f_{pk}$
- trafilato	$0.90 f_{yk}$	$0.6 f_{rk}$
a cavi scordati		
- filo/torcido	$0.85 f_{p(0.2)k}$	$0.6 f_{pk}$
- trafilato	$0.85 f_{yk}$	$0.6 f_{rk}$
- barre	$0.85 f_{yk}$	$0.6 f_{rk}$

DM 96

STATO LIMITE ULTIMO

	TIRO	ESERCIZIO
CALCESTRUZZO		
σ compressione	$0.60 f_{ckj}$	0.60 (max) / 0.45 (min) f_{ck}
σ trazione	$0.10 f_{ckj}$	0.50 (max) / 0.40 (min) f_{ck}
		$0.07 f_{ck}$
ACCIAIO come per T.A.		

EC2

TIRO (tensione ammissibile)

SLU



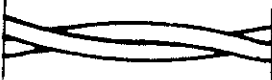
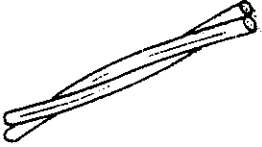




ACCIAIO

$\sigma_{s,max} = \text{MIN} (0.80 f_{pk}; 0.90 f_{p0.2k})$
 (dopo la tensione)

$\sigma_{s,min} = \text{MIN} (0.75 f_{pk}; 0.85 f_{p0.2k})$

$\frac{0.9 f_{pk}}{\gamma_s}$

Tabella 2.5 Classificazione dell'acciaio di presollecitazione in base al tipo di prodotto.

N°	Tipo di prodotto	Definizione	Rappresentazioni grafiche	
1	<p><u>filo</u> $\phi 5 \div \phi 12$</p>	<p>materiale <u>semplice</u> a sezione piena che è, o può essere, fornito avvolto in <u>matasse</u>;</p>	 	
2	<p><u>treccia</u> singoli fili $\phi 2 \text{ o } \phi 3$</p>	<p>insieme di <u>due o tre fili</u>, avvolti ad <u>elica</u> attorno al loro-asse longitudinale <u>comune</u>; <u>passo e senso di avvolgimento dell'elica sono eguali per tutti i fili della treccia</u>;</p>	 	
3	<p><u>trefolo</u> fili da $\phi 2$ a $\phi 4$ (eventualmente fino a $\phi 7$)</p>	<p><u>insieme di fili avvolti ad elica in una o più corone</u>, attorno ad un <u>filo rettilineo</u> mantenuto nell'asse longitudinale <u>comune dell'insieme e completamente ricoperto dalle corone</u>. Il passo e il senso di avvolgimento dell'elica sono eguali per tutti i fili di <u>una stessa corona</u>;</p>	 	
4	<p><u>barra</u> $\phi 14 \div \phi 40$ o anche oltre $L = 24 \text{ m}$</p>	<p>materiale <u>semplice</u> di sezione <u>piena</u> che può venir consegnato solamente in forma di <u>elementi rettilinei</u>.</p>	 	

$\phi 5 \div \phi 12$ ←

singoli fili
 $\phi 2 \text{ o } \phi 3$

fili da $\phi 2$ a $\phi 4$,
eventualmente
fino a $\phi 7$

$\phi 14 \div \phi 40$
o anche oltre
 $L = 24 \text{ m}$

da Antonini, *Cerchi e muretti per cemento*, vol. 1°, MASSON

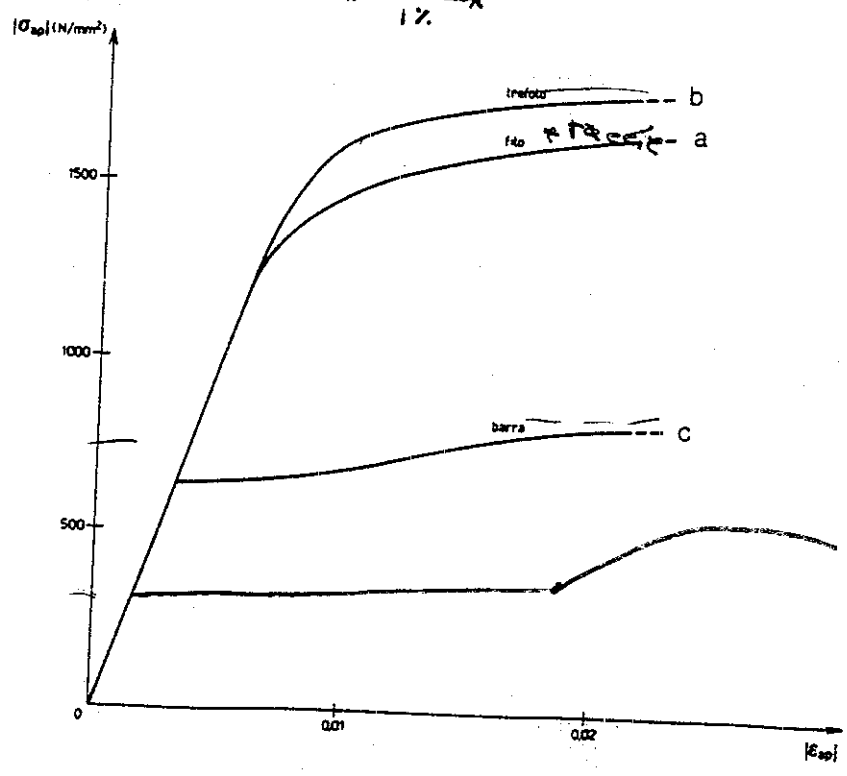
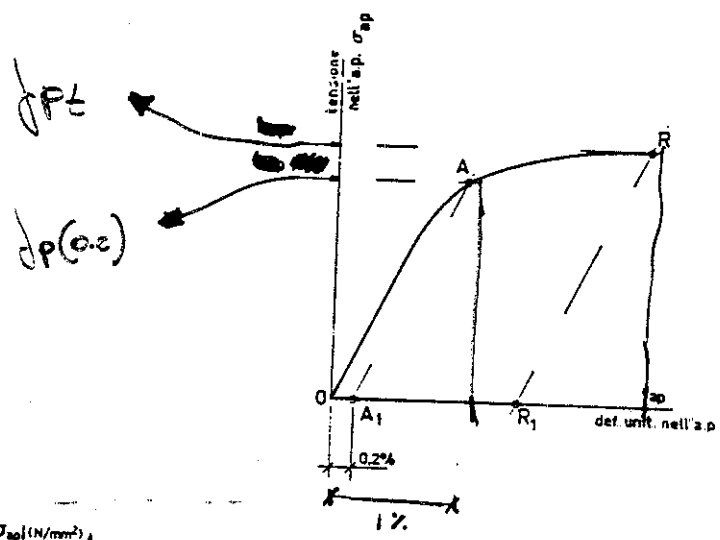
barre $f_{pk} = 800 \div 1000 \text{ MPa}$

fili $f_{pk} = 1600 \div 1800 \text{ MPa}$

Le grandezze meccaniche caratteristiche più significative sono:

- σ_{PE} = tensione caratteristica a rottura dell'a.p.;
- $\sigma_{P(0.2)}$ = tensione caratteristica allo 0,2% di deformazione unitaria residua, nel caso dei fili; ~ 2000
- $\sigma_{P(1)}$ = tensione caratteristica all'1% di deformazione totale, nel caso dei trefoli;
- σ_{PY} = tensione caratteristica di snervamento nel caso delle barre.

(2)



(3)

LIMITE TENSIONALI

T.A. DM 14.02.82

CALCESTRUZZO 3.2.5

	COMPRES.	TRAZIONE
TIRO	0.48 R _{ck}	0.08 R _{ctk}
ESERC.	0.38 R _{ck}	0.05 R _{ctk}

ACCIAIO DA PRECOMPRESSO 3.2.8

		FIL-TRICIA	TREFOLO	BARRA
POST-TESA	TIRO	0.85 / f _{pk} k	0.85 / p ₍₁₎ k	0.85 / p _{yk}
	ESERC.	0.6 / p _{tk}	0.6 / p _{tk}	0.6 / p _{tk}
PRE-TESA	TIRO	0.80 / p ₍₂₂₎ k	0.80 / p ₍₁₎ k	/
	ESERC.	0.6 / p _{tk}	0.6 / p _{tk}	/

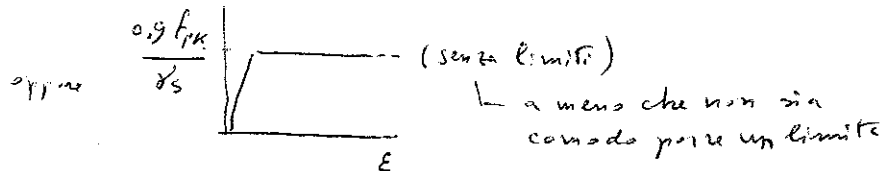
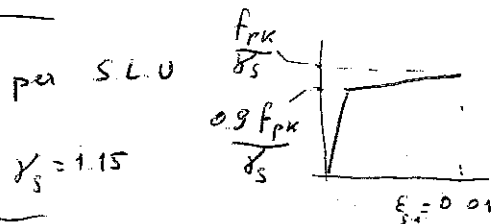
EC2

punto 4.2.3.5.4

ACCIAIO DA PRECOMPRESSO

al tiro $\sigma_{p,max} \leq \text{MIN} (0.80 f_{pk} ; 0.90 f_{p0.1k})$ TENSIONI DI PRECOMPRESSIONE INIZIALE

in esercizio $\sigma_{pmo} \leq \text{MIN} (0.75 f_{pk} ; 0.85 f_{p0.1k})$



punto 3.3.4.4 / $E_s = 200 \text{ GPa}$ per fili e barre ; 190 GPa per trefoli

LIMITI TENSIONALI

SLU N.I. D.M. 8.1.86

CALCESTRUZZO 4.3.4.5 - 4.3.4.6

TIRO		ESERCIZIO		
COMP.	TRAZ.	COMPRESSIONE		
0.6 fck	0.10 fck	AMBIENTE	COMBINAZIONE	
			RARA	Q. PERMAN
		Poco o MODERATAH. AGGRESSIVO	0.6 fck	0.45 fck
		MOLTO AGGRESSIVO	0.5 fck	0.4 fck
		TRAZIONE		
		0.07 fck		

Acciaio 4.3.4.8.

fornisce valori identici a quelli delle T.A.

CADUTE DI TENSIONE NELLE STRUTTURE PRECOMPRESSE

01

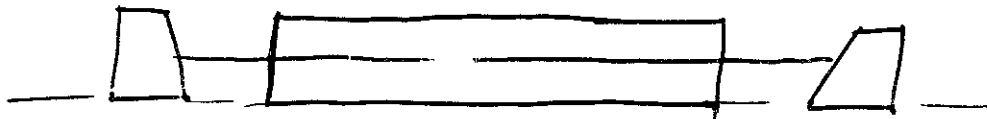
Una parte della precompressione si perde nel tempo a causa delle cadute di tensione. Queste devono essere valutate adeguatamente in fase di progetto in modo tale che sia possibile prevedere in modo più esatto possibile lo stato definitivo della struttura in fase di esercizio
 Le cadute di tensione sono dipendenti dalle modalità di precompressione e dalle caratteristiche viscoelastiche dei materiali.

		C. S.	C. N.
C. ISTANTANEE	Accoppiamento Elastico		*
	Attrito	x	
	Rientro ancoraggi	x	
C. DIFFERITE	Ritiro	x	x
	Fluage	x	x
	Rilassamento	x	x

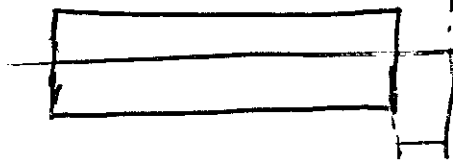
Acciaio cemento Elastico

Nella precompressione a cavi aderenti la tensione delle armature viene effettuata prima del getto e la precompressione si trasferisce per adesione a maturazione avvenuta.

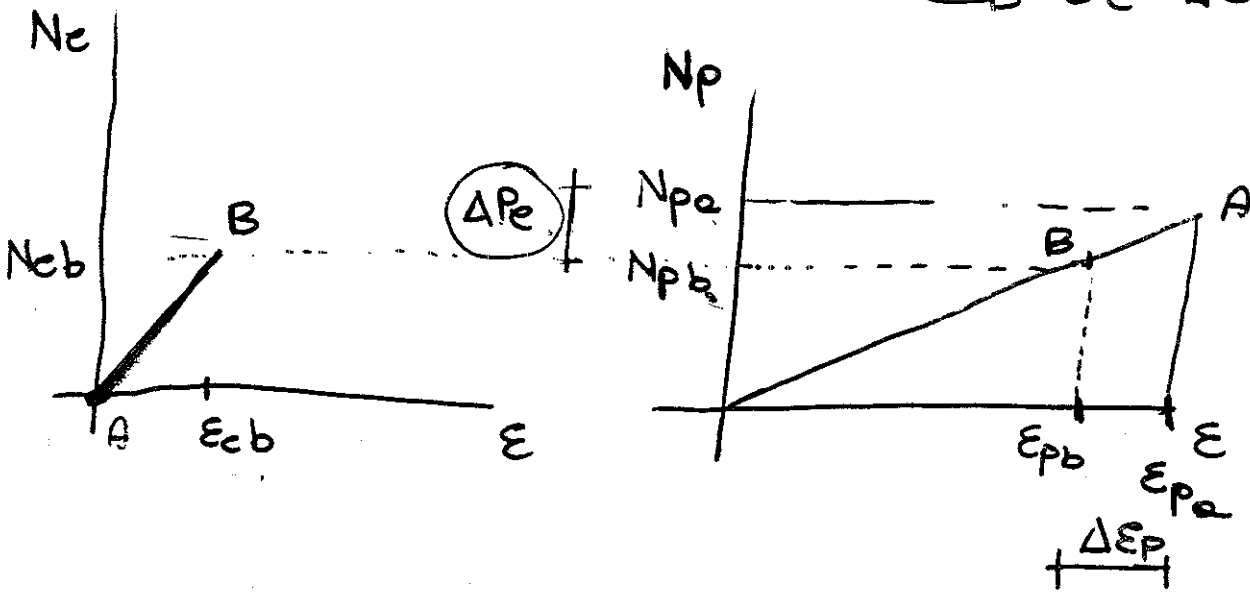
(A)



(B)



$\epsilon_c = \Delta \epsilon_p$



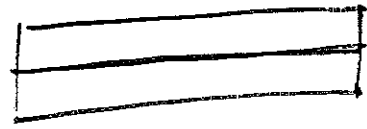
$N_{cb} = N_{pb}$

$\Delta \epsilon_p = \epsilon_{cb}$

Il calcestruzzo si accresce di $\epsilon_c = \Delta \epsilon_p$, cio-
comporta un analogo accrescimento dell'acciaio
con una conseguente caduta di tensione.

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta P_e}{A_p \cdot E_p}$$

■ Nel caso di caso³
 biassiale



$$\varepsilon_c = \frac{P_0 - \Delta P_e}{A_c E_c}$$

$$\Delta \varepsilon_p = \varepsilon_c$$

$$\frac{\Delta P_e}{A_p E_p} = \frac{P_0 - \Delta P_e}{A_c E_c}$$

$$\Delta P_e \left(\frac{1}{A_p E_p} + \frac{1}{A_c E_c} \right) = \frac{P_0}{A_c E_c}$$

$$\frac{\Delta P_e}{A_c E_c} \left(\frac{A_c E_c}{A_p E_p} + 1 \right) = \frac{P_0}{A_c E_c}$$

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{1}{n} \quad n=6$$

$$\Delta P_e = \frac{P_0}{\left(\frac{A_c}{A_p n} + 1 \right)}$$

Le cadute di tensione per def. elastica diminuiscono (a parità di P_0 e A_p) all'aumentare dell'area di elastuzzo

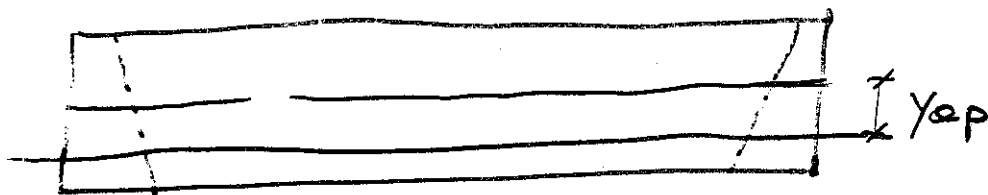
■ Nel caso di cavo non baricentrico si avverte sempre

$$\Delta \varepsilon_p = \varepsilon_c$$

ma questa volta ε_c deve essere calcolato a livello del cavo

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_0 - \Delta P_e}{A_c E_c} + \frac{(P_0 - \Delta P_e) Y_{ap}}{I_c E_c}$$



mentre

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta P_e}{E_p A_p}$$

$$\sigma_{px} = \sigma_{p0} e^{-f(\alpha + \beta x)}$$

4.3.4.2. Effetti dell'attrito.

Il calcolo degli effetti dell'attrito si può effettuare come segue: la tensione σ_{p0} applicata all'estremità del cavo, a causa dell'attrito, risulta, alla distanza x , ridotta al valore σ_{px} dato dalla relazione:

$$\sigma_{px} = \sigma_{p0} e^{-f(\alpha + \beta x)}$$

nella quale:

- (f) è il coefficiente di attrito dipendente dalle caratteristiche delle superfici del cavo e dell'alloggiamento che si trovano a contatto;
- (α) è la somma dei valori assoluti delle deviazioni angolari di progetto del cavo comprese nel tratto di lunghezza x , espresse in radianti; nel caso di deviazioni altimetriche e planimetriche concomitanti, i relativi angoli saranno composti geometricamente;
- (β) rappresenta la deviazione angolare convenzionale del cavo, espressa in rad/m, che tiene conto degli inevitabili contatti accidentali che, anche nel caso di cavo rettilineo correttamente realizzato, si verificano fra i vari elementi del cavo, l'alloggiamento e gli eventuali dispositivi distanziatori.

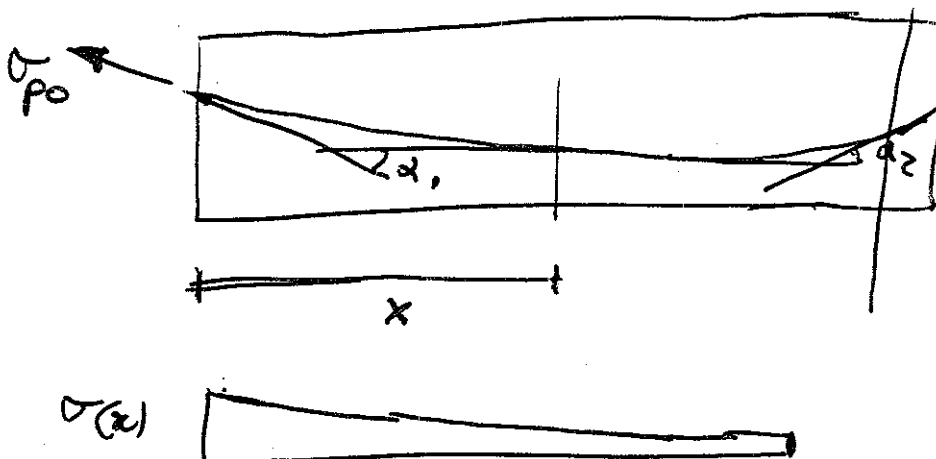
Salvo il caso di determinazione sperimentale, si adotteranno per f e β i valori seguenti, validi nell'ipotesi che le armature siano prive di ossidazione:

- cavo su calcestruzzo liscio: $f = 0,5$;
- cavo in guaina metallica: $f = 0,3$;
- $\beta = 0,01$ rad/m.

Quando $f(\alpha + \beta x)$ risulta minore di 0,25, per il calcolo di σ_{px} si potrà adottare lo sviluppo in serie della formula esponenziale limitato al secondo termine:

$$\sigma_{px} = \sigma_{p0} [1 - f(\alpha + \beta x)].$$

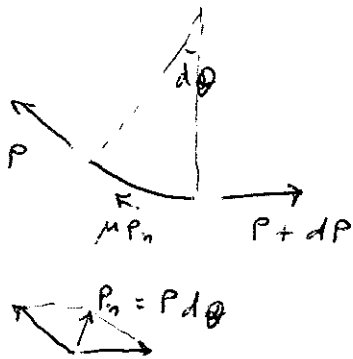
$$\sigma_{px} = \sigma_{p0} (1 - f(\alpha + \beta x))$$



CADUTE DI TENSIONE PER ATTRITO

EC2

4.2.3.5.5 (8)



$$dP + \mu P_n = 0$$

$$dP + \mu P d\theta = 0$$

$$\frac{dP}{P} = -\mu d\theta$$

$$\int \frac{dP}{P} = -\mu \int d\theta$$

$$\left| \log P \right|_{P_0}^{P_x} = -\mu \theta$$

$$\log P_x - \log P_0 = -\mu \theta$$

$$\log \frac{P_x}{P_0} = -\mu \theta$$

$$\frac{P_x}{P_0} = e^{-\mu \theta}$$

$$P_x = P_0 e^{-\mu \theta}$$

$$\Delta P = (1 - e^{-\mu \theta}) P_0$$

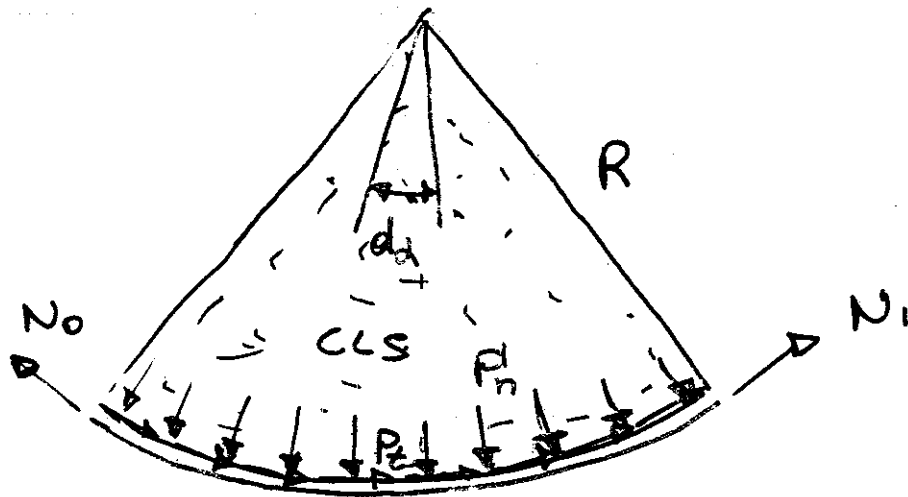
più in generale

$$\Delta P = P_0 \left(1 - e^{-\mu(\theta + Kx)} \right)$$

$$\mu = 0.17 \quad \text{fili}$$

$$0.13 \quad \text{tubo}$$

$$0.005 < K < 0.010$$



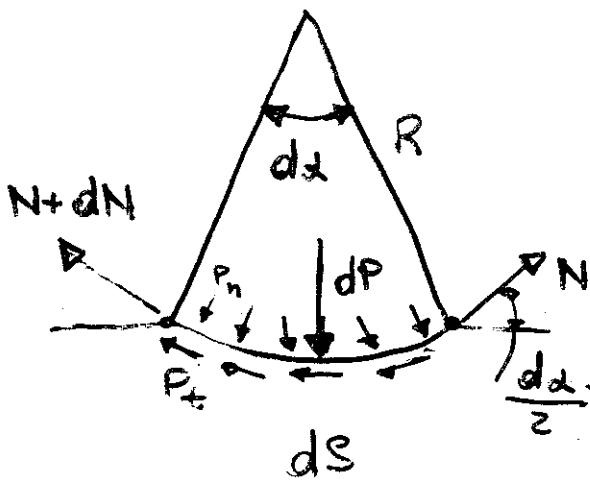
$$P_t = P_n \, de$$

de coeff. attrito filo guaina

P_t tensione tangenziale

P_n tensione normale

Estrapolando un elemento infinitesimo $dS = R \, d\alpha$



Eq vert.

$$dP = N \, \text{sen} \frac{d\alpha}{2} + (N+dN) \, \text{sen} \frac{d\alpha}{2}$$

$$dP = P_n \, dS = P_n \, R \, d\alpha$$

$$\text{sen} \frac{d\alpha}{2} \approx \frac{d\alpha}{2}$$

$dN \, \text{sen} \frac{d\alpha}{2}$ inf. di ordine superiore

$$P_n \, R \, d\alpha = N \, d\alpha$$

$$P_n = \frac{N}{R}$$

Eq orizz.

$$(N+dN) \, \text{cos} \frac{d\alpha}{2} - N \, \text{cos} \frac{d\alpha}{2} + P_t \, dS = 0$$

$$\cos \frac{d\alpha}{2} \approx 1$$

$$ds = R d\alpha$$

$$P_t = f_e P_n$$

$$\cancel{N} dN - \cancel{N} + f_e P_n R d\alpha = 0$$

$$P_n = \frac{2}{\pi} P$$

$$dN = - f_e N d\alpha$$

$$\frac{dN}{N} = - f_e d\alpha$$

Integrando

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^\alpha - f_e d\alpha$$

$$\left[\ln N \right]_{N_0}^N = - f_e \left[\alpha \right]_0^\alpha$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = - f_e \alpha$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-f_e \alpha}$$

$$N = N_0 e^{-f_e \alpha}$$

Ricordando che

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots$$

e fermandosi al 2^o termine

$$N = N_0 (1 - j_e \alpha)$$

Essendo presenti calcoli di tensione per effetto anche in tracciati rettilinei si introduce un coefficiente di effetto di linea j_e e quindi per un tratto di lunghezza l .

$$N = N_0 e^{-j_e l \alpha}$$

che sommato al primo termine restituisce

$$N = N_0 e^{-(j_e \alpha + j_e l \alpha)}$$

la quale può essere sviluppata in serie per $(j_e \alpha + j_e l \alpha) < 0,25$ (N.2)

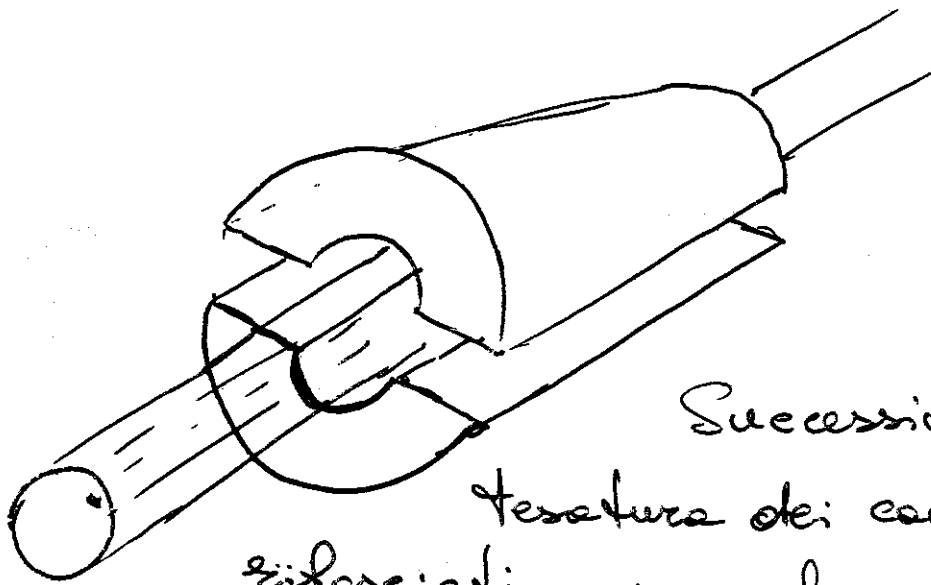
$$N = N_0 (1 - j_e \alpha - j_e l \alpha)$$

$$= N_0 (1 - j_e (\alpha + \frac{j_e l \alpha}{j_e} p))$$

$$\frac{j_e l \alpha}{j_e} = \beta$$

$$= N_0 (1 - j_e (\alpha + \beta p))$$

RIENTRO ANCORAGGI

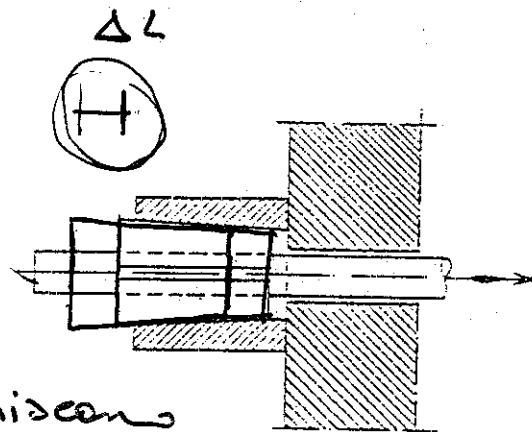


Successivamente alla
tessitura dei cavi questi vengono
rilasciati, prima che avvenga il
sezzeaggio i cavi rientrano (qualche milli-
metro) trascinandosi con se i cunei.

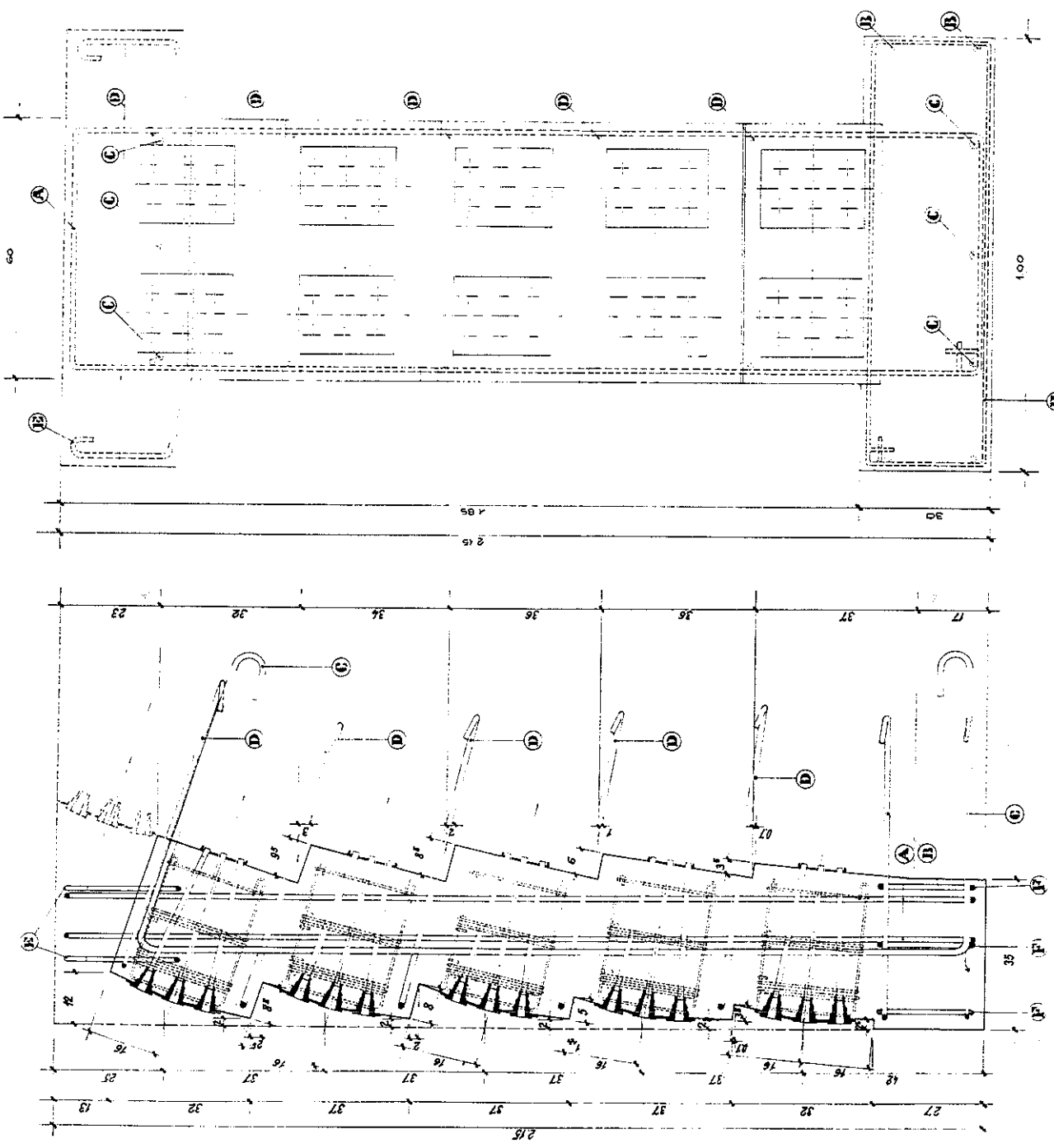
Tale rientro rapportato alla lunghezza della
trave fornisce la deformazione per rientro degli
ancoraggi:

$$\epsilon_{ra} = \frac{\Delta L}{L} \quad \Delta \sigma_{ra} = E_p \frac{\Delta L}{L}$$

$$\Delta P_{ra} = \Delta \sigma_{ra} A_p$$

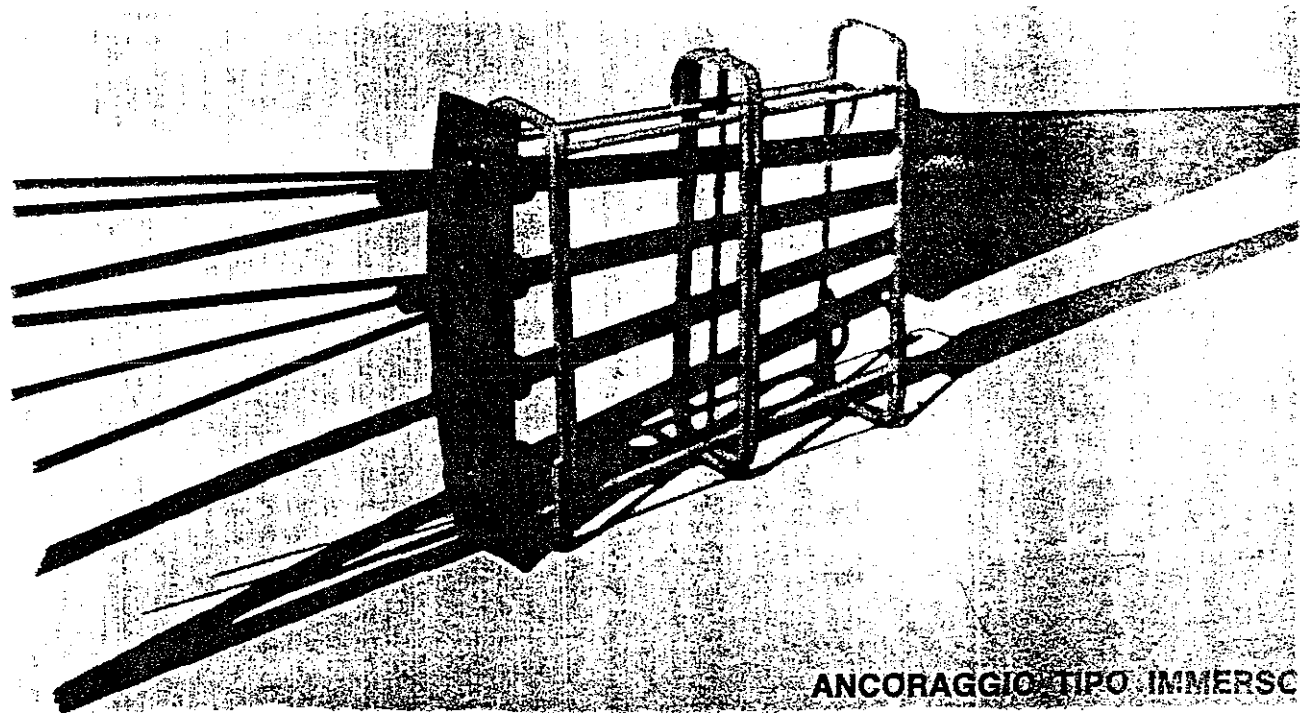
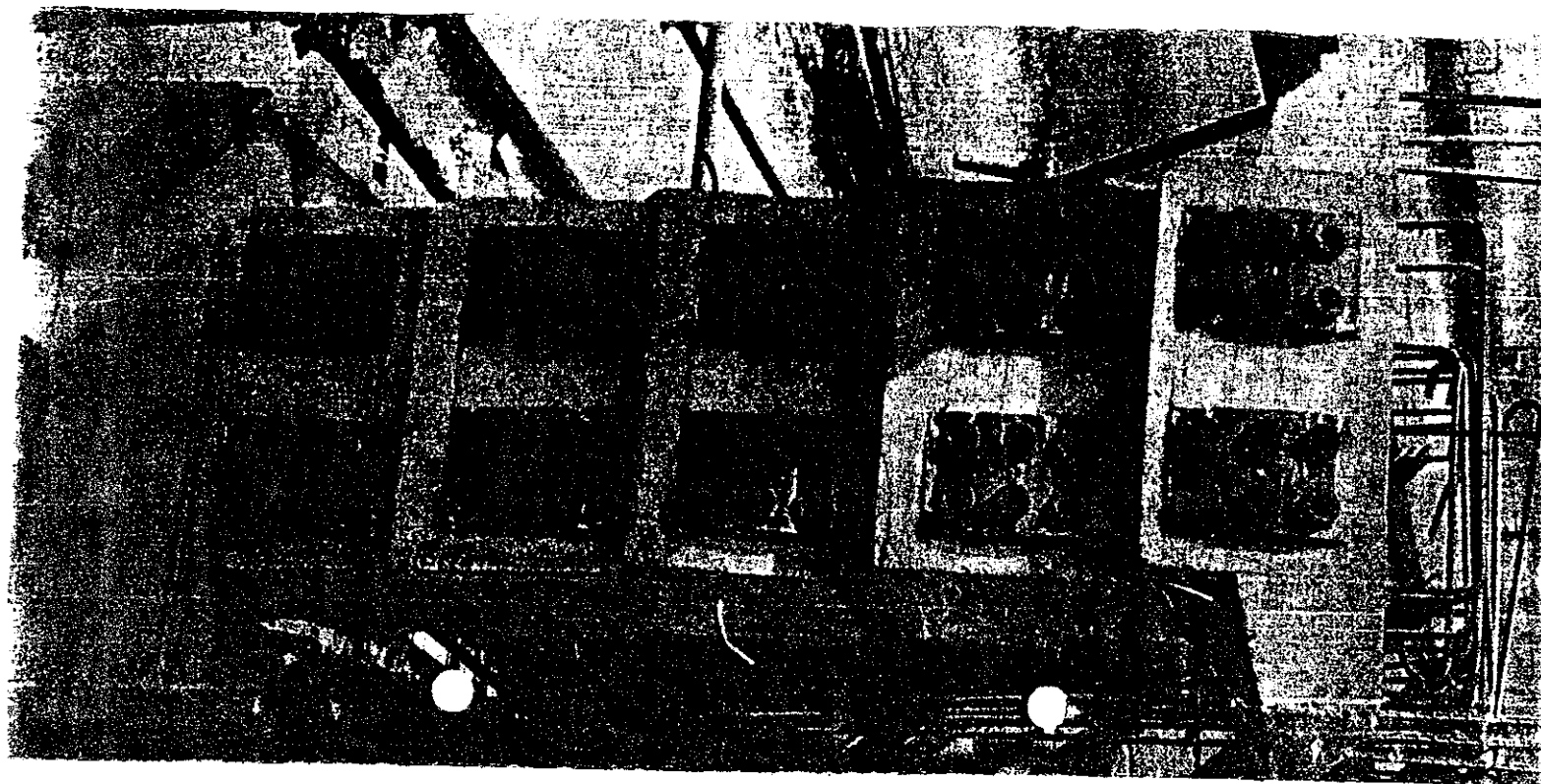


Le case produttrici forniscono
insieme agli apparecchi di ancoraggio i valori di
 ΔL



Esempio di testata prefabbricata già eseguita

S ci AP m as air gu



ANCORAGGIO TIPO IMMERSO

D.M. 9.1.86

4.3.4.8. Deformazioni lente.

a) Ritiro

Per il calcolo delle cadute di tensione, salvo più precise valutazioni (vedi punto 2.1.6.) si possono adottare i seguenti valori:

— 0,0003 se la struttura viene precompressa prima di 14 giorni di stagionatura;

— 0,00025 se la struttura viene precompressa dopo 14 giorni di stagionatura.

Per strutture particolarmente sottili ed ambiente particolarmente secco dovranno adottarsi valori superiori.

b) Viscosità.

La deformazione lenta sotto carico, depurata del ritiro, può, salvo più precise valutazioni (vedi punto 2.1.7.), essere assunta pari ad almeno (2) volte la deformazione elastica in esercizio per le combinazioni quasi permanenti, sempre che la struttura venga sollecitata non prima di 14 giorni di stagionatura.

Se la struttura viene invece sollecitata entro un tempo minore, la deformazione lenta sotto carico si assumerà non inferiore a (2,3) volte la deformazione elastica in esercizio per le combinazioni quasi permanenti.

Se la maturazione del conglomerato avviene con procedimenti particolari, è ammessa l'adozione di un minor valore della deformazione lenta purché sperimentalmente giustificato.

Il calcolo della caduta di tensione per viscosità dovrà essere effettuato, con riferimento alla tensione che, nella sezione considerata, agisce sulla fibra di conglomerato posta al livello della armatura.

Nelle travi ad armatura pre-tesa, nella esecuzione delle quali intercorre sempre un intervallo di tempo tra la tesatura e l'applicazione dello sforzo di precompressione al conglomerato, il calcolo della deformazione elastica del calcestruzzo, necessario per la successiva valutazione di quella differita nel tempo, dovrà basarsi sul valore assunto dalla tensione nell'acciaio al momento della applicazione dello stato di coazione al conglomerato, desunto dalla curva sperimentale di rilassamento determinata in condizioni simili a quelle presenti in fase esecutiva, ponendo particolare attenzione all'influenza sul rilassamento dell'acciaio dell'eventuale riscaldamento utilizzato per accelerare l'indurimento del conglomerato.

Ritiro

Se con ϵ_{rit} si è indicata la deformazione nel calcestruzzo per ritiro, la caduta di precompressione sarà pari:

$$\Delta P_{rit} = \epsilon_{rit} \bar{\sigma}_p A_p$$

Se $\epsilon_{rit} = 0.0003$ $E_p = 200.000 \text{ Mpa}$

$$\Delta P_{rit} = 60 A_p$$

Si ha una caduta di tensione pari a 60 N/cm^2 di area di armatura

Viscosità

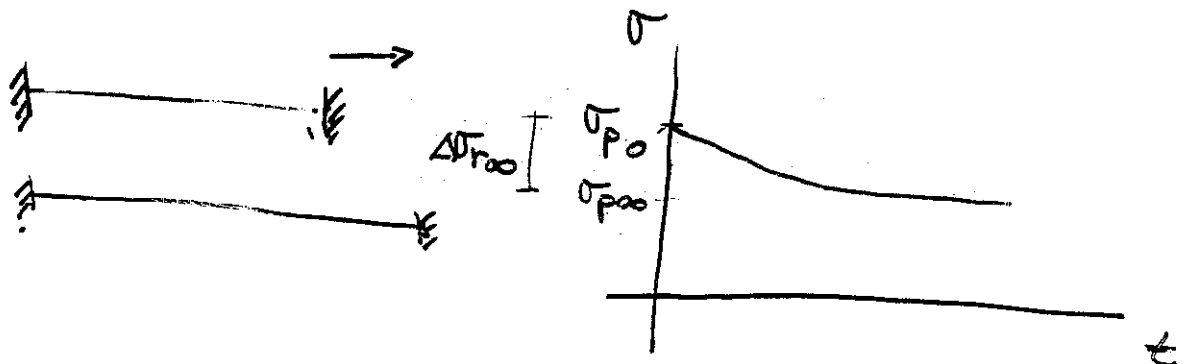
Una volta nota la deformazione elastica ϵ_e per le combinazioni quasi permanenti in corrispondenza delle fibre poste a livello del cavo si ha

$$\Delta P_{vis} = \frac{z \epsilon_e}{\epsilon_{vis}} E_p A_p$$

Rilassamento

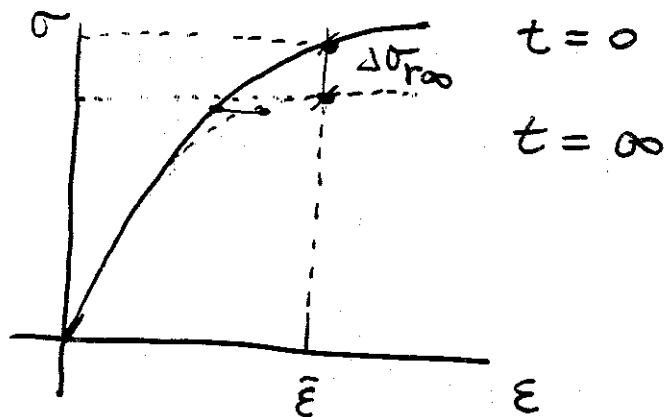
Per rilassamento si intende una caduta di tensione nell'acciaio a deformazione costante.

Se ho un cavo fra due estremità - fisse in modo tale da avere una tensione σ_p e mantengo ferme queste estremità - si nota - con il passare del tempo una diminuzione della tensione



l'entità della caduta di tensione per rilassamento è funzione della tensione iniziale.

Per bassi valori della tensione iniziale non si verifica il rilassamento, mentre a elevati valori della tensione il rilassamento cresce.



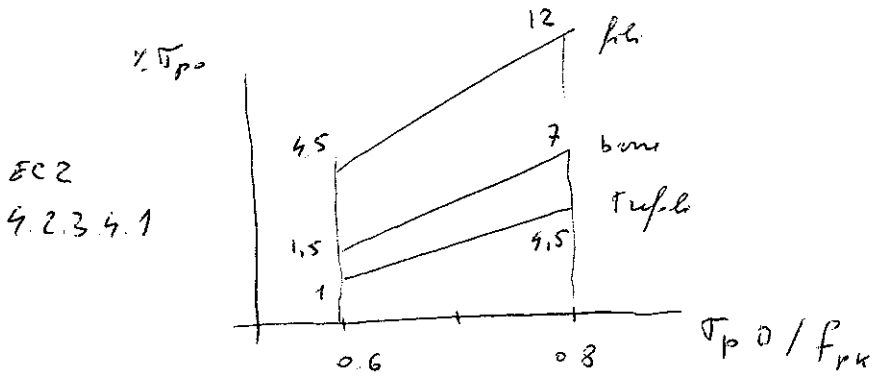
La normativa Italiana consente di determinare l'entità della caduta di tensione per rilassamento mediante delle prove sperimentali.

In assenza di tali prove la caduta di tensione a tempo ∞ $\Delta\sigma_{\infty}$ ad una temperatura di 20°C e per una tensione iniziale $\sigma_{p0} = 0.75 f_{ptk}$ può assumersi pari ai seguenti valori:

TIPO ARMATURA	$\Delta\sigma_{\infty}$
Filo	
Treccia	$0.15 \sigma_{p0}$
Trefolo	$0.20 \sigma_{p0}$
Barra	$0.18 \sigma_{p0}$
	$0.12 \sigma_{p0}$

Per una tensione inferiore a $0.5 f_{ptk}$ tale caduta di tensione è nulla e per tensioni comprese fra 0.5 e $0.75 f_{ptk}$ la caduta per rilassamento varia con legge parabolica con origine in $0.5 f_{ptk}$ e tangente orizzontale

CADUTE DI TENSIONE PER RILASSAMENTO



← dopo 1000 or
($T = 20^\circ$)

a tempo infinito

3 volte tanto

CADUTE DI TENSIONE PER RITIRO

$$\Delta \sigma = \epsilon_{\text{rit}} E_f A_f$$

$$\epsilon_{\text{rit}} \approx 0.3 \times 10^{-3}$$

vedi EC2 3.1.2.5.5 e Tab. 3.4

DM 96 2.16

EC2 appendice 1 (A.1.1.3)

CADUTE DI TENSIONE PER EFFETTI VISCOSI,

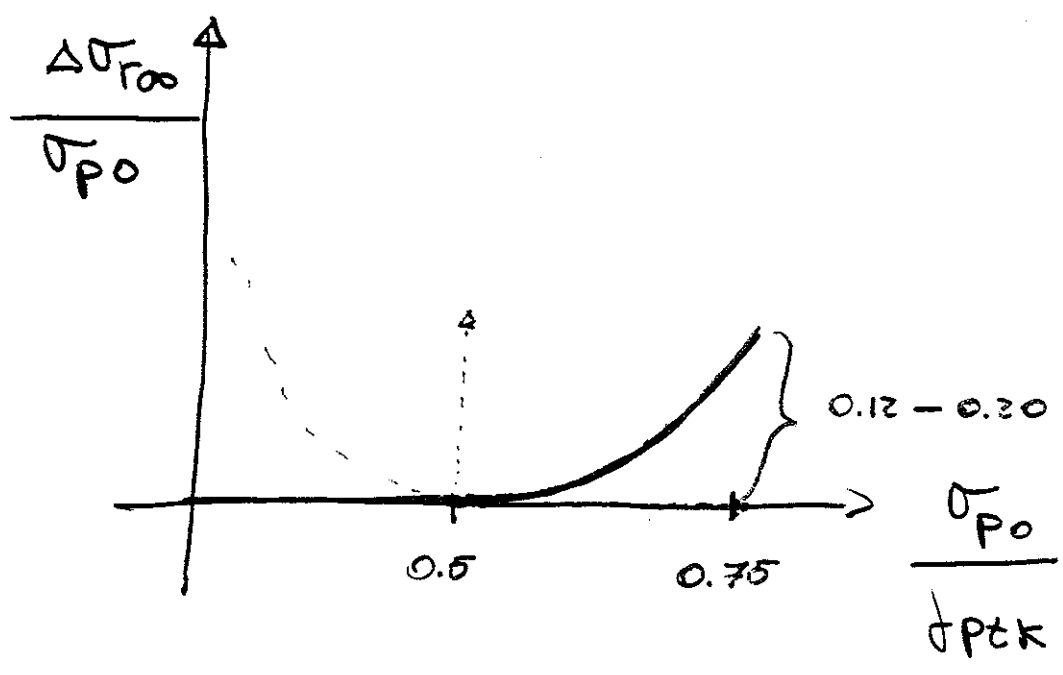
$$\Delta \sigma = \epsilon_{\text{vis}} E_f A_f$$

$$\epsilon_{\text{vis}} \approx 2 \epsilon_{\text{el}}$$

vedi EC2 3.1.2.5.5 e Tab. 3.3

DM 96 2.1.7

EC2 appendice 1 (A.1.1.2)



Interdipendenza Ritiro - Viscosità - Rilassamento
 Il rilassamento è stato definito come una caduta di tensione a deformazione costante, in realtà per la contemporanea presenza di ritiro e flusso il rilassamento non avviene a deformazione costante ma variabile.

In conseguenza di ciò le cadute di tensione per rilassamento possono essere ridotte al valore

$$\Delta' \sigma_{T00} = \Delta \sigma_{T00} \left(1 - \frac{2.5 \Delta \sigma_{SSF}}{\sigma_{P0}} \right)$$

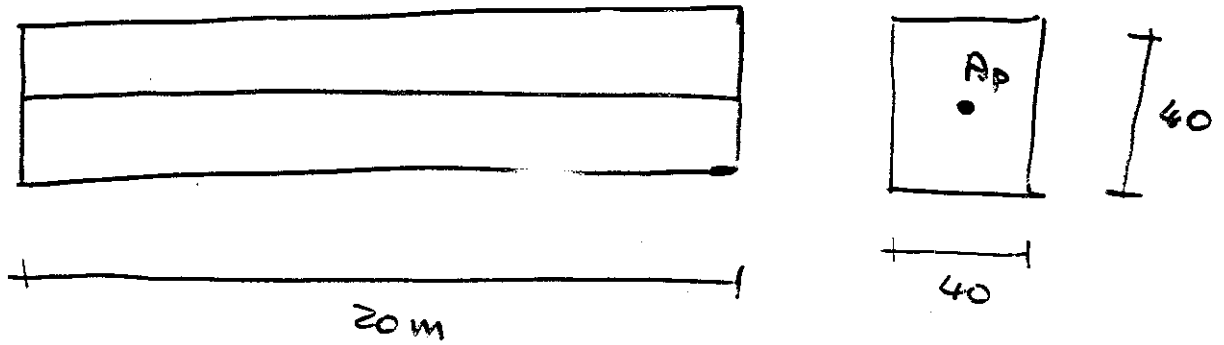
dove

$\Delta \sigma_{SSF}$ cadute di tensione per ritiro + flusso

$$\Delta P_r = A_p \Delta \sigma'_{T00}$$

Esempio Trave a cavi aderenti

C16



$A_p = 12 \text{ cm}^2$ di Trefoli $f_{pk} = 1800 \text{ MPa}$
 $f_{po} = 1400 \text{ MPa}$ $\rightarrow P_0 = A_p \cdot f_{po} = 1680 \text{ kN}$
 σ_{po} $12 \times 10^2 \cdot 1400$

za Def. elastica

$$\Delta P_e = \frac{P_0}{\left(\frac{A_c}{A_p n} + 1\right)} = \frac{1680}{\left(\frac{40 \times 40}{12 \times 6} + 1\right)} = 68,8 \text{ kN}$$

$$\frac{\Delta P_e}{P_0} = 4.1 \%$$

$$\epsilon_{ep} = \frac{\Delta P_e}{A_p E_p} = \frac{68.8 \times 1000}{1200 \times 200.000} = 0.00028 = \epsilon_c$$

$$\Delta \sigma_e = 0.00028 \times E_p = 56 \text{ MPa}$$

za Ritiro

$$\Delta P_{rit} = \epsilon_{rit} E_p A_p = 0.0003 \times 200.000 \times 1200 = 72 \text{ kN}$$

$$\frac{\Delta P_e}{P_0} = 4.2 \%$$

Fluage

$$\Delta P_{vis} = 2 \varepsilon_e E_p A_p = 2 \times 0.00028 \times 200.000 \times 1200 = 1344 \text{ KN}$$

$$\frac{\Delta P_{vis}}{P_0} = 7.8 \%$$

Rilassamento

$$\sigma_{po} = \sigma_{po} - \Delta \sigma_e = 1400 - 56 = 1344 \text{ Mpa}$$

$$\frac{\sigma_{po}}{\sigma_{pek}} = \frac{1344}{1800} = 0.746 \approx 0.75$$

$$\Delta \sigma_{\tau_{00}} = 0.18 \sigma_{po} = 0.18 \times 1344 = 241 \text{ Mpa}$$

Tenendo conto dell'interdipendenza di fluage
rilassamento e ritiro

$$\begin{aligned} \Delta' \sigma_{\tau_{00}} &= \Delta \sigma_{\tau_{00}} \left(1 - \frac{2.5 \Delta P_{ssf}}{P_0} \right) \\ &= 241 \left(1 - \frac{2.5 \cdot (72 + 134)}{1680} \right) = 167 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\Delta' P_{\tau_{00}} = \Delta' \sigma_{\tau_{00}} A_p = 167 \cdot 1200 = 200 \text{ KN}$$

$$\frac{\Delta' P_{\tau_{00}}}{P_0} = 11.8 \%$$

Se la trave fosse a cavi scorrevoli mancherebbe ^{c18}
la caduta per deformazione elastica mentre
si dovrebbe aggiungere il rientro cuneo q₁ e
caduta per attrito

Rientro

Se il cuneo rientra di 2mm e supposto che la
temperatura avviene da ambo i lati si ha

$$\epsilon_{ra} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{4}{20000} = 0.0002$$

$$\Delta P_{ra} = \epsilon_{ra} E_p P_p = 0.0002 \cdot 200.000 \cdot 1200 = 48 \text{ KN}$$

$$\frac{\Delta P_{ra}}{P_0} = \frac{48}{1680} = 2.8\%$$

Attrito

Essendo il cavo rettilineo si ha

$$\alpha = 0$$

$$\sigma_{P_{1/2}} = \sigma_{P_0} (1 - f(\alpha + \beta x))$$

$$f = 0.3 \text{ ghisa}$$

metallice

$$\beta = 0,01 \text{ rad/m}$$

$$P_{1/2} = P_0 (1 - f \beta x) = 1680 (1 - 0.3 \cdot 0.01 \cdot 10) = 1679 \text{ KN}$$

$$\Delta P_a = P_0 - P_{1/2} = 51 \text{ KN}$$

$$\frac{\Delta P_a}{P_0} = \frac{51}{1680} = 3\%$$

VERIFICA DI SEZIONI IN C.A.P.

Le verifiche vengono effettuate utilizzando i modelli di comportamento del materiale già usati per il cemento armato ordinario.

Il problema della verifica è però un po' più complesso rispetto al caso del cemento armato ordinario perché nel precompresso abbiamo due azioni (quella di precompressione e quella dei carichi) che variano indipendentemente l'una dall'altra:

- la forza di precompressione ha il valore massimo al tiro (P_0) e si riduce nel tempo per le cadute di tensione lente (fino a P_{00});
- le caratteristiche di sollecitazione dovute ai carichi variano da un minimo sempre agito (valore caratteristico dei carichi permanenti) al valore dovuto ai carichi totali (col valore caratteristico) fino a un valore corrispondente al raggiungimento di ϵ limite.

Di conseguenza, mentre nel cemento armato ordinario ^{le verifiche} agli stati limite di tensioni di esercizio (o col metodo delle tensioni ammissibili) e agli stati limite ultimi forniscono risultati sostanzialmente corrispondenti, nel c.a.p. non si può dire a priori quale sia la situazione più gravosa.

VERIFICHE DA EFFETTUARE

SE SI USA IL METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI

(DM 92)

1) Verifica dello stato Tensionale

In caso di precompressione totale (o limitata) si determinano le tensioni provocate da P e dai carichi, utilizzando il modello del materiale lineare con calcestruzzo reagente a trazione (I stadio).

In caso di precompressione parziale si determinano le tensioni provocate da P e dai carichi, utilizzando il modello di materiale lineare con calcestruzzo non reagente a trazione (II stadio).

Si considerano le combinazioni più gravose di P (P_0, P_{00}) e dei carichi (minimi, massimi).

Le tensioni ammissibili sono:

per il calcestruzzo $0.08 \div -0.48 R_{ck}$ al Tiro
 $0.06 \div -0.38 R_{ck}$ in esercizio

per l'acciaio $0.85 \text{ o } 0.90 f_{p0.2k}$ (o $f_{pk} = f_{pk}$) al Tiro
 $0.60 f_{pk}$ in esercizio

2) Verifica a fessurazione

Solo in caso di precompressione totale (o limitata) per strutture in ambiente aggressivo si controlla che

$$M_{fess} \geq 1.2 M_{max} \text{ in esercizio}$$

determinando il momento di fessurazione col modello lineare del materiale, con calcestruzzo reagente a trazione

3) Verifica a rottura

Si procede sostanzialmente come allo stato limite ultimo, con modello del materiale non lineare.

Si determina il momento ultimo e si controlla che
sia $\geq 1.5 M_{max}$ [per un maggior dettaglio, vedi S.L.U.]

4) Verifica a taglio

Si determinano le tensioni tangenziali da taglio, tenendo conto della eventuale riduzione del taglio "efficace" per effetto della precompressione.

Si valutano le tensioni principali, dovute alle tensioni tangenziali da taglio e alle tensioni normali da P ed M , e se ne confrontano i valori con i limiti di tensione già citati.

VERIFICHE DA EFFETTUARE

SE SI USA IL METODO DEGLI STATI LIMITE (EC2)

1) Stato limite di Tensioni di esercizio

Si fa ancora riferimento a precompressione Totale, limitata o parziale, riferendosi ai carichi di esercizio.

Si usa il modello del materiale del I stadio per precompressione totale o limitata, del II stadio per precompressione parziale.

Si considerano le combinazioni più gravose di P (P_0, P_{os}) e dei carichi (minimi, massimi).

Limiti da rispettare (secondo le modifiche del NAD Italiano):

per il calcestruzzo: $0.60 f_{ckj}$ al Tiro

	0.50	0.40	f_{ck}	ambiente 3,6	} in servizio
	0.60	0.45	f_{ck}	" 1,2	
combin. ↑ rara	↑ ↑		↑ ↑	↑ ↑ quasi perman.	

per l'acciaio: $0.85 - 0.90 f_{p02k}$ (o f_{p1k} o f_{p2k}) al Tiro

$0.60 f_{pk}$ in servizio

2) Stato limite di fessurazione

Vale tutto quanto già visto per il cemento armato ordinario

(la spaziatura tra le barre necessaria per limitare - senza calcolo - l'ampiezza delle lesioni è minore nel c.a.p. rispetto ai valori del cemento armato ordinario)

3) Stato limite ultimo (a flessione)

Si usa il modello di materiale non lineare. Occorre ovviamente tener conto del fatto che la ϵ dell'armatura di precompressione differisce da quella del calcestruzzo adiacente di una quantità pari alla deformazione iniziale di precompressione.

Dalla condizione di equilibrio alla traslazione ($N=0$) si determina (con due distinti diagrammi di ϵ - compressione sup. e compressione inf.) i limiti massimo e minimo del momento flettente e li si confronta con i valori massimo e minimo del momento di calcolo.

4) Stato limite ultimo per taglio

Valgono le stesse indicazioni del cemento armato ordinario, purché si consideri come taglio agente il valore ridotto per effetto della precompressione.

TIRANTE PRECOMPRESSO

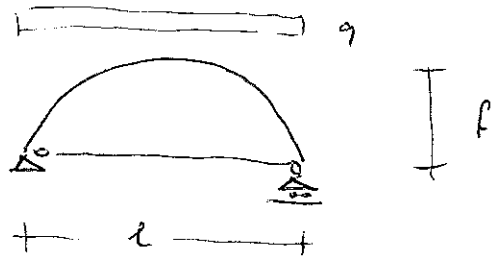
Ad esempio:

catena di un arco

$$N = \frac{q l^2}{8 f} \quad (\text{trazione})$$

[catena precompressa a cavi scorrevoli]

Metodo delle tensioni ammissibili, verifica delle tensioni
(oppure metodo degli stati limite, S.L. di tensioni di snacco)



AL TIRO $P = P_0$ (max agli estremi; si riduce al centro
per le perdite di tensione da attrito)

$q = q_{\min}$ (solo peso proprio della struttura)

N.B. assunto P come quantità sempre positiva

La sezione in calcestruzzo (con le armature ordinarie) è soggetta

$$a \quad N_0 = -P_0 + \frac{q_{\min} l^2}{8 f} \quad ; \quad \sigma_c = \frac{N_0}{A_{ci}} < 0 \quad (\text{compressione})$$

Si deve imporre il limite

$$\sigma_c \geq -0.48 R_{ckj} \quad \text{per T.A. (o analogo, per S.L.E.)}$$

$$\text{ovvero} \quad -P_0 + \frac{q_{\min} l^2}{8 f} \geq -0.48 R_{ckj} A_{ci}$$

$$P_0 \leq 0.48 R_{ckj} A_{ci} + \frac{q_{\min} l^2}{8 f} \quad (1)$$

IN ESERCIZIO

$P = P_{\infty}$ (in prima approssimazione posso assumerlo pari a $0.85 P_0$, ma poi devo calcolare esattamente le perdite di precompressione)

$q = q_{\max}$ (peso proprio e carichi portati - col loro valore caratteristico)

La sezione in calcestruzzo (con l'armatura ordinaria) è

sofferta a
$$N_{\infty} = -P_{\infty} + \frac{q_{\max} l^2}{8f}, \quad \sigma_c = \frac{N_{\infty}}{A_{ci}}$$

Se si vuole che la sezione rimanga compressa si deve imporre il limite $\sigma_c \leq 0$

$$-P_{\infty} + \frac{q_{\max} l^2}{8f} \leq 0 \quad P_{\infty} \geq \frac{q_{\max} l^2}{8f} \quad (2a)$$

Se invece si accetta una moderata trazione ($0.06 R_{ck}$)

si impone il limite $\sigma_c \leq 0.06 R_{ck}$

$$-P_{\infty} + \frac{q_{\max} l^2}{8f} \leq 0.06 R_{ck} A_{ci}$$

$$P_{\infty} \geq \frac{q_{\max} l^2}{8f} - 0.06 R_{ck} A_{ci} \quad (2b)$$

Se assumo $P_{\infty} = 0.85 P_0$, le (1) e (2) sono due relazioni nelle due incognite P_0 e A_{ci}

In particolare, se uso la 2a posso da questa ricavare direttamente P_0 (e quindi A_p) e poi determinare

A_{ci} dalla (1), utilizzando in entrambe il simbolo =

A_p deve essere
$$A_p = \frac{P_{\infty}}{0.6 f_{pk}} = \frac{0.85 P_0}{0.6 f_{pk}}$$

A ROTTURA (o STATO LIMITE ULTIMO)

In tal caso la sezione sarà tutta tesa e l'armatura di precompressione sarà snervata.

Facendo riferimento all'EC2, esse lavorerà a $\sigma_r = 0.9 \frac{f_{pk}}{\gamma_s}$

I carichi agenti sono quelli permanenti $\times 1.4$ e variabili $\times 1.5$
quindi $q \approx 1.45 q_{max}$

$$\text{Si ha } N_{sd} = \frac{1.45 q_{max} l^2}{8 f} \quad \text{e la verifica è}$$

$$N_{Rd} = 0.9 \frac{f_{pk}}{\gamma_s} A_p \quad N_{Rd} \geq N_{sd}$$

$$\text{Si noti che } N_{Rd} = \frac{0.9/\gamma_s}{0.6} P_{\infty} \approx 1.3 P_{\infty}$$

$$\text{mentre } N_{sd} = 1.45 \frac{q_{max} l^2}{8 f}$$

e confrontando con la relazione 2a (o a maggior ragione 2b) si vede che da questa condizione risulta necessaria un'armatura di precompressione (e un P_{∞}) leggermente maggiore di quanto imposto al Tiro (15% in più).

Non è invece preoccupante la situazione con carichi minimi (anche se si considera $P_d = 1.2 P_k$)

— o almeno così mi sembra (è utile verificare se è vero)

Carichi equivalenti alla precampionatura

$$d\theta$$

$$ds = r d\theta$$



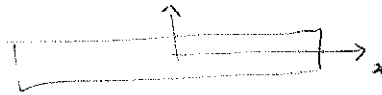
$$P d\theta = \frac{P ds}{r}$$

queste forze \vec{P} inclinate, ma precampionate \approx alle sue comp. verticali

Il caso trasmette un'azione distribuita verso l'alto.

pari a $\frac{P}{r}$ per unità di lunghezza.

Es. caso parabolico



$$y = a x^2$$

$$y' = \frac{8f}{L^2} x$$

$$y'' = \frac{8f}{L^2}$$

per $x = \frac{L}{2}$ $y = f$

$$\hookrightarrow y = \frac{4f}{L^2} x^2$$

$$y' \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{4f}{L}$$

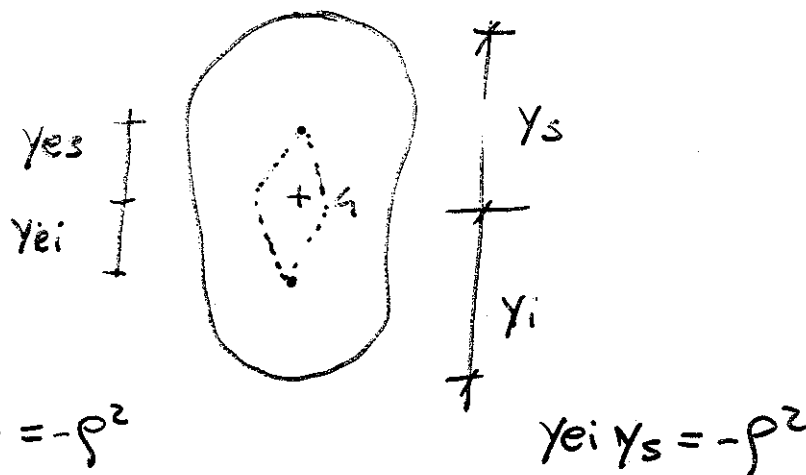
$$V_{max} = \frac{4f}{L}$$

$$q = P \frac{8f}{L^2}$$

SCELTA DELLA SEZIONE IN C.A.P. 14

In una sezione di materiale non resistente a trazione affinché ci siano solo tensioni di compressione la risultante delle forze esterne è al nocciolo centrale di inerzia

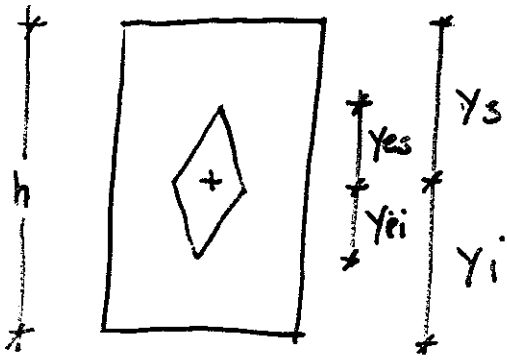
Il posto di area e quindi di materiale impiegato e dimensioni del nocciolo variano al variare della geometria



$$\rho = \frac{I}{A} \text{ raggio delle inerzie}$$

y_{es} (y_{is}) distanze estremo superiore (inferiore) del nocciolo dall'asse baricentrico

y_s (y_i) distanza del lembo superiore (inferiore) della sezione dall'asse baricentrico



$$\rho^2 = \frac{I}{A} = \frac{\frac{bh^3}{12}}{bh} = \frac{h^2}{12}$$

15

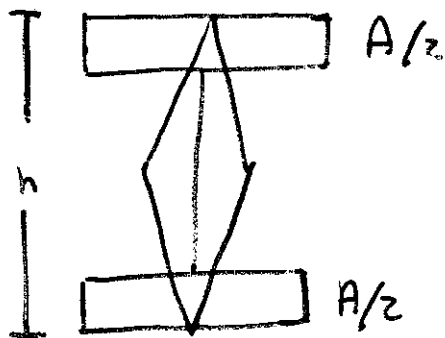
$$\underline{y_{es}} = - \frac{\rho^2}{y_i} = - \frac{\frac{h^2}{12}}{-\frac{h}{2}} = \underline{\frac{h}{6}}$$

$$\underline{y_{ei}} = - \frac{\rho^2}{y_s} = - \frac{\frac{h^2}{12}}{\frac{h}{2}} = \underline{-\frac{h}{6}}$$

1. una sezione rettangolare la dimensione del nocciolo risulta pari ad $\frac{h}{3}$

SEZIONE A DOPPIO T

Si considera il caso della doppia T limite

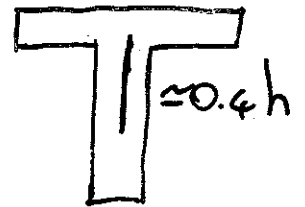
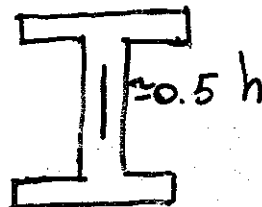
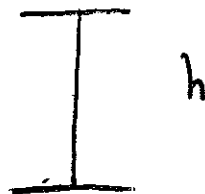
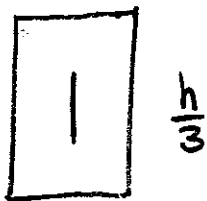


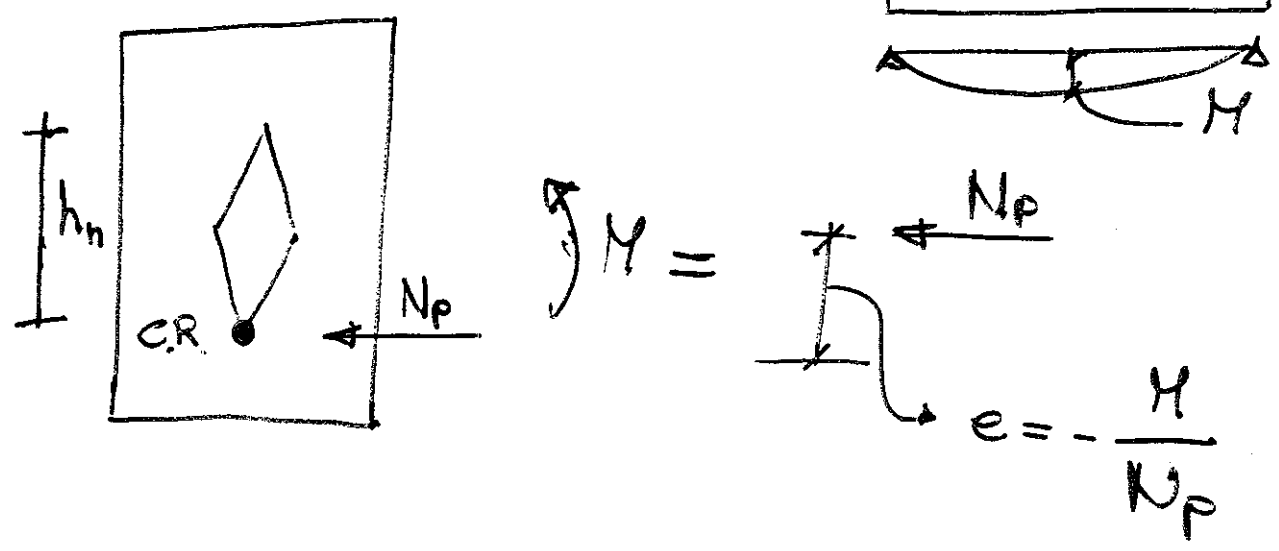
$$I = \sum A_i y_i^2 = 2 \frac{A}{2} \left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{Ah^2}{4}$$

$$\rho^2 = \frac{I}{A} = \frac{Ah^2/4}{A} = \frac{h^2}{4}$$

$$y_{es} = - \frac{\rho^2}{y_i} = \frac{h^2/4}{h/2} = \frac{h}{2} = y_{es}$$

X una sezione a doppio T limite la dimensione del nocciolo limite e' pari all'altezza h





Se il cavo risultante passa x l'estremo inferiore del nocciolo e non voglio tensioni di trazione il centro di pressione potrà trasferire della quantità h_n e quindi il momento massimo sopportabile risulta

$$M_{max} = N_p h_n = M_{utile}$$

Il momento massimo sopportabile è proporzionale alla dimensione del nocciolo secondo N_p .

X questo motivo si utilizzano sezioni a doppio T e non di tipo rettangolare

de capacitate de suportare momente externe e- legate
alle dimensioni del nocciolo

17

Si definisce rendimento geometrico

$$\eta = \frac{Y_{es}}{Y_s}$$

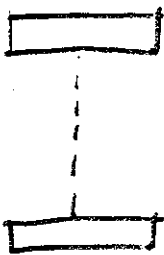
$$Y_{es} = -\frac{p^2}{Y_i}$$

$$\eta = \frac{-p^2}{Y_s Y_i}$$



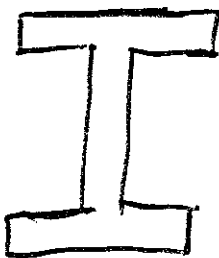
$$p^2 = \frac{h^2}{12} \quad Y_s = -Y_i = \frac{h}{2}$$

$$\eta = \frac{h^2/12}{h/4} = \frac{4}{12} = \underline{0.33}$$



$$p^2 = \frac{h^2}{4} \quad -Y_i = Y_s = \frac{h}{2}$$

$$\eta = \frac{h^2/4}{h^2/4} = \underline{1}$$



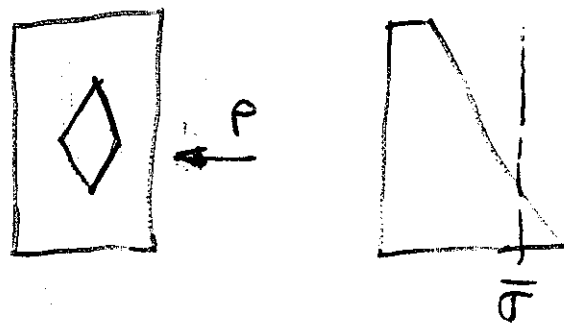
$$\eta \approx 0.5 \div 0.6$$

Noccolo centrale d'inerzia

18

Lo sperimento - della geometria della sezione
- della non resistenza a trazione.

Puo' succedere che pur essendo tutte compresse la sezione vengano violati i limiti di resistenza del materiale



Noccolo limite

- E' un parametro che prende in considerazione
- i limiti tensionali di resistenza a trazione e compressione
 - l'effettivo valore della forza di precompressione
 - la geometria della sezione

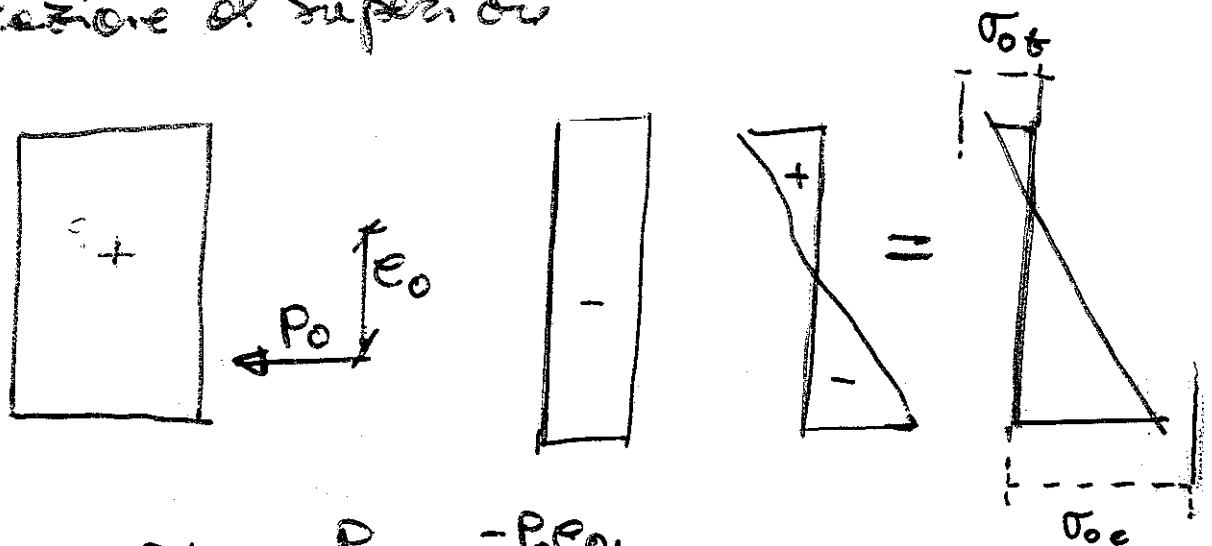
Def. E' la regione della sezione dentro la quale deve trovarsi il centro di pressione della forza di precompressione affinché non vengano violati, in nessuna fase di lavoro, i limiti di resistenza del materiale

na normativa fornisce x le fasi di tipo e di 19
 esercizio delle tensioni limiti a trazione e compressio
 ne che non possono essere superate

Determinazione dei punti limite

TIRO \leftrightarrow punto limite ~~superiore~~ ^{inferiore}

Essendo minima l'entità delle azioni esterne
 e massimo il valore della precompressione mi
 preoccupo della compressione al fondo inferiore
 e della trazione al superiore

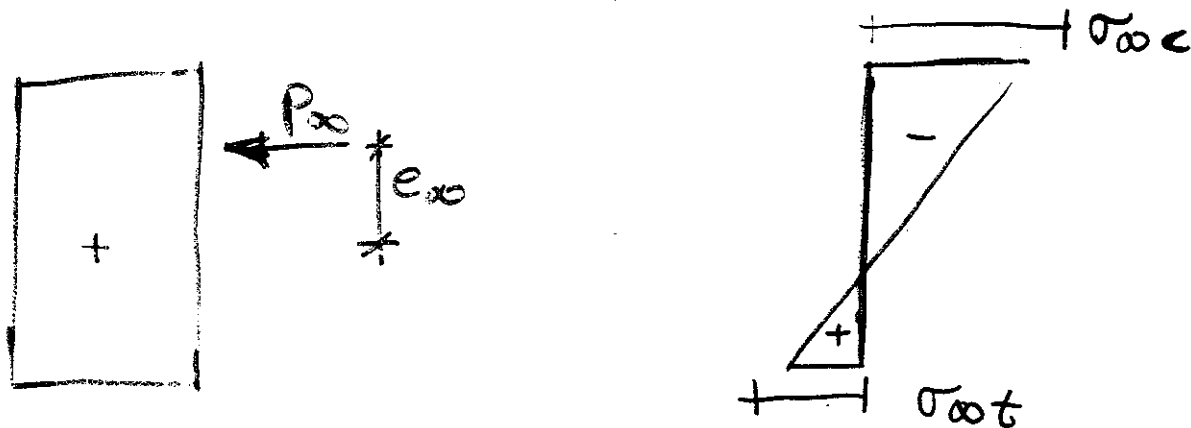


$$\sigma_{ot} = \sigma_{os} = \frac{P_0}{A} - \frac{-P_0 e_{01}}{I} y_s \rightarrow e_{01}$$

$$\sigma_{oc} = \sigma_{oi} = \frac{P_0}{A} - \frac{-P_0 e_{02}}{I} y_s \rightarrow e_{02}$$

$$e_0 = \min(e_{01}, e_{02})$$

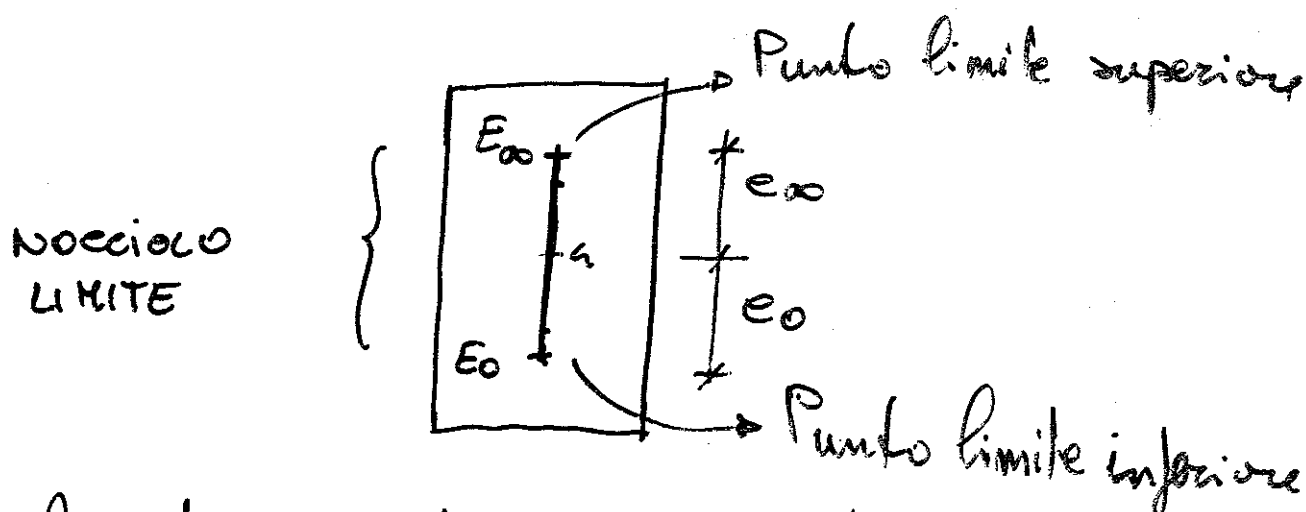
Punto limite superiore \leftrightarrow ESERCIZIO 20
 X la determinazione del punto limite superiore
 si fa riferimento alla fase di esercizio



$$\sigma_{oo_c} = \sigma_{oo_s} = \frac{P_{oo}}{A} - \frac{P_{oo} e_{oo1}}{I} y_s \Rightarrow e_{oo1}$$

$$\sigma_{oo_t} = \sigma_{oo_i} = \frac{P_{oo}}{A} - \frac{P_{oo} e_{oo2}}{I} y_i \Rightarrow e_{oo2}$$

$$e_{oo} = \min(e_{oo1}, e_{oo2})$$



Avendo scelto tensioni di trazione il nocciolo
 limite generalmente è più esteso rispetto al
 nocciolo centrale d'inerzia

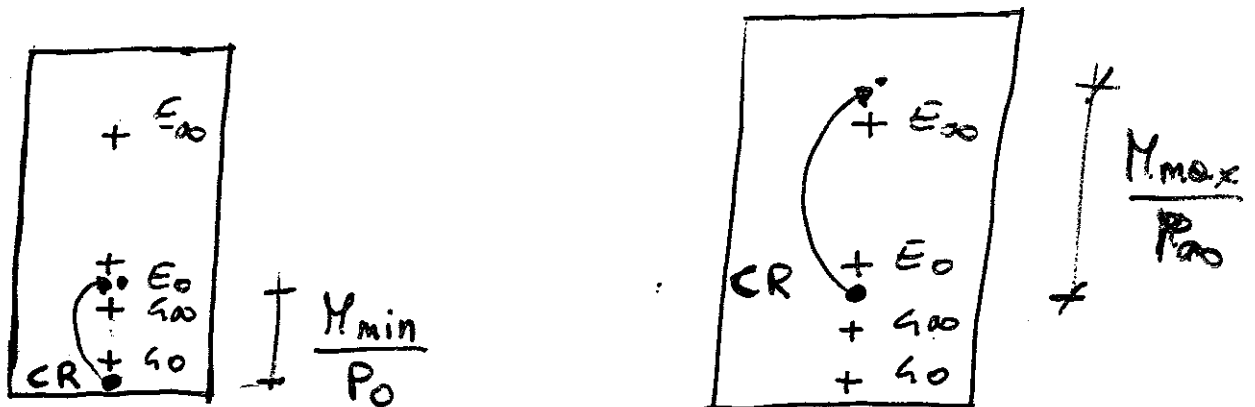
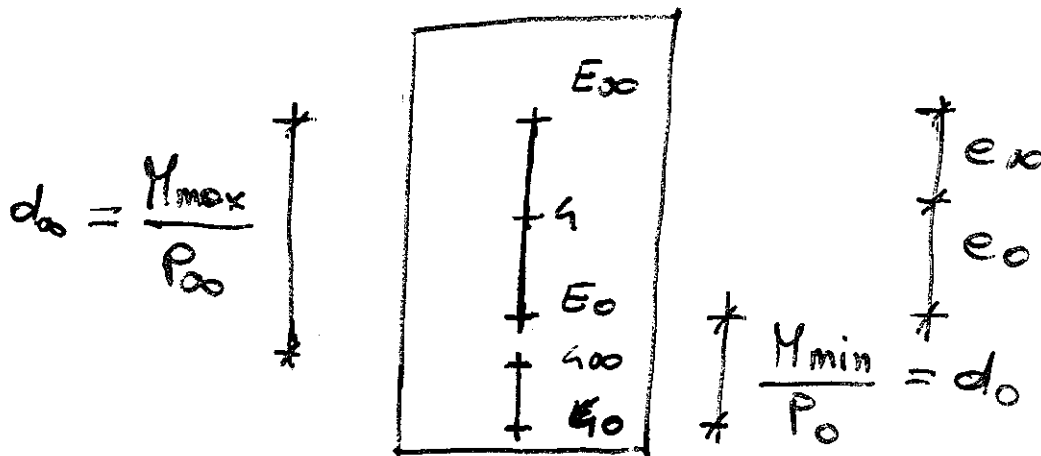
Se ci spostiamo dai punti E_{∞} ed E_0 21
rispettivamente delle quantità:

$$d_{\infty} = \left(\frac{P_{\infty}}{M_{\max}} \right)^{-1} \quad d_0 = \left(\frac{P_0}{M_{\min}} \right)^{-1}$$

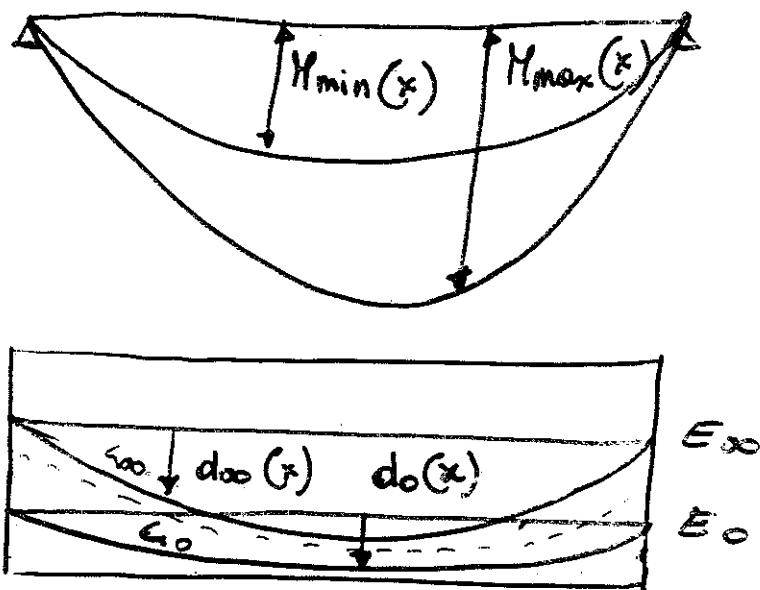
Si individuano due punti:

G_{∞} G_0

i quali limitano la zona all'interno della
quale deve passare il corso risultante affinché
per effetto delle azioni esterne il centro di
pressione ricada dentro il nocciolo limite.

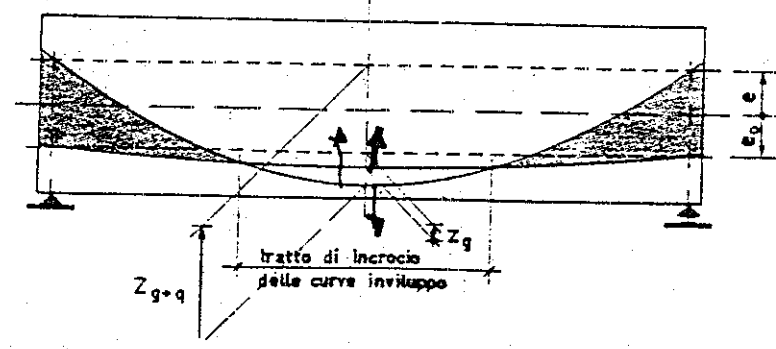
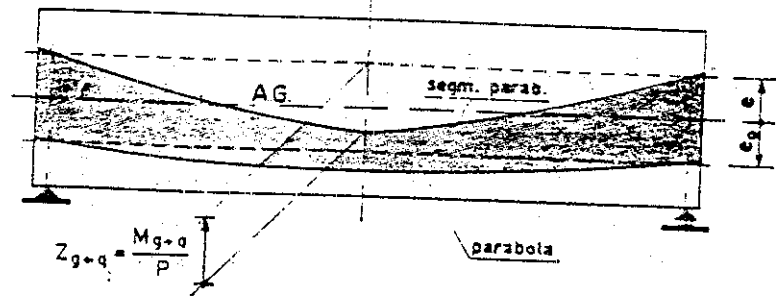
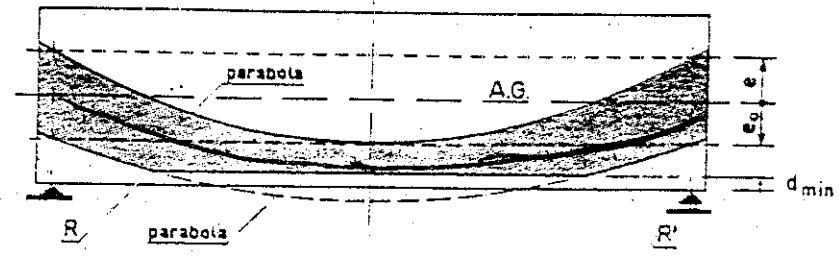
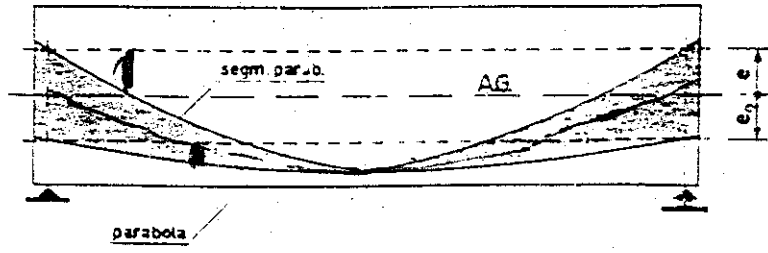


Questa operazione effettuata sezione x sezione individua una zona dentro la quale dobbiamo fare passare il cavo risultante; zona che prende il nome di Fuso di Guyon



$$d_{30}(x) = \frac{H_{max}(x)}{P_{30}(x)}$$

$$d_0(x) = \frac{H_{min}(x)}{P_0(x)}$$



Con l'imposizione di una precompressione agente

AL TIRO

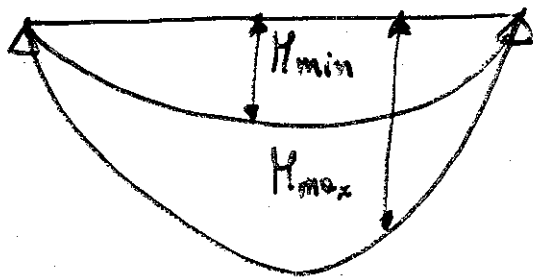
$$M_g = M_{\min}$$

$$P_0$$

24

In esercizio $M_g + q = M_{\max}$

$$P_{\infty} = P_0 - \Delta P$$



X effetto di questi momenti il centro di pressione si eleva dal punto di passaggio del c.r. della quantità

AL TIRO

$$d_0 = \frac{M_{\min}}{P_0}$$

IN ESERCIZIO

$$d_{\infty} = \frac{M_{\max}}{P_{\infty}}$$

Finché il centro di pressione ricada dentro il nocciolo limite e possibile disporre il cavo risultante al di sotto di tale zona.

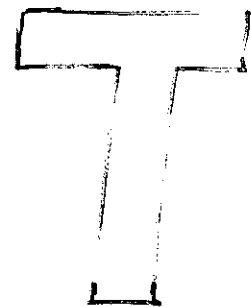
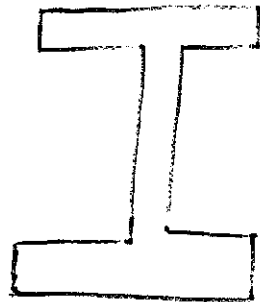
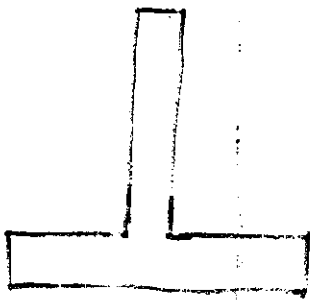
Scelta della sezione

I parametri che influenzano la scelta della sezione sono

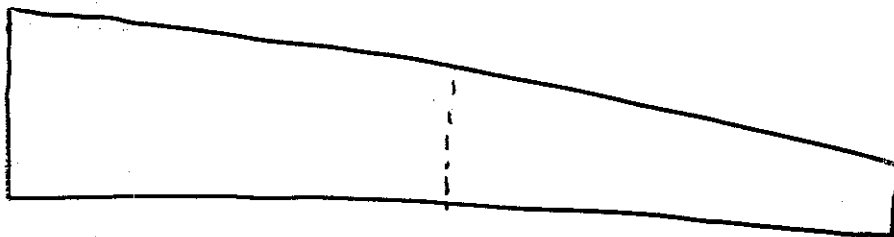
$$\rho = - \frac{\rho^2}{\gamma_1 \gamma_2}$$

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

$$\longleftrightarrow \frac{M_{max}}{M_{min}} = \frac{M_g + M_q}{M_g}$$



$$\frac{M_q}{M_g}$$

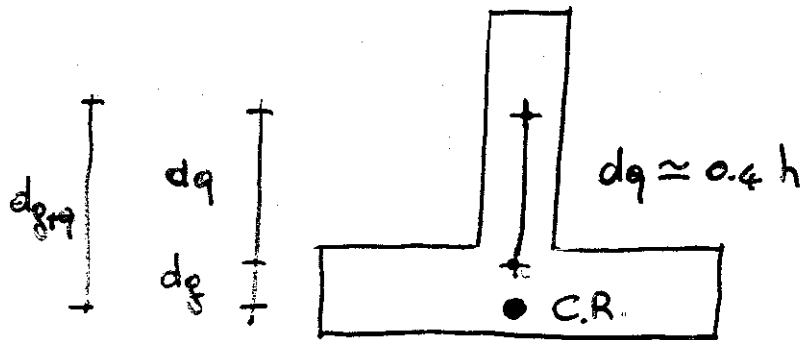


$$M_g \ll M_q$$

$$M_g < 25\% M_q$$

$$M_g > 25\% M_q$$

$$\frac{M_q}{M_g} = \frac{d_q (P_{\infty})}{d_g (P_0)} = k \frac{d_q}{d_g} = \frac{M_q}{M_g} \quad d_q = h_n$$



d_g = traslazione del c.p. per effetto del momento di peso proprio M_g

d_q = traslazione del c.p. per effetto del momento di sovraccarico M_q

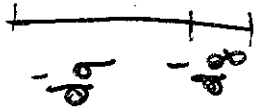
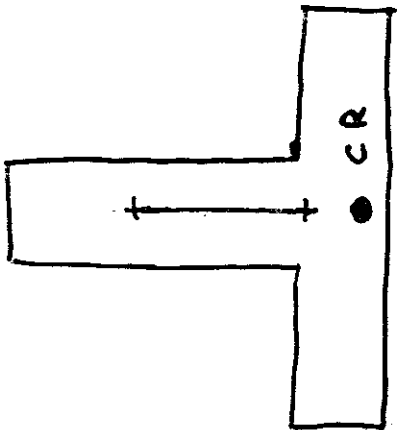
▣ Trave a T capovolta

Viene utilizzata quando si è in presenza di valori di $\frac{M_q}{M_g}$ molto elevati.

Essendo infatti il nocciolo limite molto basso sono minime le distanze d_g che quindi permette elevati

$$\frac{d_q}{d_g} \propto \frac{M_q}{M_g}$$

1

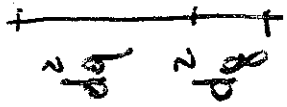
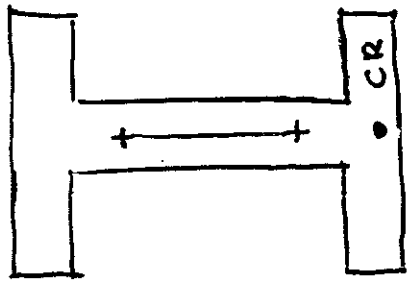


$$\frac{d'_1}{d'_2}$$

α

$$\frac{H'_1}{H'_2}$$

2

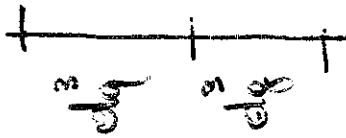
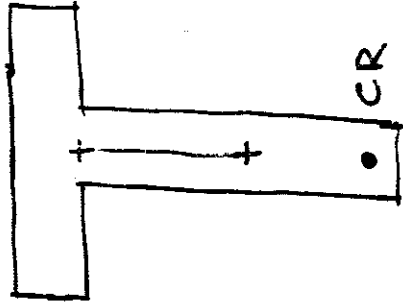


$$\frac{d'_2}{d'_3}$$

α

$$\frac{H'_2}{H'_3}$$

3

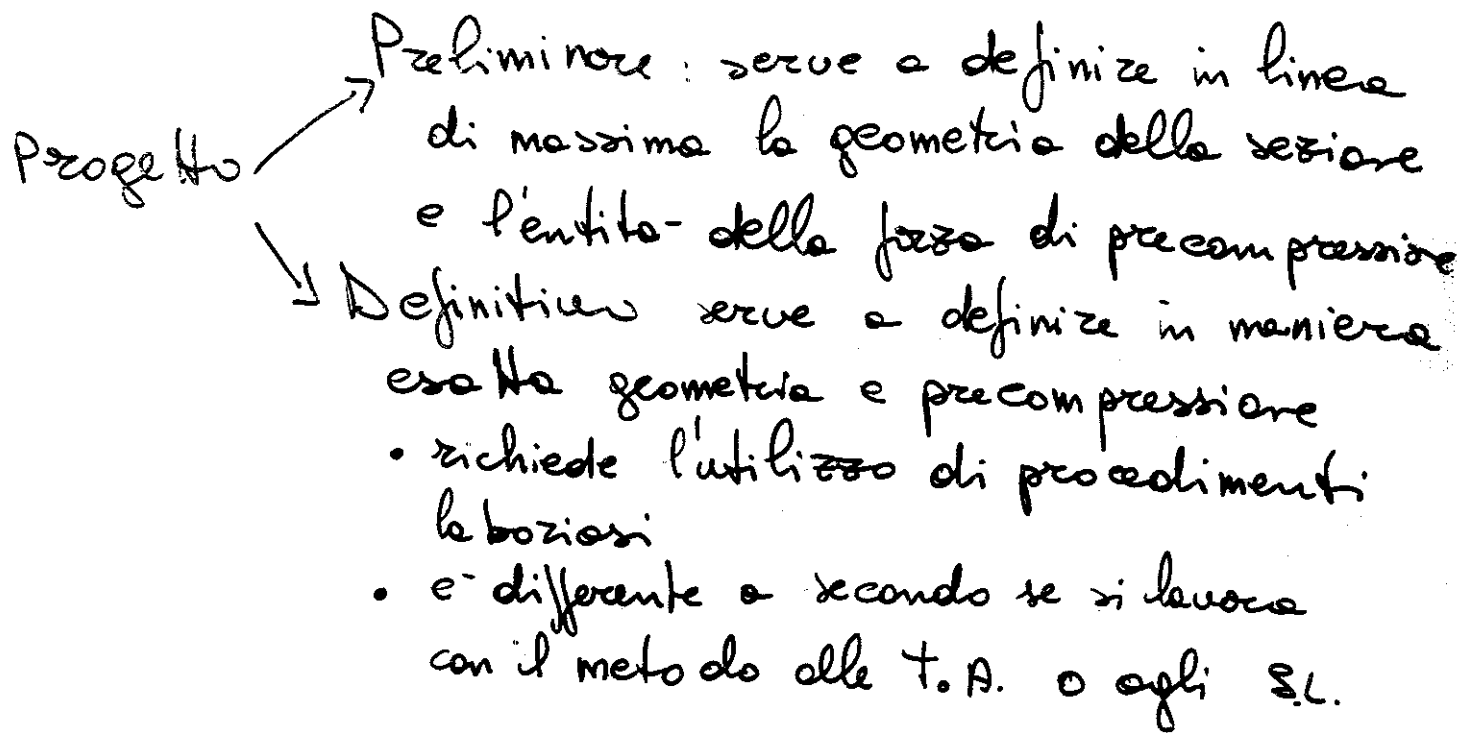


$$\frac{d'_3}{d'_2}$$

α

$$\frac{H'_3}{H'_2}$$

PROGETTO DELLA SEZIONE



Progetto preliminare

- 0 Forma della sezione
- 1 Altezza
- 2 Forza di precompressione
- 3 Area del cavo in precompressione
- 4 Area della sezione in calcestruzzo

a) Forma della sezione

La forma della sezione viene determinata in funzione del rapporto $\frac{M_g}{M_q}$ o in seguito ad esigenze estetiche

b) Altezza della sezione

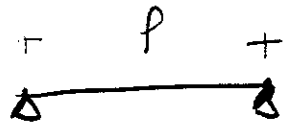
Può essere ricavata in funzione delle caratteristiche massime della sollecitazione.

$$h = \frac{\sqrt{M_g + M_q}}{30 \div 20}$$

$$M \text{ [kNm]} \quad h \text{ [m]}$$

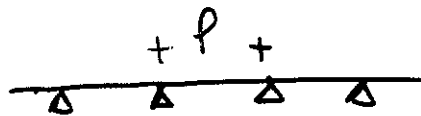
valori orientativi in funzione dello schema geometrico

travi a.



$$h = 7 \div 5\% P$$

travi e.



$$h = 4.5 \div 5\% P$$

2) Forza di precompressione

Si deve fare distinzione fra i casi

a) $M_g > 25\% M_q$

b) $M_g < 25\% M_q$

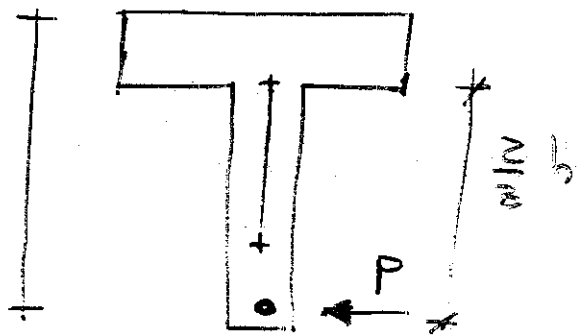
a) Si assume che la massima escursione che il c.p.

può subire per effetto di $M_g + M_q$ è $e \approx \frac{2}{3} h$. Quindi:

$$M_g + M_q = P \frac{2}{3} h$$

$$P = 1.5 \frac{M_g + M_q}{h}$$

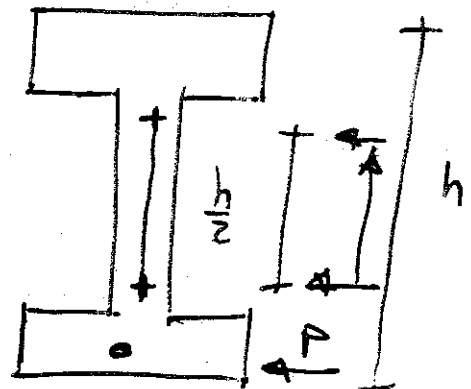
$$d = \frac{M}{P}$$



b) In questo caso si fa riferimento al momento prodotto dai sovraccarichi e si assume che l'escursione che il c.p. può subire per effetto di questa azione è pari alle dimensioni del nocciolo limite $\approx \frac{h}{2}$

$$M_q = P \frac{h}{2}$$

$$P = \frac{2M_q}{h}$$



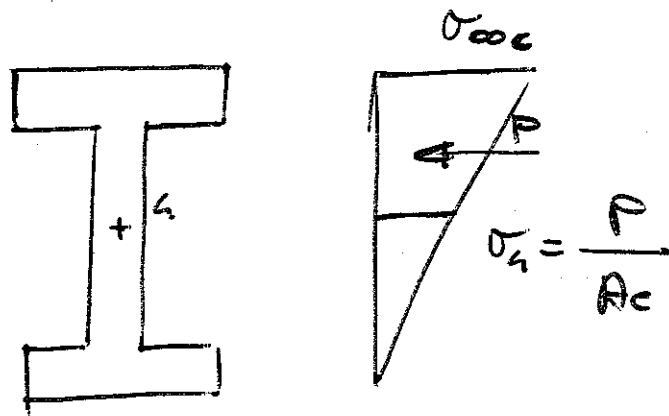
3) Area del cavo di precompressione

$$A_p = \frac{P}{\sigma}$$

$$\sigma = \begin{cases} f_{yd} & \text{se si procede agli S.L.} \\ \sigma_{pi} & \text{se si lavora alle T.A.} \end{cases}$$

4) Sezione della trave

L'area del calcestruzzo si ricava ipotizzando che la tensione media nel calcestruzzo (sulle fibre orizzontali) in fase di esercizio corrisponde alla metà di quella massima ammissibile e che la tensione al lembo inferiore sia nulla.



$$\frac{P}{A_c} = \sigma_s = \frac{\sigma_{max}}{2}$$

$$A_c = \frac{2P}{\sigma_{max}}$$

Verifiche

Le procedure di verifica si differenziano
a seconda se si lavora alle T.A. o agli
S.L.

In un approccio alle T.A.

Si progetta con un modello elastico lineare
e operando un controllo nei confronti dello
stato tensionale

Si verifica lo stato tensionale

la fessurazione

e rotture (allo stato limite ultimo)

S.L.

e taglio

Si progetta

allo stato limite ultimo

verifica

SLU

SLE di fessurazione

tensionale

e taglio

Una volta dimensionata la sezione più sollecitata e definita la forza di precompressione:

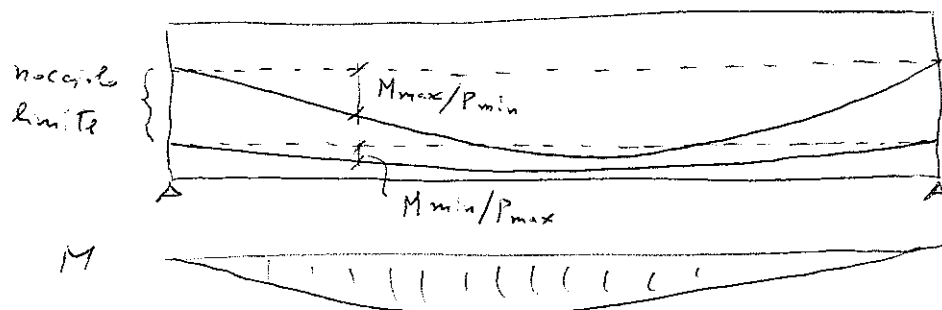
- si valutano in maniera rigorosa le cadute di tensione
- si verifica in maniera rigorosa la sezione (tensioni, fessurazione, rottura nel metodo delle Tensioni ammissibili; stato limite di tensione di esercizio e di fessurazione, stato limite ultimo nel metodo degli stati limite)
- si definisce la posizione del cavo nelle altre sezioni (se occorrono più cavi, si definisce la posizione del cavo risultante) → vedi fuso di Guyon
- si definiscono i particolari dell'estremità della trave, in cui si ancorano i cavi (armature di frangimento, ecc.)

FUSO DI GUYON

Luogo dei punti entro cui deve ricadere il cavo affinché la sezione sia verificata. Con riferimento al metodo delle T.A. (o S.L. Tensioni di esercizio), la forza traslata da $\frac{M}{P}$ deve rientrare nel nocciolo limite.

Quindi gli estremi del fuso si ottengono spostandosi dagli estremi del nocciolo delle quantità $\frac{M_{max}}{P}$ e $\frac{M_{min}}{P}$

Per trave appoggiata.



AZIONI INTERNE DOVUTE ALLA PRECOMPRESSIONE

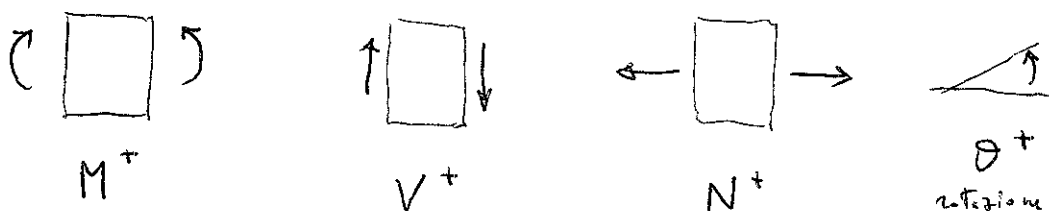
In una struttura isostatica i diagrammi delle sollecitazioni prodotti dalla precompressione si possono ricavare in modo abbastanza semplice. Se si considera un elemento strutturale precompresso da una forza P mediante un cavo avente andamento qualsiasi, inclinato di θ rispetto l'asse geometrico ed avente una eccentricità y_p sempre rispetto a tale asse le sollecitazioni in una sezione qualsiasi si possono ricavare dalle seguenti relazioni.

$$N_p = P \cos \theta \quad \text{Sforzo normale generato dalla precompressione}$$

$$V_p = P \sin \theta \quad \text{Sforzo di taglio generato dalla precompressione}$$

$$M_p = P \cos \theta y_p \quad \text{Momento flettente generato dalla precompressione}$$

Convenzione dei segni:



P sempre positivo (azione mutua: trazione nei cavi, compressione nel calcestruzzo)



$$N = -P \cos \theta \approx -P$$

$$V = P \sin \theta \approx P \theta$$

$$M = P \cos \theta y_p \approx P y_p$$

CAVO RISULTANTE

In generale la precompressione di una trave si realizza con la messa in tensione di più cavi, ciascuno con un proprio tracciato ed un proprio sforzo.

Nelle varie fasi della progettazione si può sostituire l'insieme di n cavi con un unico cavo detto «Cavo risultante» (C.R.)

Sia n il numero totale delle unità di a.p. di una data trave, P_i la forza di precompressione esercitata dal cavo i-esimo e θ_i il suo angolo di inclinazione rispetto all'asse geometrico della trave (A.G.).

Nella sezione la forza di presollecitazione che tiene conto dell'effetto di tutto l'a.p., si determina attraverso le relazioni

$$N_p = \sum_{i=1}^n P_i \cos \theta_i \quad \text{Sforzo normale generato dalla precompressione}$$

$$V_p = \sum_{i=1}^n P_i \sin \theta_i \quad \text{Sforzo di taglio generato dalla precompressione}$$

$$P = (N_p^2 + V_p^2)^{1/2} \quad \text{Intensità della forza di precompressione}$$

$$y_{ap} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cos \theta_i y_{ap_i}}{N_p} \quad \text{Distanza del cavo risultante dall'asse baricentrico}$$

Essendo nelle travi da c.a.p. gli angoli θ_i piccoli è lecito porre $\cos \theta_i \cong 1$ e $\sin \theta_i \cong \theta$ e quindi le espressioni precedenti si semplificano nel seguente modo:

$$N_p = \sum_{i=1}^n P_i \quad V_p = \sum_{i=1}^n P_i \theta_i$$

$$P = (N_p^2 + V_p^2)^{1/2} \quad y_{ap} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_{ap_i}}{N_p}$$

l'inclinazione del cavo risultante rispetto l'asse della trave può a questo punto ricavarsi dalla seguente espressione:

$$\vartheta = -\operatorname{arctg} \frac{V_p}{N_p}$$

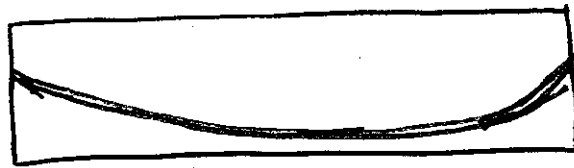
Se tutte le unità di precompressione vengono ancorate all'estremità della trave il C.R. è continuo mentre presenta cuspidi nel caso in cui alcuni ancoraggi sono effettuati lungo la trave.

Se il cavo di precompressione è unico il C.R. coinciderà con questo.

Se la tensione nelle varie armature è costante il baricentro delle aree di acciaio rappresenta anche il baricentro delle tensioni

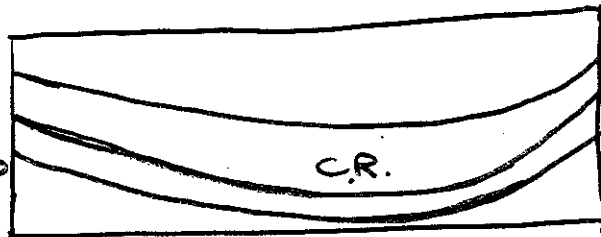
13

■ Se e' presente un caso solamente, il caso risulta
coincide con l'armatura stessa

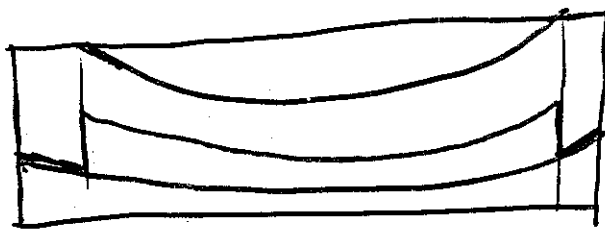


- C.R.

■ Se tutte le armature vengono ancorate nella testata
della trave
il C.R. avrà
un andamento
continuo.



In caso contrario il caso risultante presenterà
delle cuspidi



VERIFICHE A FESSURAZIONE

Nelle strutture precomprese un pericolo particolarmente insidioso e rappresentato dalla corrosione degli acciai armonici.

Questi infatti, in conseguenza delle elevate tensioni di esercizio e dei particolari procedimenti e cui sono sottoposti in fase di produzione, sono particolarmente sensibili a fenomeni di ossidazione.

Per prevenire la corrosione bisogna limitare la fessurazione per trazione e la microfessurazione per compressione.

La corrosione delle armature risulta fortemente influenzata dalla aggressività dell'ambiente e dalla frequenza dei cicli.

In base della massima tensione registrata del calcestruzzo nella zona di trazione si può effettuare una suddivisione:

classi di precompressione

Prece.	Sezione	Tensione cl	Esempio
Integrata	non fessurata	$\sigma_c \leq 0$	Serbatoi amb. mol. aggressivo
Limitata	non fessurata	$0 \leq \sigma_c \leq f_{ct}$	Normale aggressività - Edifici ordinari Vie doti autostrade
Parziale	fessurata	-	

N. 2 D.M. 14-02-82

3.2.10. Verifica della fessurazione per flessione

Nel caso di precompressione totale o di precompressione limitata, per le strutture collocate in ambiente aggressivo, zone marine o in presenza di agenti chimici, deve essere effettuata la verifica della sicurezza alla fessurazione.

Il coefficiente convenzionale di sicurezza alla fessurazione è il più piccolo moltiplicatore dei carichi di esercizio che induce tensioni di rottura a flessione del conglomerato, e per le strutture inflesse è dato dalla formula:

$$\eta_f = \frac{M_f}{M_e}$$

dove:

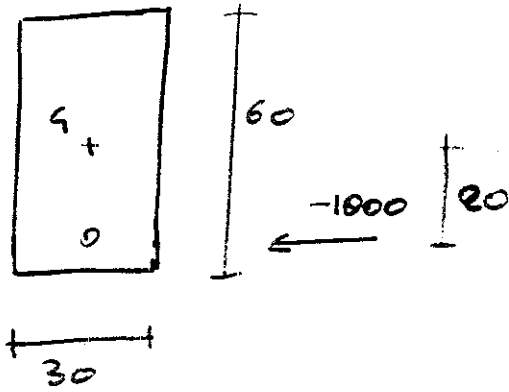
M_f momento che provoca la fessurazione, calcolato in base alla sezione omogeneizzata interamente reagente ed alla resistenza a trazione per flessione (vedi 2.1.2.);

M_e momento massimo di esercizio.

Il coefficiente convenzionale di sicurezza alla fessurazione non deve essere inferiore ad 1,2.

Nel caso di precompressione parziale si deve sempre effettuare la verifica delle aperture delle fessure secondo quanto indicato al punto 4.2.4.

ESEMPIO di Verifica a flessione



Per una trave rettangolare di base 0.3 m ed altezza 0.6 m precompressa con una forza $P = -1000$ kN applicata a 0.1 m dal lembo inferiore, calcolare il momento di decompressione e flessione se il calcestruzzo utilizzato è di classe $R_{ek} = 45$ Mpa

$$P = 1000 \text{ kN} \quad y_p = -0.20 \text{ m} \quad b = 0.3 \text{ m} \quad h = 0.60 \text{ m}$$

$$R_{ek} = 45 \text{ Mpa}$$

Per un $R_{ek} = 45$ Mpa le caratteristiche di resistenza sono

$$f_{ctm} = 0.27 \sqrt[3]{R_{ek}} = 0.27 \sqrt[3]{45^2} = 3.41 \text{ Mpa}$$

$$f_{ctm} = 1.20 f_{ctm} = 4.08 \text{ Mpa}$$

$$f_{ctk} = 0.7 f_{ctm} = 2.86 \text{ Mpa}$$

Le caratteristiche inerziali della sezione

$$A = 0.3 \times 0.6 = 0.18 \text{ m}^2$$

$$I = \frac{0.3 \times 0.6^3}{12} = 0.0054 \text{ m}^4$$

$$y_i = -0.3 \text{ m}$$

de tensione al punto inferiore e' fornita da 78

$$\begin{aligned}\sigma_i &= \frac{-P}{A} - \frac{P y_p}{I} y_i - \frac{M}{I} y_i \\ &= \sigma_i^P - \frac{M}{I} y_i\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{dove } \sigma_i^P &= \frac{-P}{A} - \frac{P y_p}{I} y_i = -\frac{1000}{0.18} \frac{1}{10^3} - \frac{1000 \cdot -0.2}{0.0054} \left(-0.3\right) \frac{1}{10^3} = \\ &= -5.55 - 11.11 = -16.66 \text{ Mpe}\end{aligned}$$

Il momento di decompressione

$$M_D = \sigma_i^P \frac{I}{y_i} = -16.66 \frac{0.0054}{-0.3} 10^3 = 255.88 \text{ kNm}$$

Il momento di fessurazione $\times f_{ctk}$

$$M_D = -\left(f_{ctk} - \sigma_i^P\right) \frac{I}{y_i} = -\left(2.86 + 16.66\right) \frac{0.0054}{-0.3} 10^3 = 351.36 \text{ kNm}$$

Il momento di fessurazione $\times f_{ctm}$

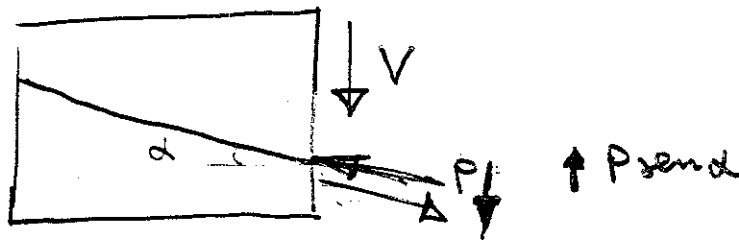
$$M_D = -\left(f_{ctm} - \sigma_i^P\right) \frac{I}{y_i} = -\left(4.08 + 16.66\right) \frac{0.0054}{-0.3} 10^3 = 373.32 \text{ kNm}$$

Verifiche a TAGLIO

Gli elementi precompressi presentano, rispetto a quelli ordinari, un migliore comportamento nei confronti delle sollecitazioni taglianti.

Questo avviene per due motivi fondamentali:
INCLINAZIONE CAVI

1) Nelle strutture a cavi post-tesi, che rappresentano la maggior parte delle strutture precomprese, i cavi hanno un andamento curvilineo. La forza di precompressione ha una componente verticale, la quale sommandosi al taglio prodotto dai carichi esterni nel complesso ne riduce l'entità.



In generale il taglio risultante

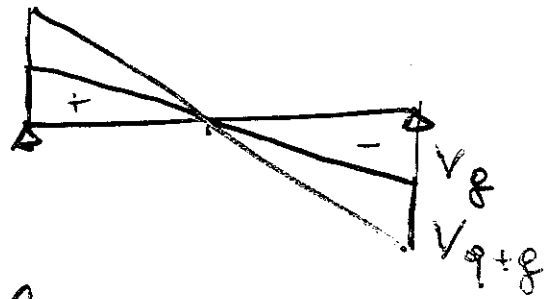
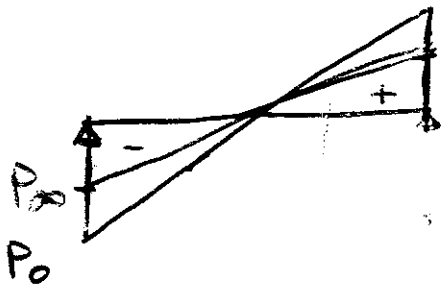
$$V_r = V - P \sin \alpha$$

N.B. l'angolo α qui indicato è pensato come positivo e orario (l'opposto della mia convenzione) e quindi la componente verticale (tagliante) di P è $-P \sin \alpha$

Precompressione

Carichi Esterni

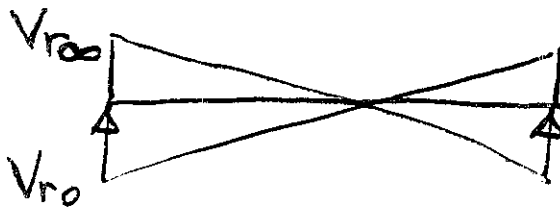
T2



Azione Complessiva

- Tiro

- Esercizio



Tiro

All'atto del tiro la precompressione scende il suo valore massimo mentre i carichi esterni presenti sono solamente quelli dovuti al peso proprio

$$V_{r0} = V_g - P_0 \sin \alpha$$

Esercizio

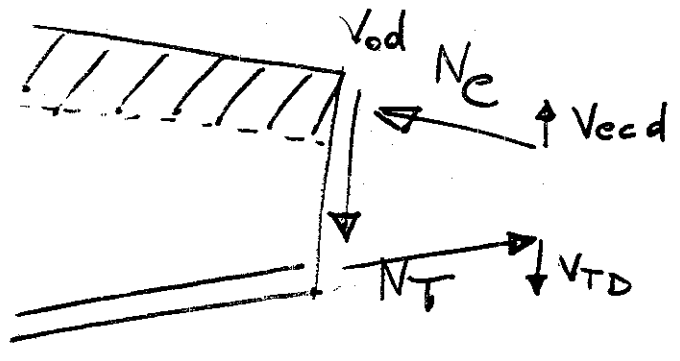
In fase di esercizio la precompressione scende scattato le perdite di tensione mentre sono presenti oltre al peso proprio anche i sovraccarichi

$$V_{r0} = V_g + V_q - P_{00} \sin \alpha$$

- ▣ In generale al tiro sovradominante l'effetto della precompressione mentre in esercizio le azioni esterne
- ▣ Per minimizzare l'ormetura a taglio si ricerca il valore di α nelle testate della trave eguagliando $V_{r0} = -V_r$

de variazioni del taglio complessivo di progetto si ha in generale ogni qualvolta ci sono delle componenti non ortogonali all'asse delle sezioni delle trave elementi ed. altezza variabile

EC2 4.3.2.4.5



$$V_{sd} = V_{od} - V_{ecd} - V_{TD}$$

V_{od} = Taglio di progetto nella sezione

V_{ecd} = Componente // V_{od} della forza agente nelle zone compresse

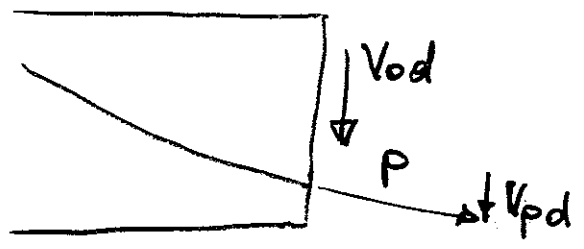
V_{TD} = Componente // V_{od} della forza agente nelle zone tese

V_{ecd} V_{TD} positivi se concordi a V_{od}

Per elementi precompressi

EC2 4.3.2.4.5

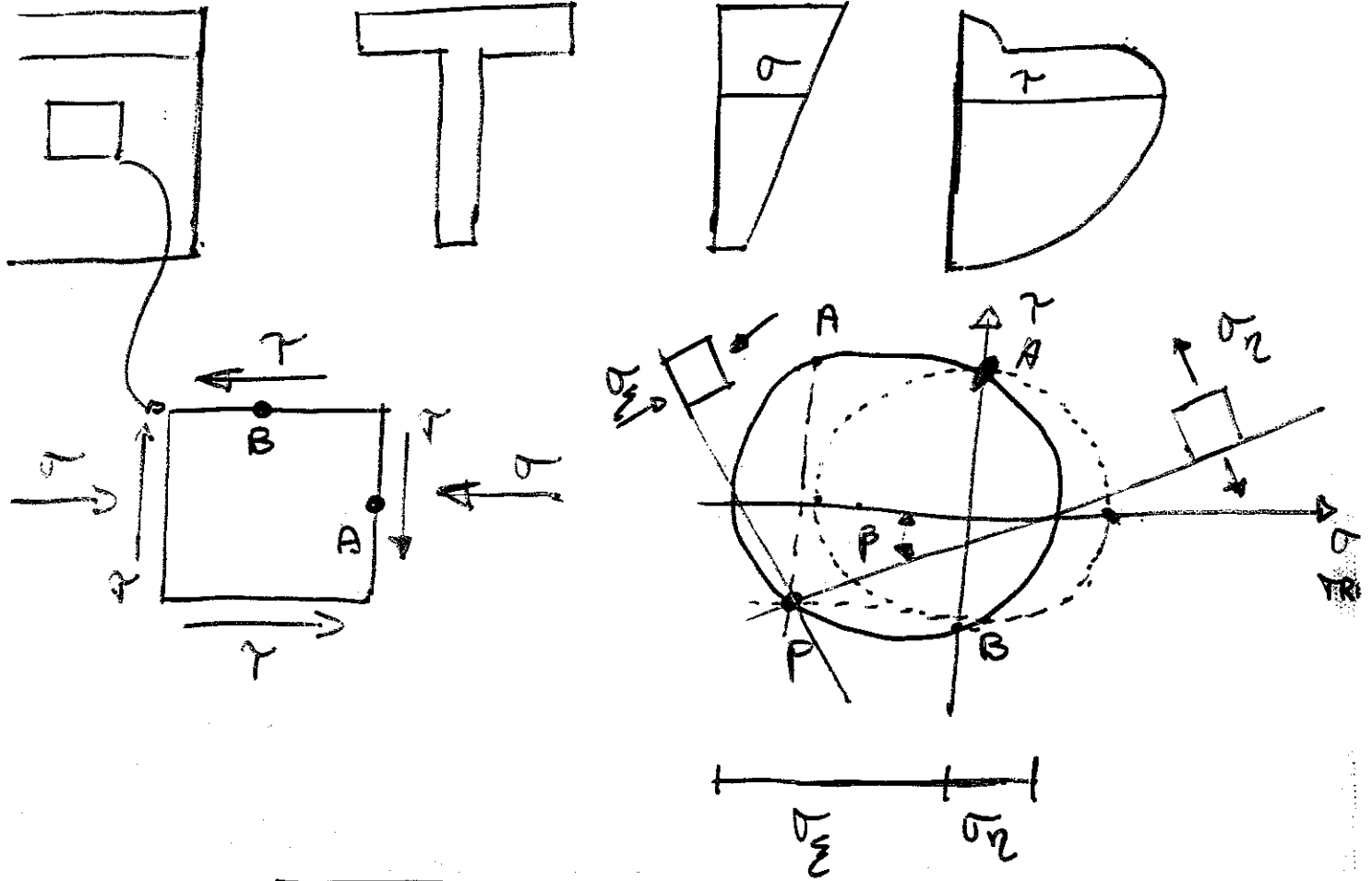
$$V_{sd} = V_{od} - V_{pd}$$



V_{pd} = Componente // a V_{od} della forza di precompressione e positiva se concorde con V_{od}

RIDUZIONE TENSIONI PRINCIPALI

Per effetto della precompressione, in fase di esercizio, la sezione risulta tutta compressa. Per effetto del taglio, inoltre sono presenti delle tensioni tangenziali.



$$\sigma_2 = -\frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} + \frac{\sigma}{2}$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} + \frac{\sigma}{2}$$

$$\gamma_{PB} = \frac{\sigma_m}{\tau}$$

Il valore delle isostefite di trazione risulteranno ridotti rispetto al caso di sezione parzialmente precompressa.

Verifica alle T.A.

T5

La normativa italiana impone di calcolare il valore tensionale delle isostatiche di trazione, di compressione e di confrontarli con i limiti tensionali al tiro ed in esercizio. Le tensioni tangenziali vanno calcolate in riferimento al taglio ridotto

TIRO	ESERCIZIO
0.48 R_{ek}	0.38 R_{ek}
0.08 R_{ek}	0.06 R_{ek}

Verifica allo S.L.U.

Indicando con $V_{sd} = V_{od} - V_{pd}$ il taglio ridotto la verifica impone che

$$V_{rd}^* = \min(V_{sd}^*, V_{cd}^*) \geq V_{sd}$$

$$V_{sd}^* = \alpha_w z^* f_{sd} \cotg \beta$$

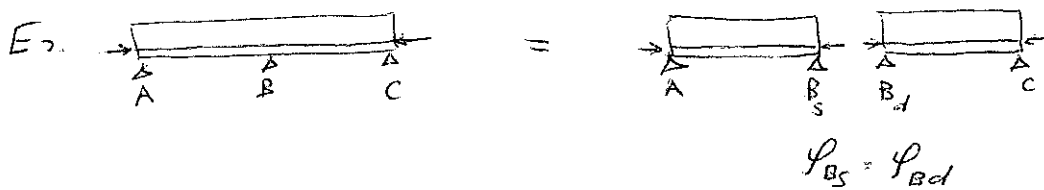
$$V_{cd}^* = z^* b_w f_{cd} \frac{\cotg \beta}{1 + \cotg \beta}$$

dove con z^* si è indicato il braccio delle coppie interna riferito all'altezza utile ridotta

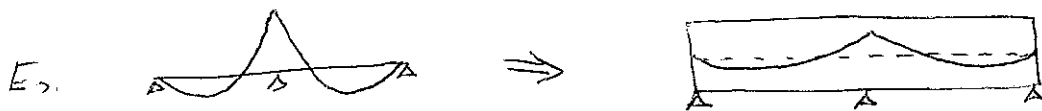
PRECOMPRESSIONE DI SCHEMI IPERSTATICI

Considerazioni generali

- pur essendo lo schema autoequilibrato, nascono reazioni vincolari
- le reazioni vincolari prodotte dalla precompressione possono essere valutate col metodo delle forze



- le reazioni vincolari sarebbero nulle se il cavo fosse disposto con eccentricità proporzionale al diagramma dei momenti nello schema iperstatico. Si parla in tale caso di "cavo concordante"



N.B. ovviamente il cavo non può avere cuspidi

- la reale disposizione del cavo si avvicinerà a questa; di conseguenza le reazioni vincolari sono minime

SEZIONI MISTE PRECOMPRESSE

(VERIFICA)

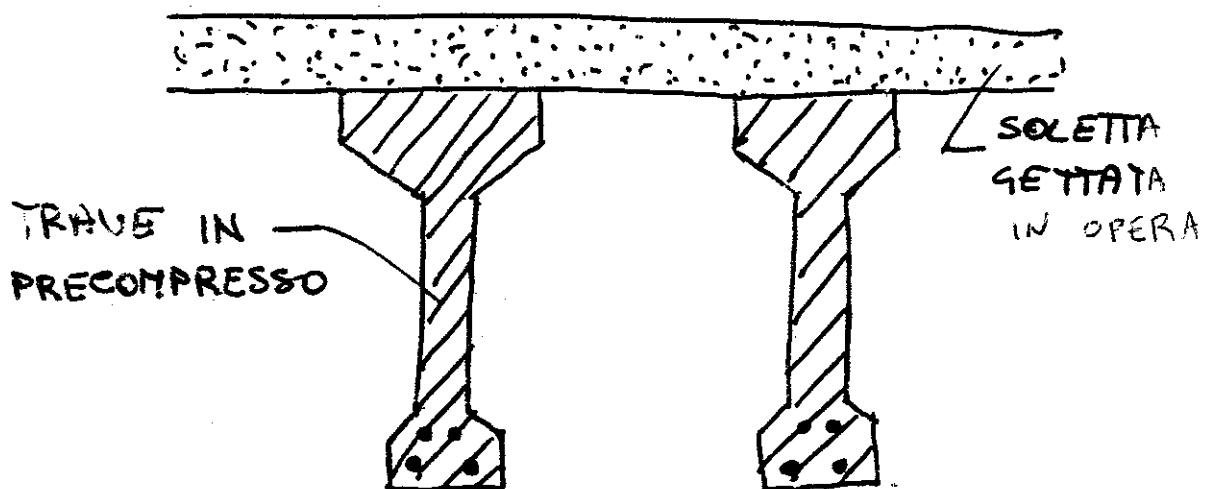
Di seguito viene trattato il problema della verifica senza affrontare invece il progetto, di elevata complessità, per il numero notevole di parametri che entrano in gioco.

La precompressione mista si incontra generalmente in

- ⊕ Solai con travetti prefabbricati P. e getto di calcestruzzo in opera



- ⊕ Ponti con travi precomprese con soletta di calcestruzzo gettata in opera

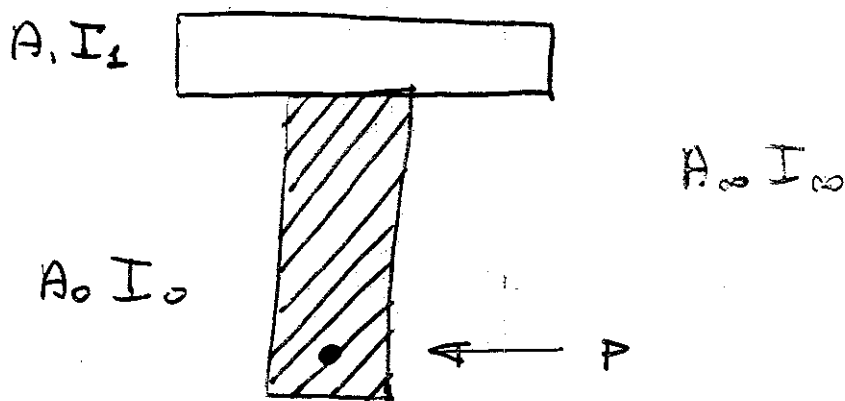


Vantaggi utilizzo sez. miste.

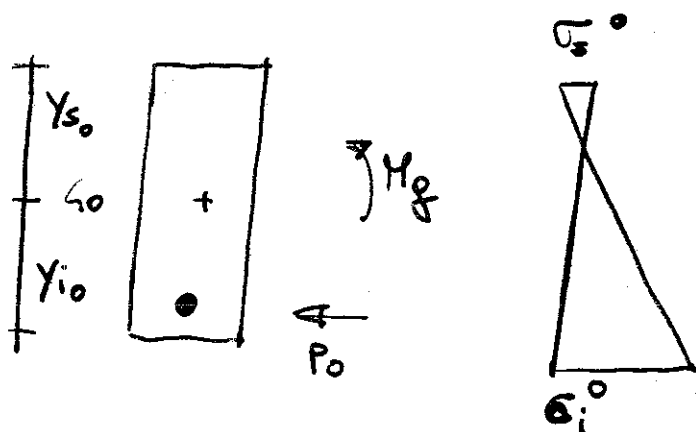
- Δ \equiv Eliminazione o riduzione di santalature
 gli elementi precampressi sono dimensionati per
 sopportare oltre il peso proprio anche il carico trasmesso
 dalla soletta fresca.
- Δ Preparazione in stabilimento della parte di manufatto
 (trave-travetto) che richiede la maggiore quantità
 di manodopera
 l'elemento prefabbricato richiede la preparazione
 della parte di cassaforma più complessa e
 la disposizione della maggiore quantità di armatura
- Δ All'atto del tiro ed in esercizio si hanno due sezioni
 esistenti diverse
 essendo minore la sezione da precampimere si
 risparmia in fase di precampressione e quindi
 in esercizio economico
- Δ Riduzione dei costi globali in conseguenza dei
 tempi di realizzazione ridotti e del trasferimento
 in stabilimento delle fasi lavorative più onerose

Verifica sezione mista precompressa

Consideriamo una sezione come riportata nella figura successiva costituita da una nervatura precompressa e una soletta gettata in opera



I. fase di Tizo vera precompressa solamente la nervatura e questa sarà soggetta solo alle forze di precompressione e al peso proprio



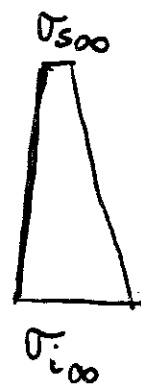
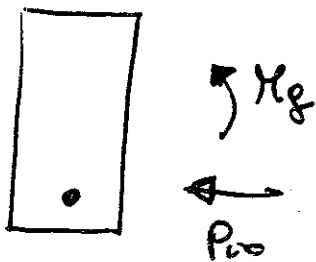
$$\begin{cases} \sigma_s^0 = \frac{-P_0}{A_0} - \frac{M_P}{I_0} y_{s_0} - \frac{M_g}{I_0} y_{s_0} \\ \sigma_i^0 = \frac{-P_0}{A_0} - \frac{M_P}{I_0} y_{i_0} - \frac{M_g}{I_0} y_{i_0} \end{cases}$$

y_{s0} , y_{i0} , A_0 , I_0 rappresentano le caratteristiche geometriche della sola sezione precompressa.

In questa fase si dovrà verificare che le σ_{s0} e σ_{i0} risultino inferiori dei valori limiti all'atto del getto.

Perdite di precompressione

Supponendo che le cadute di tensione avvengano tutte prima del getto della soletta la struttura prima del getto sarà sottoposta oltre che al peso proprio anche alla forza di precompressione P_{00} .



$$\sigma_{s00} = \frac{-P_{00}}{A_0} - \frac{M_{P_{00}}}{I_0} y_{s0} - \frac{M_g}{I_0}$$

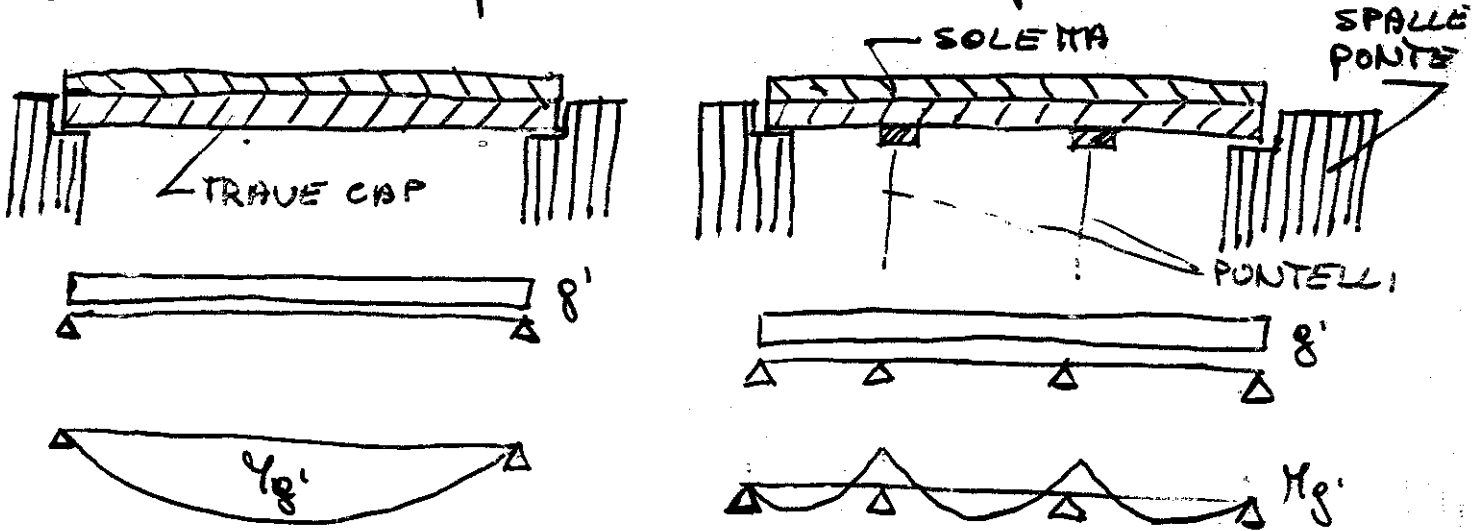
$$\sigma_{i00} = \frac{-P_0}{A_0} - \frac{M_{P_{00}}}{I_0} y_{i0} - \frac{M_g}{I_0} y_{i0}$$

Questo stato tensionale sarà presente fino a quando non viene effettuato il getto della soletta.

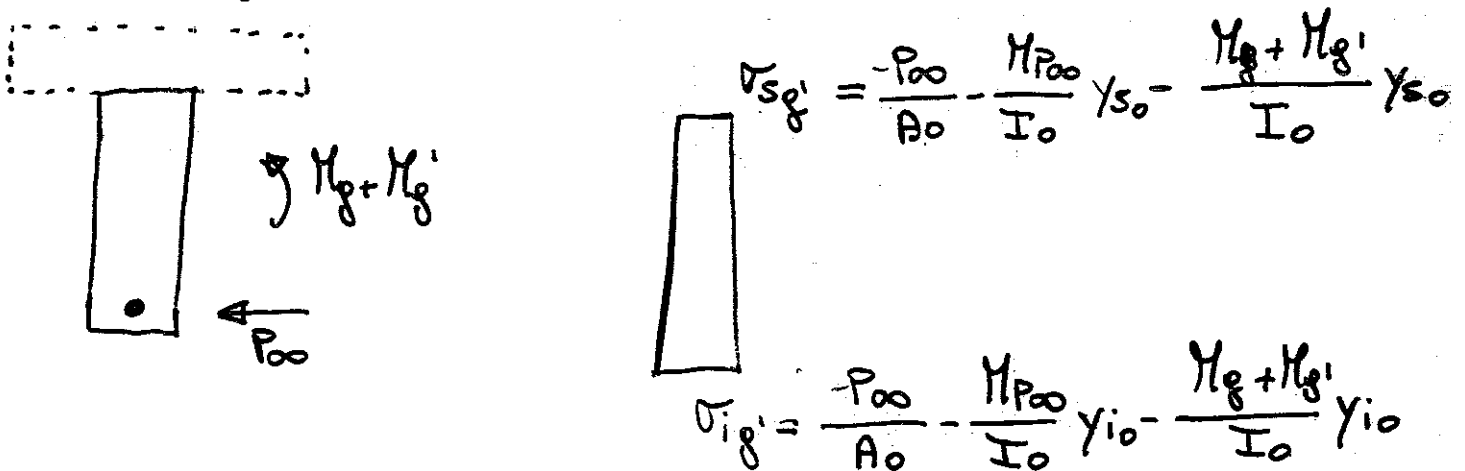
getto della soletta

Nella fase del getto della soletta la sezione resistente rimane ancora la nervatura precompressa, mentre il calcestruzzo fresco costituisce solamente un carico per la nervatura stessa.

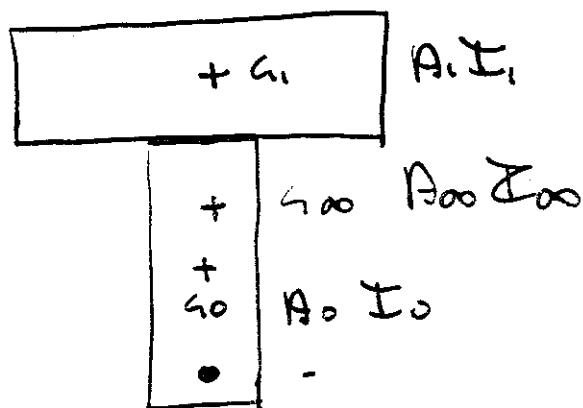
La sollecitazione M_g' generata dal calcestruzzo fresco varia sezione per sezione e dipenderà dall'eventuale presenza o meno di puntellature.



Dal momento in cui avviene il getto se il peso del calcestruzzo viene fatto assorbire dalla nervatura si avrà:



Successivamente alla presa del getto della soletta ^{SH 5}
 la sezione resistente si modificherà e per i carichi
 che agiranno dopo il consolidamento contribuirà anche
 la soletta



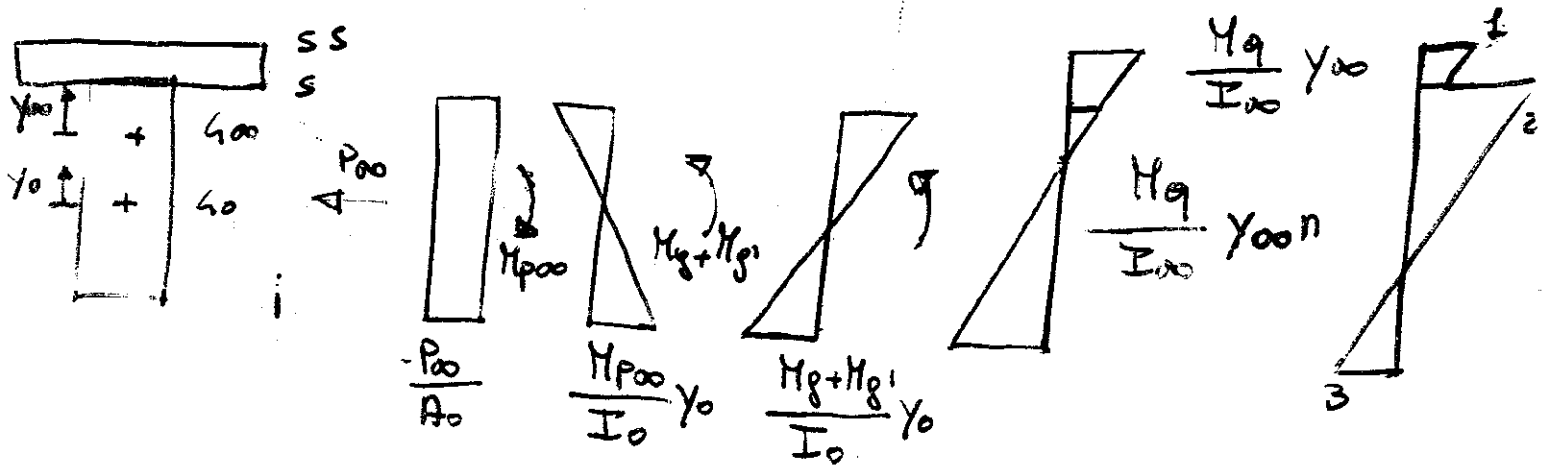
Le caratteristiche geometriche ed inerziali della sezione
 cambiano e quindi la posizione del baricentro
 passa da G_0 a G_1

In conseguenza della diversa qualità del calcestruzzo
 e dei diversi tempi di maturazione si introduce
 un coefficiente di omogeneizzazione

$$n = \frac{E_0}{E_1} > 1$$

Si omogeneizza rispetto
 il materiale più scade
 te

Indicando con I_{∞} il momento di inerzia di tutta ^{SHZ} la sezione omogenizzata



Le massime tensioni negli estremi superiori ed inferiori della ^{SHZ} nervatura

$$\sigma^2 = \frac{-P_0}{A_0} - \frac{M_p}{I_0} y_{s0} - \frac{M_g + M_g'}{I_0} y_{s0} - \frac{n M_q}{I_{\infty}} y_{s\infty}$$

$$\sigma^3 = \frac{-P_0}{A_0} - \frac{M_p}{I_0} y_{i0} - \frac{M_g + M_g'}{I_0} y_{i0} - \frac{n M_q}{I_{\infty}} y_{i\infty}$$

Le massime tensioni all'estremità delle solette ss

$$\sigma^{\pm} = \frac{M_q}{I_{\infty}} y_{\infty}$$