

Corso di tecnica delle costruzioni

- Progetto di una trave in C.A.P. a cavi post-tesi -



Politecnico di Milano

Facoltà di ingegneria civile ambientale e territoriale
Corso di laurea in ingegneria civile

Francesco Zangari

Esercitazione a cura Di
ing. Marco Rampini

prof. Marco di Prisco

29 giugno 2025

Indice

CAPITOLO 1 - Descrizione del caso strutturale	2
CAPITOLO 2 - Analisi dei carichi e predimensionamento	2
CAPITOLO 3 - Tensioni in esercizio e caratteristiche dei materiali ..	3
CAPITOLO 4 - Predimensionamento della trave	5
CAPITOLO 5 - Verifiche tensionali	9
CAPITOLO 6 - Fuso di Guyon e tracciato del cavo risultante	11
CAPITOLO 7 - Carichi equivalenti alla precompressione e verifica di deformabilità	15
CAPITOLO 8 - Verifica alle tensioni principali delle sezioni d'estre- mità	17
CAPITOLO 9 - Cenni sul progetto di una analoga trave a cavi pre-tesi	19
CAPITOLO 10 - Punti salienti	19

CAPITOLO 1 - Descrizione del caso strutturale

Nel presente elaborato si intende progettare una trave in calcestruzzo armato pre-compresso (**c.a.p.**) a cavi **post-tesi**, utilizzando cavi di precompressione ad andamento parabolico. La trave in oggetto fa parte di un impalcato la cui luce è riportata nei calcoli sottostanti, costituente una passerella pedonale che consente di attraversare un corso d'acqua.

La larghezza della passerella è pari a 5 m e, per la lunghezza della passerella, si considera:

$$L = 10 \left(1 + \frac{C}{10N} \right) \text{ m.}$$

Con $N = 6$ e $C = 26$, la lunghezza della passerella risulta:

$$L = 10 \left(1 + \frac{26}{10 \cdot 6} \right) = 14,33 \text{ m.}$$

L'impalcato è costituito da 3 travi in c.a.p. (*post-tese*) disposte parallelamente a un interasse di 2 m. Le travi sono gettate con calcestruzzo di classe C50/60 e sono sormontate da coppelle prefabbricate di spessore 5 cm, con funzione di *cassero a perdere* per il getto della soletta in c.a. La soletta funge da collegamento trasversale tra le travi, così che l'impalcato funzioni complessivamente a piastra. La soletta è a sua volta sormontata da un pacchetto di finitura di spessore 10 cm, che costituisce il piano calpestabile.

La trave in c.a.p. viene progettata secondo il **DM 14/01/2008** ("Norme Tecniche delle Costruzioni") con il metodo di calcolo degli **Stati Limite**. In particolare, si pone notevole attenzione agli **Stati Limite di Esercizio**, al fine di non superare le tensioni limite di acciaio e calcestruzzo, mantenendo la sezione in condizioni di precompressione integrale, priva di fessurazione, a vantaggio di minori frecce e maggiore durabilità.

CAPITOLO 2 - Analisi dei carichi e predimensionamento

Carichi permanenti strutturali

G_s = peso proprio della trave (da definire in base alla geometria).

Carichi permanentemente portati non strutturali

Sono composti da:

G_P = coppelle prefabbricate, soletta e finiture.

Coppelle 5 cm $\Rightarrow \gamma_{cls} \cdot h = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,05 \text{ m} = 1,25 \text{ kN/m}^2$.

Soletta 15 cm $\Rightarrow \gamma_{cls} \cdot h = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,15 \text{ m} = 3,75 \text{ kN/m}^2$.

Pacchetto finitura 10 cm $\Rightarrow \gamma_t \cdot h = 20 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,1 \text{ m} = 2 \text{ kN/m}^2$.

Pertanto, si ha:

$$G_p = 1,25 + 3,75 + 2 = 7 \text{ kN/m}^2.$$

Carichi variabili Q

Per questa tipologia di carico si considera un valore forfettario della folla compatta dalle NTC 2008:

$$Q = 5 \text{ kN/m}^2.$$

Si procede a un'analisi strutturale semplificata per determinare le massime sollecitazioni sulla **trave centrale**, la più sollecitata. Attraverso le **aree di influenza**, si ricava che la trave centrale competenza un'area di 2 m di larghezza. Il carico lineare per unità di lunghezza si ottiene pertanto moltiplicando il carico per unità di superficie per la larghezza dell'area di competenza:

$$\text{Carico permanente portato (SLE RARA)} = G_p \cdot i_{\text{trave}} = 7 \cdot 2 = 14 \text{ kN/m}.$$

$$\text{Carico variabile (SLE RARA)} = Q \cdot i_{\text{trave}} = 5 \cdot 2 = 10 \text{ kN/m}.$$

$$\text{Carico totale (SLE RARA)} = 14 + 10 = 24 \text{ kN/m}.$$

(Non si considera per ora il **peso proprio** della trave, non essendone definita la geometria.)

Adottando uno **schema statico di trave su due appoggi** e individuando il momento flettente massimo in mezzzeria:

$$M = \frac{p L^2}{8}.$$

Per la combinazione SLE RARA:

$$M_{\text{mezzzeria}}(\text{perm. portato}) = \frac{14 \cdot (14,33)^2}{8} = 359,36 \text{ kNm},$$

$$M_{\text{mezzzeria}}(\text{totale}) = \frac{24 \cdot (14,33)^2}{8} = 616,05 \text{ kNm}.$$

Inoltre, si deve tener conto che la trave sperimenta due fasi durante la vita utile:

1. **Fase di tiro:** agisce il peso proprio della trave, unito alla precompressione. La sezione reagente è il *calcestruzzo* al netto dell'area occupata dai cavi di precompressione.
2. **Fase di regime:** agiscono peso proprio, permanenti portati, carichi variabili e la precompressione *al netto* delle perdite. La sezione reagente è la *sezione di cls omogeneizzata* con l'area dei cavi, in quanto le guaine sono riempite e i cavi diventano “aderenti” al calcestruzzo.

CAPITOLO 3 - Tensioni in esercizio e caratteristiche dei materiali

Si riportano di seguito alcuni richiami normativi riguardo le **tensioni limite** nelle fasi di tiro e di regime.

Fase di tiro dei cavi

Nel calcestruzzo, le tensioni di compressione non devono superare:

$$\sigma_c < 0,70 f_{ckj},$$

essendo f_{ckj} la resistenza caratteristica del cls all'atto del tiro.

Le tensioni iniziali nei cavi:

$$\sigma_{spi} < \min(0,85 f_{p(0,1)k}, 0,75 f_{ptk}) \quad (\text{post-teso}),$$

$$\sigma_{spi} < \min(0,90 f_{p(0,1)k}, 0,80 f_{ptk}) \quad (\text{pre-teso}).$$

Fase di regime

$$\sigma_c < 0,60 f_{ck} \quad (\text{combinazione caratteristica/rara}),$$

$$\sigma_c < 0,45 f_{ck} \quad (\text{combinazione quasi permanente}).$$

Per l'acciaio in esercizio (a perdite avvenute), valgono:

$$\sigma_s < 0,8 f_{yk} \quad (\text{combinazione rara}).$$

Caratteristiche dei materiali

Calcestruzzo

- Resistenza cubica a compressione a 28 gg: $R_{ck} = 40$ MPa.
- Resistenza cilindrica a 28 gg: $f_{ck} = 0,83 R_{ck} = 33,20$ MPa.
- Resistenza cilindrica media: $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 41,20$ MPa.
- Resistenza a trazione media: $f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} = 3,13$ MPa.
- Resistenza del cls al tiro ($t = 15$ gg):

$$f_{ck,j} = f_{ck} e^{0,25 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{15}}\right)} = 30,21 \text{ MPa.}$$

- Tensione limite compressione iniziale: $\sigma_{cci} = 0,7 f_{ckj} = 21,14$ MPa.
- Tensione limite trazione iniziale:

$$\sigma_{cti} = \frac{f_{ctm}}{1,2} e^{0,25 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{15}}\right)} = 2,37 \text{ MPa.}$$

- Tensione limite compressione in esercizio: $\sigma_{cce} = 0,60 f_{ck} = 19,92$ MPa.
- Tensione limite trazione in esercizio: $\sigma_{cte} = \frac{f_{ctm}}{1,2} = 2,60$ MPa.
- Modulo elastico calcestruzzo:

$$E_{cm} = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 35102 \text{ MPa.}$$

- Modulo elastico iniziale:

$$E_{ci}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0,3} E_{cm}.$$

Acciaio da precompressione

- Modulo elastico: $E_p = 205000$ MPa.
- Resistenza caratteristica di snervamento trefoli: $f_{p1k} = 1670$ MPa.
- Resistenza caratteristica a rottura trefoli: $f_{ptk} = 1860$ MPa.
- Tensione limite in fase di tiro:

$$\sigma_{pi} = \min(0,75 f_{ptk} ; 0,85 f_{p1k}) = \min(1395 ; 1419) = 1395 \text{ MPa.}$$

- Tensione limite in esercizio:

$$\sigma_{pe} = 0,8 f_{p1k} = 1360 \text{ MPa.}$$

- Coefficiente di omogeneizzazione (in esercizio) per l'acciaio da precompressione-calcestruzzo:

$$n = \frac{E_p}{E_c} = \frac{205000}{35102} \approx 5,84 \simeq 6.$$

CAPITOLO 4 - Predimensionamento della trave

Si effettua il **predimensionamento** della trave sulla base di alcune relazioni empiriche, tenendo conto delle seguenti considerazioni:

- L'altezza della trave si pone pari a $L/15$, in modo da garantire il rispetto delle *verifiche di deformabilità*.
- Si adotta uno **spessore dell'anima** diverso per la *sezione corrente* e per la *sezione di appoggio* (dove il taglio è massimo), in quanto l'*area dell'anima* influenza in modo determinante la resistenza a taglio.
- In mezzzeria si ipotizza la *massima eccentricità* della precompressione, $e_0 = h'$.

Si pone dunque:

$$h = \frac{l}{15} \cdot L = \frac{1433}{15} = 95,5 \text{ cm} \approx 100 \text{ cm.}$$

$$d_1 = \frac{h}{6} = \frac{100}{6} = 16,6 \text{ cm} \approx 17 \text{ cm.}$$

$$d_2 = \frac{4}{3} d_1 = \frac{4}{3} \cdot 17 = 22,6 \text{ cm} \approx 23 \text{ cm.}$$

$$t = \frac{h}{8} = \frac{100}{8} = 12,5 \text{ cm} \approx 13 \text{ cm} \quad (\text{sezione corrente}).$$

$$t' = \frac{h}{6} = \frac{100}{6} = 16,6 \text{ cm} \approx 17 \text{ cm} \quad (\text{sezione con ringrosso}).$$

$$e_0 = h' = \frac{h}{8} = 12,5 \text{ cm} \approx 13 \text{ cm.}$$

Ipotizzando $b_1 = 30 \text{ cm}$ e $b_2 = 80 \text{ cm}$, si ottengono:

$$A_1 = b_1 d_1 = 30 \cdot 17 = 510 \text{ cm}^2,$$

$$A_2 = b_2 d_2 = 80 \cdot 23 = 1840 \text{ cm}^2,$$

$$A_3 = (h - d_1 - d_2) \cdot t = (100 - 17 - 23) \cdot 13 = 780 \text{ cm}^2.$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = 510 + 1840 + 780 = 3130 \text{ cm}^2 = 0,3130 \text{ m}^2.$$

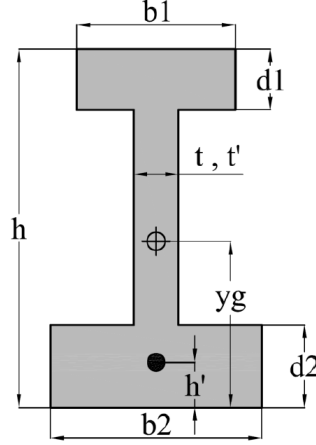


Figura 1: sezione trave di cui si sono calcolate le dimensioni

Il **peso proprio a metro lineare** risulta dunque:

$$p_p = \gamma_{cls} \cdot A = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,3130 \text{ m}^2 = 7,825 \text{ kN/m}.$$

Una volta definita la *geometria* della sezione di trave e calcolato il suo peso, si può completare la valutazione del carico totale (**SLE RARA**), comprendente:

$$G_p = 14 \text{ kN/m}, \quad Q = 10 \text{ kN/m}, \quad p_p = 7,825 \text{ kN/m},$$

quindi

$$\text{Carico totale} = 14 + 10 + 7,825 = 31,825 \text{ kN/m}.$$

Di conseguenza, si ricava il **momento flettente** in mezzaria dovuto al solo peso proprio e quello totale sempre nella configurazione SLE RARA:

$$M_{pp} = \frac{7,825 \text{ kN/m} \cdot (14,33 \text{ m})^2}{8} = 200,86 \text{ kNm},$$

$$M_{totale} = \frac{31,825 \text{ kN/m} \cdot (14,33 \text{ m})^2}{8} = 816,90 \text{ kNm}.$$

Dimensionamento dell'azione assiale N

Si ipotizza:

- La sezione della trave sia a T ($b_2 = 0$).
- Al lembo superiore compresso sia raggiunta la tensione limite di compressione in esercizio, $\sigma_{cce} = \sigma_{c1} = 19,92 \text{ MPa}$.

- Al lembo inferiore σ sia nulla (precompressione integrale).

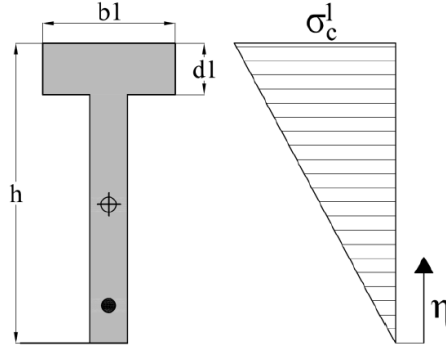


Figura 2: andamento di σ_c

Calcoliamo la forza di **precompressione** in esercizio, ipotizzando uno stato di precompressione totale ($\sigma_c(\eta) = \frac{\sigma_c \eta}{h}$):

$$N = \int_0^h \sigma_c(\eta) c(\eta) d\eta,$$

dove, in assenza di piattabanda inferiore, $c(\eta) = b_1$ nella zona superiore e $c(\eta) = t$ nell'anima.

Scomponendo l'integrale in due parti:

$$N = \frac{\sigma_c}{h} t \int_0^{h-d_1} \eta d\eta + \frac{\sigma_c}{h} b_1 \int_{h-d_1}^h \eta d\eta.$$

Integrando:

$$N = \frac{\sigma_c}{2h} [t(h-d_1)^2 + b_1(h^2 - (h-d_1)^2)].$$

Sostituendo i valori numerici:

$$N = \frac{19,92}{2 \cdot 1000} [130(1000 - 170)^2 + 300(1000^2 - (1000 - 170)^2)] = 1,821 \cdot 10^6 \text{ N}.$$

Si assume quindi $N \approx 2000 \text{ kN}$ (a regime). Al tiro invece, per considerare il 20% di *perdite di precompressione*, si ha:

$$N_0 = \beta N = 1,2 \cdot 2000 = 2400 \text{ kN}.$$

L'**area minima** dell'armatura di precompressione necessaria, in base ai limiti tensionali in fase di tiro ($\sigma_{pi} = 1395 \text{ MPa}$), risulta:

$$A_p = \frac{2\,400\,000}{1395} = 1720 \text{ mm}^2.$$

Adottando **due cavi** da 10 trefoli 6/10, si ha un'area effettiva di:

$$A_{p,\text{eff}} = 2 \cdot (10 \cdot 93) = 1860 \text{ mm}^2.$$

Trefolo 7 fili
Standard italiano DM 14/01/2008

Diametro nominale	Sezione	Tolleranza sulla sezione	Tensione caratteristica	Tensione all'1% di allungamento	Modulo elastico	Tolleranza sul modulo elastico	fp1%/fpt	fp1%/fpt
Ø	mm	mm²	%	MPa	MPa	MPa	%	%
5/16	7.90	38	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
3/8	9.30	52	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
3/8 S	9.60	55	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
7/16	11.11	75	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
1/2	12.50	93	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
1/2 S	12.90	99	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
6/10	15.20	139	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
6/10S	15.70	150	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95
7/10	17.80	190	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95

Figura 3: proprietà dei trefoli da precompressione

Correzione del peso proprio e carico totale

Nota la geometria della sezione, si valuta il **peso proprio** comprensivo di:

- Calcestruzzo (area A_c).
- Acciaio da precompressione (area A_p).

$$A_p = 18,60 \text{ cm}^2, \quad A_c = (A_1 + A_2 + A_3) - A_p = 510 + 1840 + 780 - 18,60 = 3111,4 \text{ cm}^2.$$

Il **peso proprio** al metro lineare si compone di:

$$p_{p, \text{cls}} = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 3111,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 7,825 \text{ kN/m},$$

$$p_{p, \text{acciaio}} = 78,50 \text{ kN/m}^3 \cdot 18,60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,146 \text{ kN/m}.$$

$$p_p = 7,825 + 0,146 = 7,97 \text{ kN/m}.$$

Nel **completo carico SLE RARA** si sommano:

$$14 + 10 + 7,825 + 0,146 = 31,971 \text{ kN/m}.$$

Si ricavano quindi, con la sezione corretta, i nuovi *momenti* in mezzzeria:

$$M_{pp} = \frac{7,97 \text{ kN/m} \cdot (14,33 \text{ m})^2}{8} = 204,57 \text{ kNm},$$

$$M_{totale} = \frac{31,971 \text{ kN/m} \cdot (14,33 \text{ m})^2}{8} = 820,65 \text{ kNm}.$$

Con tali valori, il *predimensionamento* della trave risulta completato, fornendo la base per le successive **verifiche** e la definizione di tutti i dettagli costruttivi.

CAPITOLO 5 - Verifiche tensionali

Si effettuano le verifiche tensionali ricordando che la trave sperimenta essenzialmente due “fasi”, con diversi **carichi agenti** e diverse **proprietà statiche** sezionali:

1. Fase di tiro:

- Carichi: *peso proprio* e *precompressione* (al valore iniziale).
- Sezione reagente: *calcestruzzo depurato* dall'area dei cavi di precompressione (cioè i cavi non omogeneizzati).

2. Fase di regime:

- Carichi: *peso proprio*, *permanenti portati*, *variabili* e *precompressione* (scontate le perdite).
- Sezione reagente: *calcestruzzo* + *area omogeneizzata* dei cavi di precompressione (cavi aderenti in guaina iniettata).

Le verifiche tensionali si riferiscono **alla sezione di mezzzeria**, dove si hanno le maggiori *sollecitazioni flessionali* (mentre il taglio è nullo).

Fase di tiro

Si considerino: $b_1 = 30$ cm, $b_d = 80$ cm.

$$A_1 = b_1 d_1 = 30 \cdot 17 = 510 \text{ cm}^2,$$

$$A_2 = b_d d_2 = 80 \cdot 23 = 1840 \text{ cm}^2,$$

$$A_3 = (h - d_1 - d_2) t = (100 - 17 - 23) \cdot 13 = 780 \text{ cm}^2,$$

$$A_p = 27,80 \text{ cm}^2.$$

$$A_{id,I} = A_1 + A_2 + A_3 - A_p = 510 + 1840 + 780 - 27,80 = 3102,2 \text{ cm}^2.$$

Momento statico rispetto all'intradosso:

$$\begin{aligned} S_{id,I} &= A_1 \left(h - d_1/2 \right) + A_2 \left(d_2/2 \right) + A_3 \left(d_2 + \frac{(h-d_1-d_2)}{2} \right) - A_p h' \\ &= 510 \left(100 - \frac{17}{2} \right) + 1840 \left(\frac{23}{2} \right) + 780 \left(23 + \frac{(100-17-23)}{2} \right) - 27,80 \cdot 13 = 108803,6 \text{ cm}^3. \end{aligned}$$

$$y_{g,I} = \frac{S_{id,I}}{A_{id,I}} = \frac{108803,6}{3102,2} = 35,07 \text{ cm}.$$

Momento di inerzia rispetto alla fibra baricentrica:

$$\begin{aligned} I_{id} &= \frac{1}{12} b_1 d_1^3 + \frac{1}{12} b_d d_2^3 + \frac{1}{12} t (h - d_1 - d_2)^3 + A_1 \left(H - \frac{d_1}{2} - y_{g,I} \right)^2 \\ &\quad + A_2 \left(y_{g,I} - \frac{d_2}{2} \right)^2 + A_3 \left(d_2 + \frac{(h-d_1-d_2)}{2} - y_{g,I} \right)^2 - A_p (y_{g,I} - h')^2 \\ &= 3,211 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 = 3,211 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Le **verifiche tensionali** nel calcestruzzo (sezione interamente reagente, compressioni positive) considerano:

$$y_g = y_i = 35,07 \text{ cm} \quad (\text{distanza baricentro-intradosso}),$$

$$y_s = h - y_i = 100 - 35,07 = 64,93 \text{ cm} \quad (\text{distanza baricentro-estradosso}).$$

Lembo superiore (y_s):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{sup},0} &= \frac{N_0}{A_c} - \frac{N_0(y_i - e_0)}{I_{\text{id}}} y_s + \frac{M_{pp}}{I_{\text{id}}} y_s. \\ &= \frac{2400 \cdot 10^3}{3102,2 \cdot 10^2} - \frac{2400 \cdot 10^3 (350,7 - 130)}{3,211 \cdot 10^{10}} \cdot 649,3 + \frac{204,57 \cdot 10^6}{3,211 \cdot 10^{10}} \cdot 649,3 \\ &= 1,161 \text{ MPa} > \sigma_{cti} = -2,37 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Lembo inferiore (y_i):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{inf},0} &= \frac{N_0}{A_c} - \frac{N_0(y_i - e_0)}{I_{\text{id}}} y_i + \frac{M_{pp}}{I_{\text{id}}} y_i. \\ &= \frac{2400 \cdot 10^3}{3102,2 \cdot 10^2} - \frac{2400 \cdot 10^3 (350,7 - 130)}{3,211 \cdot 10^{10}} \cdot 350,7 + \frac{204,57 \cdot 10^6}{3,211 \cdot 10^{10}} \cdot 350,7 \\ &= 4,19 \text{ MPa} < \sigma_{cci} = 22,14 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Le **verifiche allo SLE** in fase di tiro sono dunque **soddisfatte**.

Fase di esercizio

Si considera la sezione *omogeneizzata* (cavi solidali al cls). Il coefficiente di omogeneizzazione è $n = 6$.

$$A_{\text{id,II}} = A_1 + A_2 + A_3 - A_p + n A_p = 3102,2 + 6 \cdot 27,80 = 3269 \text{ cm}^2.$$

Momento statico rispetto all'intradosso:

$$\begin{aligned} S_{\text{id,II}} &= A_1 \left(h - \frac{d_1}{2} \right) + A_2 \left(\frac{d_2}{2} \right) + A_3 \left(d_2 + \frac{(h-d_1-d_2)}{2} \right) \\ &\quad - A_p h' + n A_p h'. \\ &= 510 \left(100 - \frac{17}{2} \right) + 1840 \left(\frac{23}{2} \right) + 780 \left(23 + \frac{(100-17-23)}{2} \right) - 27,80 \cdot 13 + 6 \cdot 27,80 \cdot 13 = 110972 \text{ cm}^3. \end{aligned}$$

$$y_{g,II} = \frac{S_{\text{id,II}}}{A_{\text{id,II}}} = \frac{110972}{3269} = 33,94 \text{ cm}.$$

Momento di inerzia rispetto alla fibra baricentrica:

$$\begin{aligned} I_{\text{id}} &= \frac{1}{12} b_1 d_1^3 + \frac{1}{12} b_d d_2^3 + \frac{1}{12} t (h - d_1 - d_2)^3 + A_1 \left(H - \frac{d_1}{2} - y_{g,II} \right)^2 \\ &\quad + A_2 \left(y_{g,II} - \frac{d_2}{2} \right)^2 + A_3 \left(d_2 + \frac{(h-d_1-d_2)}{2} - y_{g,II} \right)^2 - A_p (y_{g,II} - h')^2 + n A_p (y_{g,II} - h')^2 \end{aligned}$$

$$= 3,147 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 = 3,147 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4.$$

La **posizione del baricentro** è:

$$y_{g,II} = 33,94 \text{ cm}, \quad y_s = 100 - 33,94 = 66,06 \text{ cm}.$$

Lembo superiore (y_s):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{sup},1} &= \frac{N}{A_{\text{id},II}} - \frac{N(y_i - e_0)}{I_{\text{id}}} y_s + \frac{M_{\text{tot}}}{I_{\text{id}}} y_s. \\ &= \frac{2000 \cdot 10^3}{3269 \cdot 10^2} - \frac{2000 \cdot 10^3 (339,4 - 130)}{3,147 \cdot 10^{10}} \cdot 660,6 + \frac{820,65 \cdot 10^6}{3,147 \cdot 10^{10}} \cdot 660,6 = 14,55 \text{ MPa} \\ &< \sigma_{\text{cce}} = 19,92 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Lembo inferiore (y_i):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{inf},1} &= \frac{N}{A_{\text{id},II}} - \frac{N(y_i - e_0)}{I_{\text{id}}} y_i + \frac{M_{\text{tot}}}{I_{\text{id}}} y_i. \\ &= \frac{2000 \cdot 10^3}{3269 \cdot 10^2} - \frac{2000 \cdot 10^3 (339,4 - 130)}{3,147 \cdot 10^{10}} \cdot 339,4 + \frac{820,65 \cdot 10^6}{3,147 \cdot 10^{10}} \cdot 339,4 = 10,45 \text{ MPa} \\ &> -2,60 \text{ MPa } (\sigma_{\text{cte}}). \end{aligned}$$

Le **verifiche allo SLE** in fase di esercizio risultano anch'esse **soddisfatte**.

CAPITOLO 6 - Fuso di Guyon e tracciato del cavo risultante

Affinché le tensioni limite vengano rispettate in tutte le sezioni trasversali della trave, il **cavo risultante** deve rimanere *all'interno del fuso di Guyon*. Al fine di determinare tale regione, è necessario individuare i punti limite inferiore e superiore, e_0 ed e_1 , rispettivamente in **fase di tiro** e in **fase di regime**, sulla base degli **sforzi limite** precedentemente definiti.

I *punti limite* rappresentano le massime eccentricità positiva e negativa (*valutate rispetto all'asse baricentrico* della sezione) che il cavo risultante può assumere nel rispetto delle tensioni limite del calcestruzzo, assumendo che la *precompressione* sia l'unico carico agente (*condizione virtuale*).

Fase di tiro (lembo inferiore compresso, lembo superiore teso)

$$\begin{cases} \sigma_{c0} = \frac{N_0}{A_{\text{id},I}} + \frac{N_0 e'_0}{I_{\text{id},I}} y_{i,I}, \\ \sigma_{t0} = \frac{N_0}{A_{\text{id},I}} - \frac{N_0 e''_0}{I_{\text{id},I}} y_{s,I}. \end{cases}$$

da cui si ottiene

$$\begin{cases} e'_0 = \left(\sigma_{c0} - \frac{N_0}{A_{id,I}} \right) \cdot \frac{I_{id,I}}{N_0 y_{i,I}}, \\ e''_0 = \left(-\sigma_{t0} + \frac{N_0}{A_{id,I}} \right) \cdot \frac{I_{id,I}}{N_0 y_{s,I}}. \end{cases}$$

Sostituendo i valori numerici (con $\sigma_{c0} = 21,14 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{t0} = -2,37 \text{ N/mm}^2$, $N_0 = 2400 \text{ kN}$, ecc.), si ottiene:

$$\begin{cases} e'_0 = \left(21,14 \text{ N/mm}^2 - \frac{2400 \cdot 10^3}{3102,2 \cdot 10^2} \right) \cdot \frac{3,211 \cdot 10^{10}}{2400 \cdot 10^3 \cdot 350,7}, \\ e''_0 = \left(-2,37 + \frac{2400 \cdot 10^3}{3102,2 \cdot 10^2} \right) \cdot \frac{3,211 \cdot 10^{10}}{2400 \cdot 10^3 \cdot 649,3}. \end{cases}$$

I valori risultano **positivi**, in quanto il *punto limite inferiore* giace *al di sotto* dell'asse baricentrico.

$$e_0 = \min(e'_0, e''_0) = \min(511,34 \text{ mm}, 110,57 \text{ mm}) = 110,57 \text{ mm}.$$

Fase di regime (lembo inferiore teso, lembo superiore compresso)

$$\begin{cases} \sigma_{c1} = \frac{N}{A_{id,II}} - \frac{N e'_1}{I_{id,II}} y_{s,II}, \\ \sigma_{t1} = \frac{N}{A_{id,II}} + \frac{N e''_1}{I_{id,II}} y_{i,II}. \end{cases}$$

da cui si ottiene

$$\begin{cases} e'_1 = \left(-\sigma_{c1} + \frac{N}{A_{id,II}} \right) \cdot \frac{I_{id,II}}{N y_{s,II}}, \\ e''_1 = \left(+\sigma_{t1} - \frac{N}{A_{id,II}} \right) \cdot \frac{I_{id,II}}{N y_{i,II}}. \end{cases}$$

Inserendo i valori numerici (con $\sigma_{c1} = -19,92 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{t1} = +2,60 \text{ N/mm}^2$, $N = 2000 \text{ kN}$, ecc.), si ottiene:

$$\begin{cases} e'_1 = \left(-19,92 + \frac{2000 \cdot 10^3}{3269 \cdot 10^2} \right) \cdot \frac{3,147 \cdot 10^{10}}{2000 \cdot 10^3 \cdot 660,6}, \\ e''_1 = \left(+2,60 - \frac{2000 \cdot 10^3}{3269 \cdot 10^2} \right) \cdot \frac{3,147 \cdot 10^{10}}{2000 \cdot 10^3 \cdot 339,4}. \end{cases}$$

I valori sono **negativi**, in quanto il *punto limite superiore* giace *al di sopra* dell'asse baricentrico.

$$e_1 = \max(e'_1, e''_1) = \max(-328,75, -163,10) = -163,10 \text{ mm}.$$

L'andamento del **fuso di Guyon** si ottiene a partire dai punti limite, tenendo conto dei *carichi esterni*, ovvero della presenza dei momenti flettenti in condizioni di tiro $M_0(x)$ e di regime $M_1(x)$. Tale fuso è descritto dai suoi limiti inferiore e superiore, d_0 e d_1 , i quali rappresentano le massime eccentricità positiva e negativa (rispetto al baricentro) che il cavo risultante può assumere rispettando le tensioni limite del calcestruzzo, *assumendo che la precompressione agisca insieme ai carichi* nella fase di tiro o di regime.

Fase di tiro (lembo inferiore compresso, lembo superiore teso):

$$\begin{cases} \sigma_{c0} = \frac{N_0}{A_{id,I}} + \frac{N_0 d'_0}{I_{id,I}} y_{i,I} - \frac{M_0}{I_{id,I}} y_{i,I}, \\ \sigma_{t0} = \frac{N_0}{A_{id,I}} - \frac{N_0 d''_0}{I_{id,I}} y_{s,I} + \frac{M_0}{I_{id,I}} y_{s,I}. \end{cases}$$

da cui si ottiene:

$$\begin{cases} d'_0 = \left(+\sigma_{c0} - \frac{N_0}{A_{id,I}} \right) \cdot \frac{I_{id,I}}{N_0 y_{i,I}} + \frac{M_0}{N_0} = e'_0 + \frac{M_0}{N_0}, \\ d''_0 = \left(-\sigma_{t0} + \frac{N_0}{A_{id,I}} \right) \cdot \frac{I_{id,I}}{N_0 y_{s,I}} + \frac{M_0}{N_0} = e''_0 + \frac{M_0}{N_0}. \end{cases}$$

Fase di regime (lembo inferiore teso, lembo superiore compresso):

$$\begin{cases} \sigma_{c1} = \frac{N}{A_{id,II}} - \frac{N d'_1}{I_{id,II}} y_{s,II} + \frac{M_1}{I_{id,II}} y_{s,II}, \\ \sigma_{t1} = \frac{N}{A_{id,II}} + \frac{N d''_1}{I_{id,II}} y_{i,II} - \frac{M_1}{I_{id,II}} y_{i,II}. \end{cases}$$

da cui si ottiene:

$$\begin{cases} d'_1 = \left(-\sigma_{c1} + \frac{N}{A_{id,II}} \right) \cdot \frac{I_{id,II}}{N y_{s,II}} + \frac{M_1}{N} = e'_1 + \frac{M_1}{N}, \\ d''_1 = \left(+\sigma_{t1} - \frac{N}{A_{id,II}} \right) \cdot \frac{I_{id,II}}{N y_{i,II}} + \frac{M_1}{N} = e''_1 + \frac{M_1}{N}. \end{cases}$$

Si ricorda che e_0, e_1, d_0, d_1 esprimono distanze rispetto all'asse baricentrico, **positive se verso il basso**.

Momenti flettenti in fase di tiro e di regime

L'andamento di $M_0(x)$ e $M_1(x)$, in base ai valori precedentemente specificati, si assume:

$$M_0(x) = \frac{p_p \cdot L}{2} \cdot x - \frac{p_p \cdot x^2}{2} = \frac{p_p}{2} \cdot x \cdot (L - x) = \frac{7,97}{2} \cdot x \cdot (14,33 - x),$$

$$M_1(x) = \frac{(p_p + p_u)}{2} \cdot x \cdot (L - x) = \frac{(7,97 + 24)}{2} \cdot x \cdot (14,33 - x).$$

dove p_p è il *peso proprio* della trave (*unico carico* in fase di tiro), mentre $p_p + p_u$ è il *carico totale* in Combinazione Rara in fase di regime (peso proprio + permanente portato + variabile).

A livello puramente generale, si può concludere che:

$$d_0(x) = e_0 + \frac{M_0(x)}{N_0} = 110,57 + \frac{200,86 \cdot 10^3}{2000} = 211 \text{ mm},$$

$$d_1(x) = e_1 + \frac{M_1(x)}{N} = -163,10 + \frac{816,90 \cdot 10^3}{2400} = 177,27 \text{ mm}.$$

Si verifica che la sezione è correttamente dimensionata: *in fase di tiro*, alla *sezione di mezzeria*, il cavo passa a $(350,7 - 130) \text{ mm} = 220,7 \text{ mm}$ dal baricentro, mentre il fuso di Guyon, in tale punto, è limitato da 211 mm e 177,27 mm dal baricentro. Quindi, il *cavo risultante* è compreso tra i limiti inferiori e superiori del fuso di Guyon.

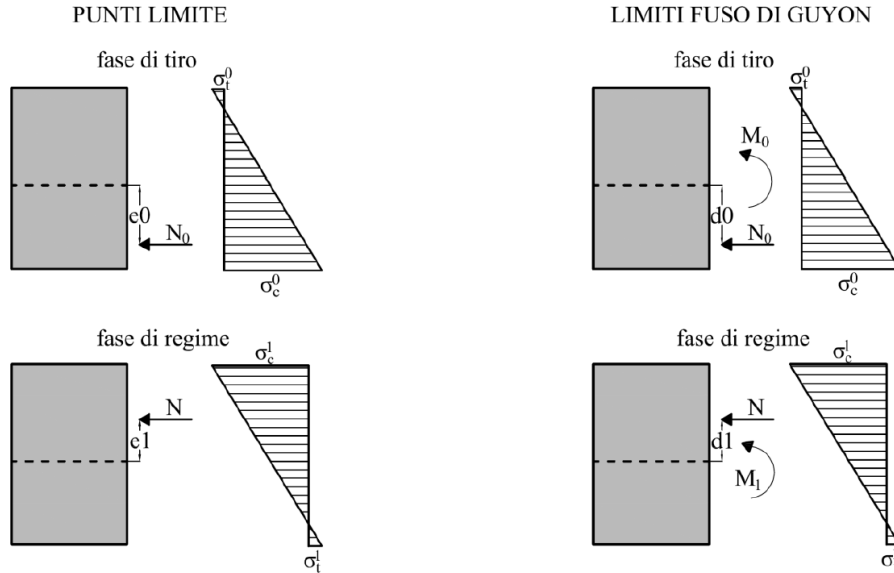


Figura 4: andamento degli sforzi limiti e di guyon al tiro e in esercizio

Tracciato del cavo risultante

L'equazione che descrive il **tracciato del cavo risultante** ha lo scopo di *verificare* che le tensioni limite vengano rispettate in tutte le sezioni, controllando che il cavo resti *all'interno* del fuso di Guyon.

Si può porre:

$$e(x) = a + bx + cx^2,$$

dove a, b, c si valutano *imponendo le condizioni al contorno*:

$$\begin{cases} e(0) = 0 & (x = 0), \\ e\left(\frac{L}{2}\right) = f & (\text{massima freccia}), \\ \left.\frac{de}{dx}\right|_{x=L/2} = 0 & (\text{tangente orizzontale in mezzeria}). \end{cases}$$

Otteniamo dunque:

$$\begin{cases} a = 0, \\ 0 = b + 2c\left(\frac{L}{2}\right), \\ f = a + b\left(\frac{L}{2}\right) + c\left(\frac{L}{2}\right)^2, \end{cases}$$

da cui

$$\begin{cases} a = 0, \\ b = \frac{4f}{L}, \\ c = -\frac{4f}{L^2}. \end{cases}$$

Pertanto, l'equazione finale del **cavo risultante** (in metri) è:

$$e(x) = \frac{4f}{L} \cdot x - \frac{4f}{L^2} \cdot x^2 = \frac{4f}{L} \cdot x \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right).$$

Assumendo $f = (0,3507 - 0,130) \text{ m} = 0,2207 \text{ m}$ (220,7 mm) come massima eccentricità rispetto al baricentro, $L = 14,33 \text{ m}$, si ha:

$$e(x) = 0,06160 \cdot x \cdot \left(1 - \frac{x}{14,33}\right).$$

In tal modo, si assicura che il *cavo risultante* sia sempre **compreso** nel *fuso di Guyon* e quindi *rispetti* le tensioni limite del calcestruzzo in tutte le sezioni lungo la trave.

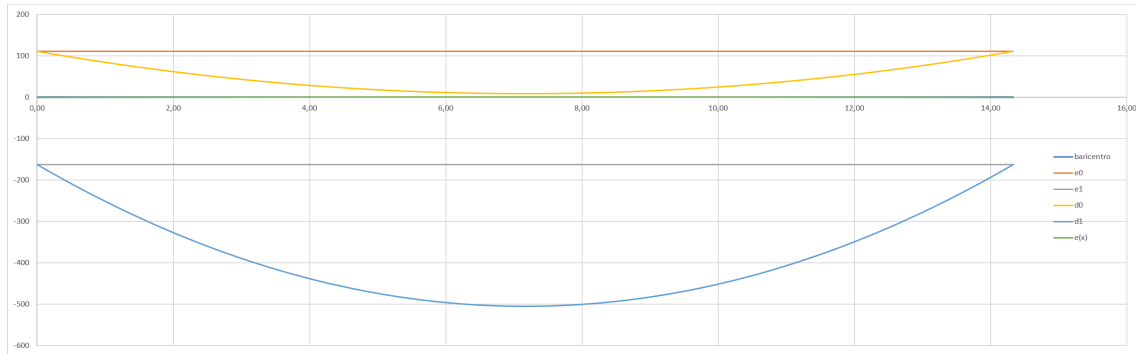


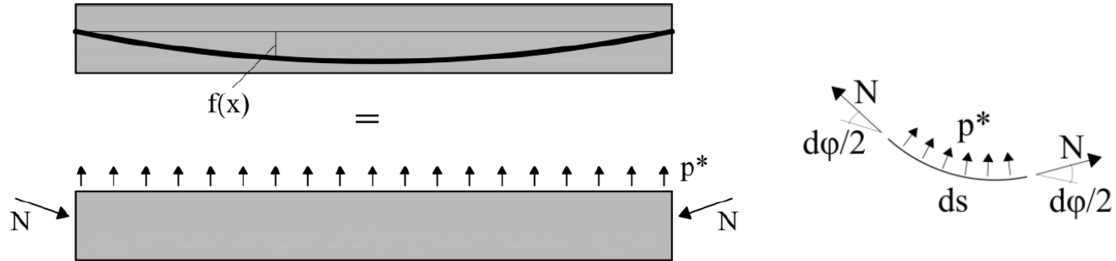
Figura 5: Fuso di Guyon per la trave in calcestruzzo armato precompresso: limite superiore (fase di regime) e limite inferiore (fase di tiro) del tracciato dei cavi.

CAPITOLO 7 - Carichi equivalenti alla precompressione e verifica di deformabilità

In condizioni di **tiro** e di **regime**, il cavo risultante passa alle seguenti distanze dal baricentro:

$$f_0 = 0,2207 \text{ m}, \quad f_1 = y_{i,II} - t = 0,3394 - 0,130 = 0,2094 \text{ m}.$$

Si desidera calcolare il **carico distribuito equivalente alla precompressione**, che risulta rivolto verso l'alto se il cavo di precompressione ha curvatura positiva. In tal caso, il carico distribuito equivalente si oppone ai carichi esterni ed è equilibrato dalla componente verticale (rivolta verso il basso) della precompressione applicata alle testate:



$$N \frac{d\phi}{2} + N \frac{d\phi}{2} = p^{(*)} ds \Rightarrow p^{(*)} = N \frac{d\phi}{ds}.$$

Se $\frac{d\phi}{ds} \approx \frac{d^2 f}{dx^2}$, allora

$$p^{(*)} = N \frac{d^2 f}{dx^2}.$$

Carico equivalente in condizioni di tiro e di regime

I valori di carico *equivalente* alla precompressione nelle due fasi (*tiro* e *regime*) sono:

$$p_0^{(*)} = N_0 \frac{d^2 f}{dx^2} = 2 c N_0 = -8 \frac{f_0}{L^2} N_0 = -8 \cdot \frac{0,2207 \text{ m}}{(14,33 \text{ m})^2} \cdot 2400 \text{ kN} = -20,63 \text{ kN/m},$$

$$p_1^{(*)} = N_1 \frac{d^2 f}{dx^2} = 2 c N_1 = -8 \frac{f_1}{L^2} N_1 = -8 \cdot \frac{0,2085 \text{ m}}{(14,33 \text{ m})^2} \cdot 2000 \text{ kN} = -16,24 \text{ kN/m}.$$

Considerando tali carichi in *aggiunta* (con segno opportuno) ai carichi esterni, è possibile calcolare in maniera immediata le **freccie** in mezzeria per le due fasi.

Carico distribuito totale

Fase di tiro:

$$p_{\text{tot},0} = p_p - p_0^{(*)} = 7,97 - 20,63 = -12,66 \text{ kN/m}.$$

Fase di regime:

$$p_{\text{tot},1} = p_p + p_u - p_1^{(*)} = 7,97 + 24,00 - 16,24 = 15,73 \text{ kN/m}.$$

Nell'ipotesi di **trave semplicemente appoggiata**, la **freccia** in mezzeria si valuta con la nota formula:

$$\eta = \frac{5}{384} \frac{p l^4}{E_c I_c},$$

positiva se rivolta verso il basso, *negativa* altrimenti.

Fase di tiro

$$\eta_0 = \frac{5}{384} \frac{p_{\text{tot},0} L^4 10^{12}}{E_c I_c^0} = \frac{5}{384} \frac{(-12,66) \cdot (14,33)^4 \cdot 10^{12}}{35102 \cdot (8,16 \cdot 10^{10})} = -2,42 \text{ mm.}$$

Fase di regime

$$\eta_1 = \frac{5}{384} \frac{p_{\text{tot},1} L^4 10^{12}}{E_c I_c^1} = \frac{5}{384} \frac{15,73 \cdot (14,33)^4 \cdot 10^{12}}{35102 \cdot (8,93 \cdot 10^{10})} = 2,75 \text{ mm.}$$

La **freccia** è *positiva* se rivolta verso il basso e *negativa* se in verso opposto. In fase di tiro, la precompressione eccede il peso proprio, determinando una freccia *verso l'alto* ($\eta_0 = -2,42 \text{ mm}$), mentre in fase di regime la trave flette verso il basso ($\eta_1 = +2,75 \text{ mm}$) a causa dei maggiori carichi esterni.

CAPITOLO 8 - Verifica alle tensioni principali delle sezioni d'estremità

Si procede ora al calcolo delle **tensioni principali** nelle sezioni della trave prossime alle estremità ($x = 150 \text{ cm}$ e $x = 300 \text{ cm}$), dove il **taglio** è massimo, al fine di verificare che esse non superino i **limiti di compressione e trazione** nella *sola fase di regime* (peso proprio + carichi permanenti + carichi variabili). Si fa notare che si opera sempre allo **Stato Limite di Esercizio in Combinazione Rara**, in coerenza con le fasi precedenti.

Per x compreso tra 0 e 150 cm, lo **spessore dell'anima** è $t' = 17 \text{ cm}$, mentre nel tratto $150 \leq x \leq 300 \text{ mm}$ lo spessore dell'anima passa progressivamente da 17 cm al valore della sezione corrente $t = 13 \text{ cm}$. Il **ringrosso** dell'anima mira a resistere meglio alle **azioni taglienti**.

Il carico distribuito in condizioni di regime è quello calcolato in precedenza:

$$p_{\text{tot},1} = p_p + p_u - p_1^{(*)} = 7,97 + 24,00 - 16,24 = 15,73 \text{ kN/m.}$$

Si osservi come la *precompressione*, tramite il *carico distribuito ad essa equivalente*, contribuisca a **ridurre** l'azione di taglio.

Taglio nelle sezioni $x = 150 \text{ cm}$ e $x = 300 \text{ cm}$

Nell'ipotesi di trave *semplicemente appoggiata*, si calcola il valore del taglio:

$$V_1(x = 150) = p_{\text{tot},1} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{\left(\frac{L}{2} - x\right)}{\frac{L}{2}} = 15,73 \cdot \frac{14,33}{2} \cdot \frac{\frac{14,33}{2} - 1,5}{\frac{14,33}{2}} = 89,11 \text{ kN,}$$

$$V_2(x = 300) = p_{\text{tot},1} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{\left(\frac{L}{2} - x\right)}{\frac{L}{2}} = 15,73 \cdot \frac{14,33}{2} \cdot \frac{\frac{14,33}{2} - 3}{\frac{14,33}{2}} = 65,52 \text{ kN.}$$

Sezione a $x = 150 \text{ cm}$:

- $b_1 = 30 \text{ cm}, \quad b_d = 80 \text{ cm.}$

- $A_1 = b_1 d_1 = 30 \cdot 17 = 510 \text{ cm}^2$, $A_2 = b_d d_2 = 80 \cdot 23 = 1840 \text{ cm}^2$, $A_3 = (100 - 17 - 23) \cdot 13 = 780 \text{ cm}^2$.
- $A_p = 27,80 \text{ cm}^2$, $n = 6$.

$$A_{\text{id,II}} = A_1 + A_2 + A_3 - A_p + n A_p = 510 + 1840 + 780 - 27,80 + 6 \cdot 27,80 = 3269 \text{ cm}^2.$$

Il **momento statico** e il **baricentro** rispetto all'intradosso:

$$\begin{aligned} S_{\text{id,II}} &= A_1 \left(h - \frac{d_1}{2} \right) + A_2 \left(\frac{d_2}{2} \right) + A_3 \left(d_2 + \frac{(h - d_1 - d_2)}{2} \right) - A_p h' + n A_p h', \\ &= 510 \left(100 - \frac{17}{2} \right) + 1840 \left(\frac{23}{2} \right) + 780 \left(23 + \frac{(100 - 17 - 23)}{2} \right) - 27,80 \cdot 13 + 6 \cdot 27,80 \cdot 13 = 110972 \text{ cm}^3. \\ y_{g,II} &= \frac{S_{\text{id,II}}}{A_{\text{id,II}}} = \frac{110972}{3269} = 33,94 \text{ cm}. \end{aligned}$$

Momento di inerzia rispetto alla fibra baricentrica:

$$\begin{aligned} I_{\text{id}} &= \frac{1}{12} b_1 d_1^3 + \frac{1}{12} b_d d_2^3 + \frac{1}{12} t (h - d_1 - d_2)^3 + A_1 \left(H - \frac{d_1}{2} - y_{g,II} \right)^2 \\ &+ A_2 \left(y_{g,II} - \frac{d_2}{2} \right)^2 + A_3 \left(d_2 + \frac{(h - d_1 - d_2)}{2} - y_{g,II} \right)^2 - A_p \left(y_{g,II} - h' \right)^2 + n A_p \left(y_{g,II} - h' \right)^2, \\ &= 3,147 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 = 3,147 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Proprietà statiche della sezione $x = 300 \text{ cm}$ in regime (*sezione corrente*) sono quelle *calcolate in precedenza*:

$$A_{\text{id,II}} = 3269 \text{ cm}^2, \quad S_{\text{id,II}} = 110972 \text{ cm}^3, \quad I_{\text{id,II}} = 3,147 \cdot 10^6 \text{ cm}^4.$$

Tensioni principali

Si calcolano le **tensioni principali** in corrispondenza del **baricentro**, in fase di regime ($\rightarrow$ esercizio).

Sezione $x = 150 \text{ cm}$

$$\tau_b = \frac{V S_b}{I t} = \frac{89,11 \cdot 10^3 \cdot 110972 \cdot 10^3}{(3,147 \cdot 10^6 \cdot 10^4) \cdot 170} = 1,84 \text{ MPa}.$$

$$\sigma_b = \frac{N}{A} = \frac{2000 \cdot 10^3}{3269 \cdot 10^2} = 6,11 \text{ MPa}.$$

$$\sigma_{1,2} = -\frac{\sigma_b}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \tau_b^2} = -\frac{6,11}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{6,11^2 + 4 \cdot 1,84^2} = -3,055 \pm 3,566 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1(\text{traz}) = -3,055 + 3,566 = 0,511 \text{ MPa} < \sigma_{cte} = 2,60 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Verifica soddisf.}$$

$$\sigma_2(\text{comp}) = -3,055 - 3,566 = -6,621 \text{ MPa} < \sigma_{cce} = 19,92 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Verifica soddisf.}$$

Con ciò, le tensioni principali allo **Stato Limite di Esercizio** risultano verificate nelle sezioni prossime alle estremità con massimo taglio.

CAPITOLO 9 - Cenni sul progetto di una analoga trave a cavi pre-tesi

In una trave a **cavi pre-tesi**, le armature vengono messe in tensione *prima* che il calcestruzzo venga gettato. Il loro tiro non è più modificabile e l'andamento dei trefoli è solitamente **rettilineo**. Al momento del rilascio delle testate, l'intera forza di precompressione viene immediatamente assorbita dal calcestruzzo, e i trefoli risultano *aderenti* a esso.

Poiché il rilascio dei martinetti avviene in un momento in cui il calcestruzzo **non** ha ancora raggiunto la maturazione completa (solitamente tra 7 e 28 giorni), le **tensioni limite** devono essere *ridotte* opportunamente. I limiti tensionali, infatti, sono generalmente più stringenti rispetto al caso di una trave a **cavi post-tesi**.

Essendo i cavi di precompressione **rettilinei**, non è possibile beneficiare dell'effetto "benefico" sulla *resistenza a taglio* che si ottiene, invece, in una trave a cavi **post-tesi** con andamento parabolico. In quest'ultima, la precompressione contribuisce a ridurre le sollecitazioni tangenziali massime grazie alla componente verticale dei cavi curvi.

CAPITOLO 10 - Punti salienti

Si riportano di seguito i 9 punti principali affrontati nel presente documento:

1. Aspetti principali della geometria delle sezioni in c.a.p.
2. Incidenza del peso proprio strutturale di una trave in c.a.p. sui carichi complessivi
3. Precompressione integrale
4. Ruolo del tempo di maturazione nelle proprietà meccaniche del calcestruzzo
5. Differenza tra fase di tiro e fase di regime
6. Carichi equivalenti alla precompressione
7. Effetto della precompressione sulla deformabilità delle travi in c.a.p.
8. Benefici della precompressione sulla verifica al taglio
9. Confronto tra precompressione a cavi pre-tesi e post-tesi