

Sommario

| | |
|--|----|
| Premessa | 2 |
| <i>Scelta dei materiali</i> | 2 |
| <i>Definizione dimensioni e carichi</i> | 3 |
| Predimensionamento | 3 |
| Analisi dei carichi e calcolo delle sollecitazioni | 5 |
| Progetto dello sforzo di precompressione N..... | 5 |
| Scelta e disposizione dei cavi | 7 |
| <i>Fuso di Guyon</i> | 7 |
| <i>Scelta dei cavi</i> | 9 |
| Calcolo delle cadute di tensione | 10 |
| <i>Generalità</i> | 10 |
| <i>Cadute istantanee</i> | 11 |
| <i>Cadute differite</i> | 12 |
| Verifiche alle tensioni ammissibili | 15 |
| <i>Verifica flessionale</i> | 15 |
| <i>Verifica a taglio</i> | 15 |
| <i>Verifica delle testate</i> | 16 |
| Verifiche allo SLU | 17 |
| <i>Combinazione di carico</i> | 17 |
| <i>Verifica flessionale</i> | 18 |
| <i>Verifica a taglio</i> | 19 |
| Verifica a fessurazione | 20 |

Elenco elaborati:

Tavola 1 - Carpenteria trave (1:50)

Tavola 2 - Particolari testate e staffatura (1:20)

Premessa

Si svolge una esercitazione progettuale avente come oggetto una trave da ponte in C.A.P. realizzata con armatura post-tesa.

Scelta dei materiali

Calcestruzzo $R_{ck}=40 \text{ N/mm}^2$

Acciaio FeB38k

Trefoli da precompressione da 1/2'' assemblati in gruppi da 4 secondo il brevetto Morandi*

$$f_{ptk}=1900 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p(1)k}=1700 \text{ N/mm}^2$$

Sezione trave della IANUS prefabbricati

Stante la normativa italiana** si adottano i seguenti valori per la verifica della struttura:

$$\bar{\sigma}_c \leq \frac{R_{ck}}{\gamma_{m,c} \cdot \gamma_{Ec}} = 0.37 R_{ck} = 14.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{ct} \geq \frac{f_{ctk}}{\gamma_{m,c}} = \frac{0.70 f_{ctm}}{\gamma_{m,c}} = \frac{0.70 \cdot 0.48 \cdot \sqrt{R_{ck}}}{\gamma_{m,c}} = -1.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{c0} \leq \frac{R_{ckj}}{\gamma_{m,c}} = 23.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{c0r} \geq 0.10 R_{ckj} = -4 \text{ N/mm}^2$$

$$E_c = 11000 \cdot R_{cm}^{1/3} \text{ N/mm}^2 = 41000 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{spi} \leq \frac{f_{p1k}}{\gamma_{m,s}} = 1478 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sp} \leq \frac{f_{ptk}}{\gamma_{m,s}} = 1151 \text{ N/mm}^2$$

In assenza di più accurate informazioni si è fatta l'ipotesi che la precompressione si applichi con $j > 28$ gg, così che risulta $R_{ck} = R_{ckj}$

*Si veda in proposito il "Prontuario ad uso dei progettisti" sulla precompressione sistema Morandi M5 (Centro per lo studio e le applicazioni della precompressione - Cesap)

**"Norme tecniche per le costruzioni", DM 14/09/2005

Possiamo inoltre identificare le caratteristiche ‘di progetto’ per la verifica allo SLU:

$$f'_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_{m,c}} = 17.8N / mm^2$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{m,c}} = -1.3N / mm^2$$

$$f_{cfm} = -3.6N / mm^2$$

$$f_{pd} = \frac{f_{p(1)k}}{1.15} = 1478N / mm^2$$

$$f_{sd} = \frac{f_{sy}}{1.15} = 330.4N / mm^2$$

Definizione dimensioni e carichi

In dipendenza del nome, del cognome e del numero di matricola risulta:

$$L = 20.0m + (N_1 + C_1)m = 29.0m$$

$$q_k = 18.0kN / m - 0.25(N_1 + C_1)kN / m = 15.8kN / m$$

$$g'_k = 3.0kN / m^2$$

$$i = 2.0m + 0.05(C_1)m = 1.75m$$

di conseguenza per lo studio della trave si adotteranno:

$$q_k = 15.8kN / m$$

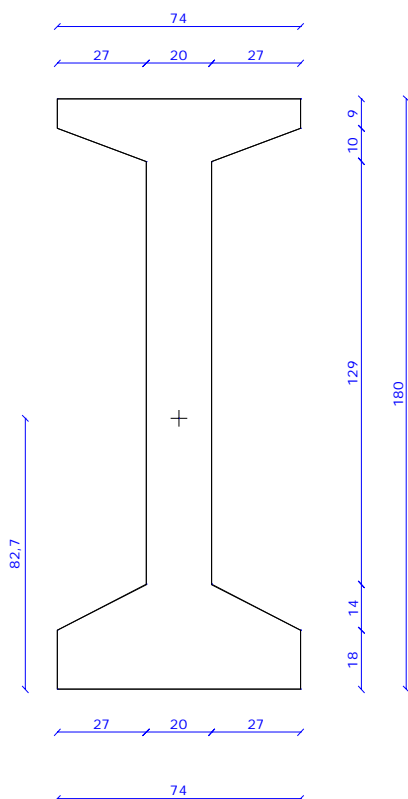
$$g'_k = 5.25kN / m$$

Predimensionamento

La sezione della trave si sceglie dai sagomari proposti dai costruttori, muovendo generalmente da considerazioni di tipo generale in merito alla rigidità dell'elemento; si ritiene buona norma di progettazione, infatti, per elementi strutturali di questo tipo, che il rapporto tra la luce da coprire e l'altezza della trave sia prossimo a 16, quindi un'altezza dell'elemento di 180 cm.

Vi è poi da considerare il tipo di elemento che andiamo a costruire: per una trave da ponte è rilevante la quota di carico utile (sovraccarico permanente più carichi variabili), così che ritroveremo una sostanziosa differenza tra condizioni di tiro e di esercizio. In questi casi è bene che la forma della trave sia quanto più prossima a quella di un doppio T pressappoco simmetrico, quindi dal catalogo della ‘IANUS Prefabbricati’ la sagoma della serie ALFA ‘A 180 n 20’ che il costruttore, per un interasse quale quello in oggetto, consiglia per luci di circa 33 metri.

Si riportano le principali caratteristiche geometriche della sezione.



| | |
|------|--------------------------|
| Area | 5706 cm ² |
| Peso | 1427 kg/m |
| I | 22723480 cm ⁴ |
| Ws | 233537 cm ³ |
| Wi | 274774 cm ³ |

Analisi dei carichi e calcolo delle sollecitazioni

Note le dimensioni geometriche dell'elemento si può completare l'analisi dei carichi:

$$q_k = 15.8 \text{ kN} / \text{m}$$

$$g'_k = 5.25 \text{ kN} / \text{m}$$

$$g_k = 14.3 \text{ kN} / \text{m}$$

Possiamo allora determinare le sollecitazioni flettenti in condizione di tiro e di esercizio:

Progetto dello sforzo di precompressione N

$$M_{\min} = (g_k) \cdot L^2 / 8 = 1503 \text{ kNm}$$

$$M_{\max} = (g_k + g'_k + q_k) \cdot L^2 / 8 = 3716 \text{ kNm}$$

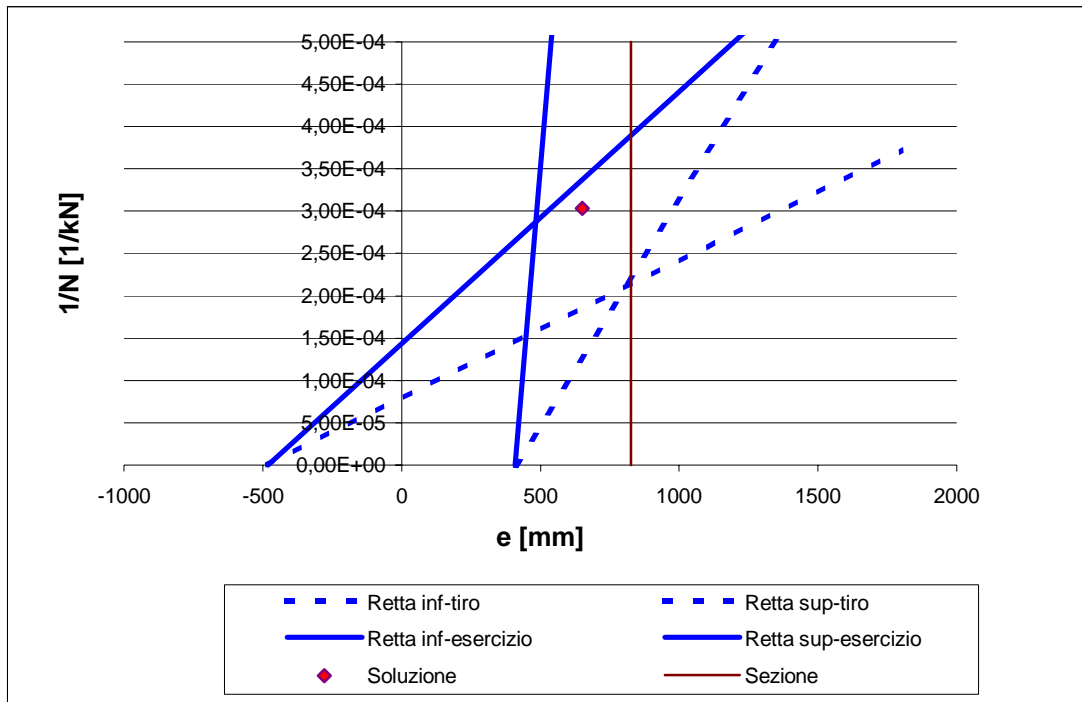
Lo sforzo di precompressione N deve essere tale da soddisfare le verifiche tensionali al lembo superiore ed inferiore in condizioni di tiro e di esercizio. Questa condizione, che analiticamente si traduce nella scrittura di quattro disequazioni (due per ogni condizione di carico), può esprimersi graficamente attraverso il diagramma di Magnel, che non rappresenta altro che le quattro disequazioni sul piano $(e, 1/N)$. Le disequazioni sono lineari in queste due variabili così che ne derivano quattro rette che identificano il dominio delle possibili coppie eccentricità-sforzo di precompressione. All'interno del dominio si è poi portati a massimizzare l'eccentricità per ridurre lo sforzo di precompressione richiesto, si sceglie:

- $N = 3300 \text{ kN}$

- $e = 650 \text{ mm}$

Si riportano i dati alla base del progetto e il grafico da cui si evince come la soluzione scelta ricada all'interno del dominio di ammissibilità delle combinazioni eccentricità-sforzo normale.

| | |
|----------------|---------------------------|
| β | 1,3 |
| A | 570600 mm ² |
| W_i | 274774000 mm ³ |
| W_s | 233537000 mm ³ |
| σ_{c0} | 23,5 N/mm ² |
| σ_{c0t} | -4 N/mm ² |
| σ_{c1} | 14,8 N/mm ² |
| σ_{c1t} | -1,3 N/mm ² |



A conferma della bontà della progettazione si riporta una prima verifica:

$$\frac{\beta \cdot N}{A} + \frac{\beta \cdot N \cdot e}{W_i} - \frac{M_{\min}}{W_i} = 12.2 N / mm^2 < \bar{\sigma}_{c0}$$

$$\frac{\beta \cdot N}{A} - \frac{\beta \cdot N \cdot e}{W_s} + \frac{M_{\min}}{W_s} = 2.0 N / mm^2 > \bar{\sigma}_{c0t}$$

$$\frac{N}{A} + \frac{N \cdot e}{W_i} - \frac{M_{\max}}{W_i} = 0.1 N / mm^2 > \bar{\sigma}_{ct}$$

$$\frac{N}{A} - \frac{N \cdot e}{W_s} + \frac{M_{\max}}{W_s} = 12.5 N / mm^2 < \bar{\sigma}_c$$

Scelta e disposizione dei cavi

Fuso di Guyon

Il fuso di Guyon costituisce il dominio di ammissibilità della posizione del cavo equivalente, combinazione del nocciolo limite della sezione (funzione di N) e dei diagrammi del momento. Si calcolano preliminarmente i valori di e_0 ed e_1 , estremi del nocciolo limite rispettivamente verso il basso e verso l'alto:

$$\bar{\sigma}_{0m} = \frac{|\bar{\sigma}_{c0t}| + |\bar{\sigma}_{c0}|}{h} \cdot y_s - |\bar{\sigma}_{c0t}| = 10.9 N / mm^2$$

$$\bar{\sigma}_m = \frac{|\bar{\sigma}_{ct}| + |\bar{\sigma}_c|}{h} \cdot y_i - |\bar{\sigma}_{ct}| = 6.1 N / mm^2$$

$$\sigma_{0m} = \frac{\beta \cdot N}{A} = 7.5 N / mm^2 < \bar{\sigma}_{0m} \rightarrow e_0 = e_{ni} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_{c0t}}{\sigma_{0m}} \right) = \frac{W_s}{A} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_{c0t}}{\sigma_{0m}} \right) = 627 mm$$

$$\sigma_m = \frac{N}{A} = 5.8 N / mm^2 < \bar{\sigma}_m \rightarrow e_1 = e_{ns} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_{ct}}{\sigma_m} \right) = \frac{W_s}{A} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_{ct}}{\sigma_m} \right) = 590 mm$$

Note le dimensioni del nocciolo limite possiamo tracciare il fuso di Guyon note che siano le distanze d_0 e d_1 del cavo risultante dal centro di pressione, funzione del momento flettente secondo le espressioni:

$$d_0(z) = \frac{M_{\min}(z)}{\beta N} ; d_1(z) = \frac{M_{\max}(z)}{N}$$

| z [cm] | $e_0(z)$ [cm] | $e_1(z)$ [cm] |
|-----------|------------------|------------------|
| 0 | 63 | 59 |
| 100 | 67 | 45 |
| 200 | 72 | 32 |
| 300 | 76 | 21 |
| 400 | 79 | 10 |
| 500 | 83 | 0 |
| 600 | 86 | -9 |
| 700 | 88 | -17 |
| 800 | 91 | -23 |
| 900 | 93 | -29 |
| 1000 | 94 | -34 |
| 1100 | 96 | -38 |
| 1200 | 97 | -41 |
| 1300 | 97 | -43 |
| 1400 | 98 | -44 |
| 1500 | 98 | -44 |
| 1600 | 97 | -43 |
| 1700 | 97 | -41 |
| 1800 | 96 | -38 |
| 1900 | 94 | -34 |
| 2000 | 93 | -29 |
| 2100 | 91 | -23 |
| 2200 | 88 | -17 |
| 2300 | 86 | -9 |
| 2400 | 83 | 0 |
| 2500 | 79 | 10 |
| 2600 | 76 | 21 |
| 2700 | 72 | 32 |
| 2800 | 67 | 45 |
| 2900 | 63 | 59 |

Per la lettura della tabella si ricorda che si intende e_0 positivo se verso il basso ed e_1 positivo se verso l'alto

Scelta dei cavi

Si deve ora decidere come realizzare lo sforzo di precompressione progettato avvalendosi dei dati riportati sul prontuario del Sistema Morandi, come già anticipato. Il sistema prevede cavi con diversa portanza secondo il modulo di 4 trefoli da 1/2"; si cercherà quindi la combinazione di cavi in grado di realizzare, in condizioni di tiro, lo sforzo bN , per poi controllare in fase di verifica, scontate le perdite per effetti lenti ed istantanei, l' idoneità dello sforzo normale N nella sezione di mezzeria. Si seguirà la raccomandazione del prontuario di cui sopra di utilizzare una tensione iniziale ridotta a 1200 N/mm^2 , non tanto per ragioni di sicurezza quanto per la possibilità di allentare e ritesare il cavo in caso di difficoltà, operazione non più garantita in presenza di sollecitazioni iniziali troppo elevate.

Atteso lo sforzo di progetto $bN=4290 \text{ kN}$ si opta per la seguente composizione del cavo risultante:

| n | Tipo | portata u. (kN) | portata (kN) | Area foro (mm ²) |
|---------|-------|--------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1 | M5/16 | 1784 | 1784 | 4190 |
| 2 | M5/12 | 1338 | 2676 | 3210 |
| Portata | | | 4460 | 10610 |

Data l'area del foro inferiore al 2% di quella della sezione si sceglie di avvalersi della possibilità prevista dalla normativa di trascurare questa detrazione e di considerare l'area totale di calcestruzzo.

Riportiamo allora l'andamento dei tre cavi lungo la membratura fornendone la distanza dal bordo inferiore ogni 200 cm, unitamente all'eccentricità del cavo risultante, supposta positiva verso il basso. Il confronto dei valori dell'eccentricità riportati con quelli calcolati in precedenza per il dominio limite conferma la buona disposizione dei cavi e il mantenimento del cavo risultante all'interno del fuso di Guyon.

| z (cm) | Cavo 1 M5/16 (cm) | Cavo 2 M5/12 (cm) | Cavo 3 M5/12 (cm) | e (cm) |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| 0 | 119 | 73 | 31 | 3,9 |
| 200 | 88 | 52 | 28 | 23,5 |
| 400 | 64 | 40 | 25 | 37,6 |
| 600 | 51 | 29 | 22 | 47,0 |
| 800 | 40 | 19 | 19 | 55,3 |
| 1000 | 35 | 16 | 16 | 59,1 |
| 1200 | 32 | 13 | 13 | 62,1 |
| 1450 | 29 | 10 | 10 | 65,1 |
| 1700 | 32 | 13 | 13 | 62,1 |
| 1900 | 35 | 16 | 16 | 59,1 |
| 2100 | 40 | 19 | 19 | 55,3 |
| 2300 | 51 | 29 | 22 | 47,0 |
| 2500 | 64 | 40 | 25 | 37,6 |
| 2700 | 88 | 52 | 28 | 23,5 |
| 2900 | 119 | 73 | 31 | 3,9 |

Calcolo delle cadute di tensione

Generalità

Finora abbiamo considerato il rapporto tra sforzo di precompressione iniziale e finale pari al coefficiente b e supposto, sulla base della pratica evidenza, pari a 1.3.

Per effettuare la verifica della membratura occorre però valutare accuratamente quali siano le perdite di tensione sul cavo, così da stimare correttamente i valori N ed N_0 . Lo sforzo iniziale coincide con quello trasmesso dai martinetti, e ci occorre per la verifica del cavo e delle testate in tiro; questo valore lo conosciamo, perché è appunto quello che abbiamo progettato e che comunichiamo a chi effettuerà la precompressione, ed il suo valore è 4460 kN. In merito all'azione iniziale va detto che il sistema Morandi prevede in ogni caso la tesatura per fasi successive, così da annullare gli effetti della tesatura del singolo cavo sugli altri, inoltre il sistema di misura della tensione adottato è tale da fornire la forza effettiva nel cavo, così che non sarà necessario calcolare le perdite per rientro degli ancoraggi. In definitiva, chi si occupa della precompressione ci assicura l'applicazione di N_0 in testata.