NUMERO: 1749A - ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Fiorello Silvia

MATERIA: Esercizi - Progetto delle strutture in CA e CAP.1 - prof. Giordano

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI

TEORIA E PROGETTO DELLE STRUTTURE IN

CA e CAP

Esercizi in aula ed esercitazioni individuali

Docente relatore del corso:
Prof. L. Giordano

Esercitatore: G. Bertagnoli

a.a. 2013-2014

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 96

PROGETTAZIONE DI UN SOLAIO IN CEMENTO ARMATO

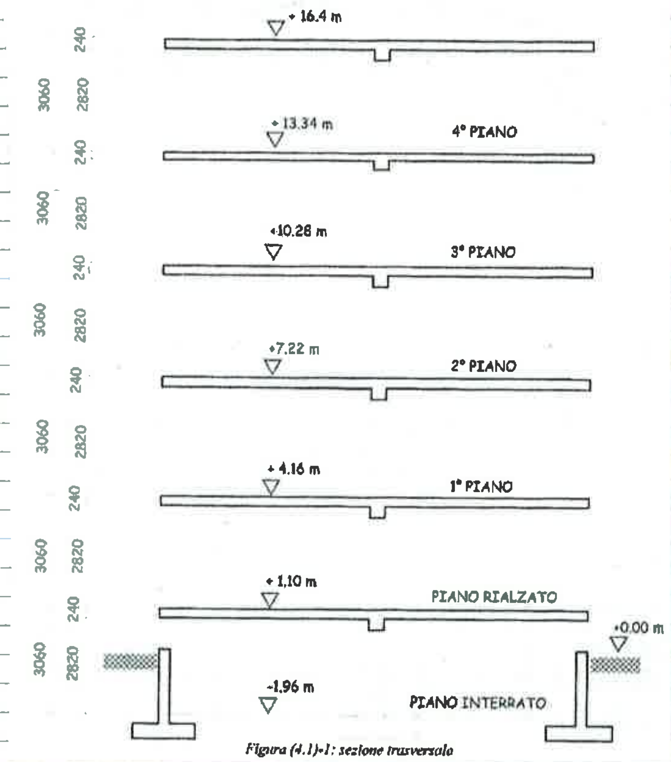


Figura (4.1)-1: sezione trasversale

L'altezza utile è di 270 cm ma stiamo quotando in grezzo quindi ho un'altezza quotata di 282 cm (sarebbe meglio farla di 285 cm).
I solai sono in direzione trasversale, le travi sono poste in direzione longitudinale e sono 3 (2 di bordo e una centrale)

Il solaio è spesso 240 mm = 24 cm
Meglio mettere sempre una caldana di 5 cm e non di 4 cm.

Figura (4.3)-3: solaio

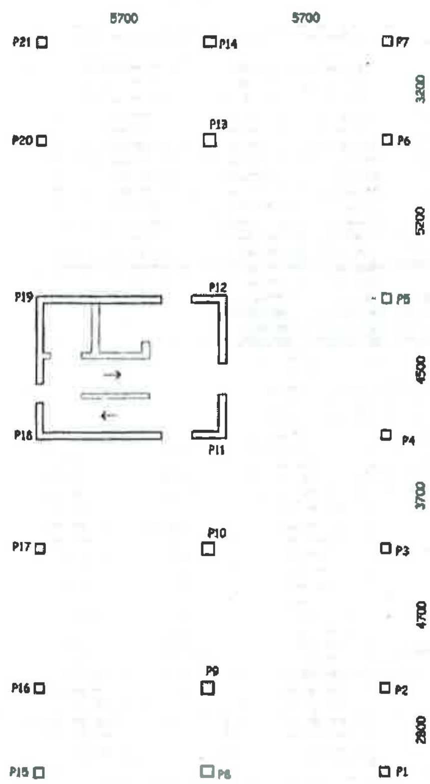


Figura (4.1)-2: pianta impalcato piano tipo

La manica va da P15 a P1.
Ho 3 file di pilastri e quindi 3 travi longitudinali.
La trave in mezzo porta più carico di quelle laterali perché è più iperstatica.
La trave centrale è fuori spessore perché appunto deve portare più carico.
L'alloggio non è in zona sismica, ma in zona sismica le travi sono tutte fuori spessore.

↳ CAMPO DI SOLAIO

Il solaio è una trave continua su 3 appoggi, 1 volta iperstatico

Figura (4.4)-1: schema a trave continua – combinazione di carico 1

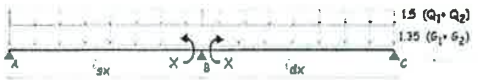


Figura (4.4)-2: risoluzione trave continua – combinazione di carico 1

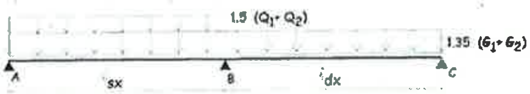
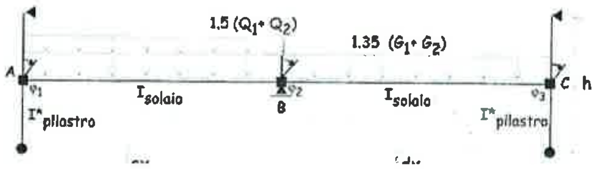
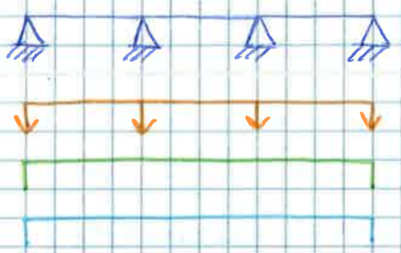


Figura (4.4)-3: schema a trave continua – combinazione di carico 2



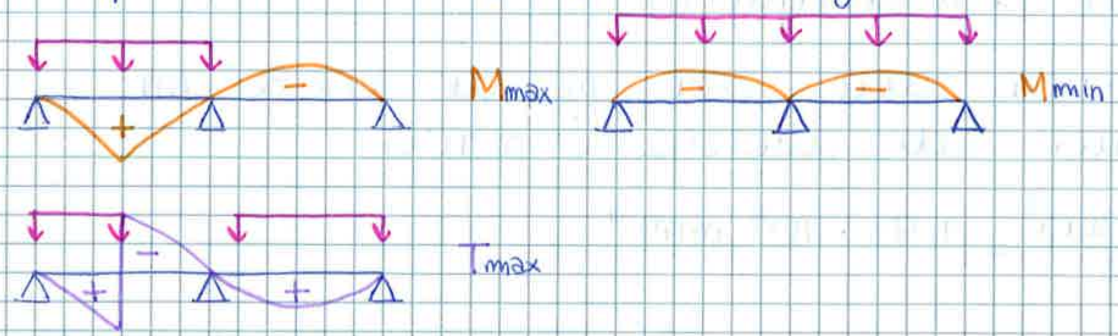
un esempio di solaio su 4 appoggi, 2 volte iperstatica:



g_1 → PESO PROPRIO DELLA STR (cemento armato + laterizio)
g_2 → PERMANENTI PORTATI (massetto...)
g_3 → TRAMEZZI

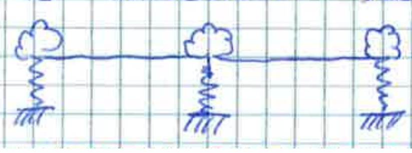
g_1 c'è sempre perché riguarda la struttura. g_2 e g_3 sono carichi permanenti che possono non esserci, per esempio degli alloggi non venduti sono ancora grezzi senza pavimento.
I carichi li posso considerare sempre presenti insieme, oppure posso considerare g_1 come fisso e $g_4 = g_2 + g_3$ lo considero come carico variabile che può essere presente solo in una campata.

Attraverso le linee di influenza individuano i punti in cui mettere i carichi variabili per massimizzare un dato effetto. Quindi avere un g_4 globalmente distribuito può funzionare bene per le linee di influenza di M, ma non per quelle di T. Ma poiché il momento flettente domina il progetto, si cerca la massimizzazione per M e si cerca di fare un calcolo più preciso per M rispetto a quello che si fa per il taglio T.

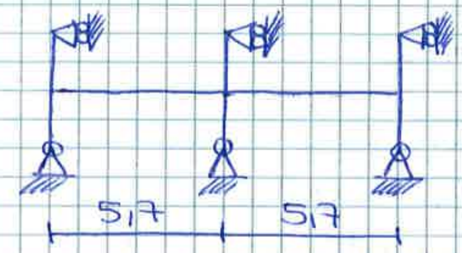


Nel caso da noi analizzato g_1 e g_4 vengono entrambi considerati come omogeneamente distribuiti.
In ogni campata devo eseguire delle sezioni distanziate di una distanza pari all'altezza della sezione stessa ($h = 25$ cm → in 1m ho 4 sez)
Per ogni sezione ho N, M, T. Quindi non posso sapere quale è la disposizione peggiore dei carichi per la mia struttura.

Noi abbiamo ipotizzato che la rigidezza torsionale della trave sia nulla, però nella realtà non è così, ho sempre un minimo di rigidezza. Se le travi ruotano, lo fanno anche i pilastri. L'effetto di richiamo torsionale sui pilastri diventa nullo se ipotizzo che sia nulla la rigidezza torsionale della trave.
Lo schema reale sarebbe



Lo schema con i pilastri fittizi è:



$\left.\begin{array}{l} 1/2 = 1,53 \\ 1/2 = 1,53 \end{array}\right\}$ $2,82 + 0,24 = 3,06\ m$

Lo deformabilità della trave varia con la luce al cubo. La luce del pilastro fittizio è $\sim 1/3$ di quella della trave
Questo schema è adottato principalmente in zona sismica.

Nel nostro esempio usiamo due carichi fissi $G_1 + G_2$ e due carichi variabili $Q_1 + Q_2$

G_1: peso proprio = 4,22 kN/m$_L$
G_2: mass + pav. + interno = 2 kN/m$_L$
Q_1: folla = 2 kN/m$_L$
Q_2: tramezzi = 1,9 kN/m$_L$
} per una striscia di solaio di 1m.

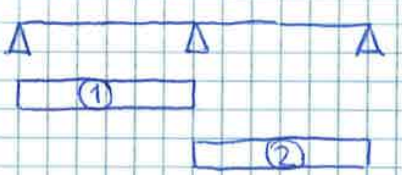
↑ dalle norme, in funzione del tipo di tramezzo so quanto vale il carico.

Quando fattorizzo i carichi per G_1 e G_2 uso $\gamma_G = 1/1,35$ mentre Q_1 e Q_2 hanno un $\gamma_Q = 0/1,5$

Creo un foglio EXCEL

X [m]	C1		C2		G1+G2		Q1+Q2 (C1)		Q1+Q2 (C2)	
	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V
0										
↓										
11,4										

↑ lunghezza del SOLAIO



} ho 2 casi di carico e per ognuno di questi ho taglio V e momento M.

Se avessi M, N, V l'interazione tra M ed N non è banale come quello tra M e V. le leggure M-N è più forte quindi devo per forza smorzare le 3 triplette.

vediamo come fare (MMAX): leggo cosa c'è scritto in (G_1+G_2) e in (Q_1+Q_2)

- se $M(G_1+G_2) > 0 \rightarrow 1{,}35\, M(G_1+G_2)$
  ELSE $1\, M(G_1+G_2)$

$+$

- se $M(Q_1+Q_2)_{C1} > 0 \rightarrow 1{,}5 \cdot M(Q_1+Q_2)$
  ELSE 0

$+$

- se $M(Q_1+Q_2)_{C2} > 0 \rightarrow 1{,}5 \cdot M(Q_1+Q_2)$
  ELSE 0

$M_{MAX} = \bullet + \Sigma_n \bullet$

1 per carico permanente

n: n° di campate

vediamo come fare (V(MMAX))

- se $M(G_1+G_2) > 0 \rightarrow 1{,}35 \cdot V(G_1+G_2)$
  ELSE $1\, V(G_1+G_2)$

$+$

- se $M(Q_1+Q_2)_{C1} > 0 \rightarrow 1{,}5 \cdot V(Q_1+Q_2)$
  ELSE 0

$+$

- se $M(Q_1+Q_2)_{C2} > 0 \rightarrow 1{,}5 \cdot V(Q_1+Q_2)$
  ELSE 0

stesso cosa vale per (VMAX) e (MVMAX)

superiore, il nodo lavora come un semplice appoggio Δ

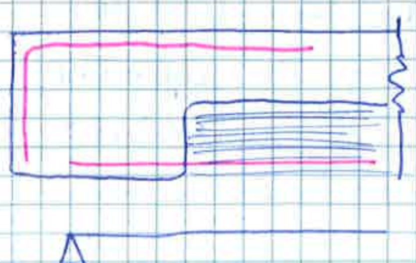
se metto armatura sia al positivo che negativo, l'armatura in negativo sarà in grado di portare momento flettente al nodo dato dalla combinazione 4.

L'incastro può anche non portare tutto il momento negativo della combinazione 4 a seconda di quanta armatura metto → avrò una soluzione di semi-incastro che equivale a qst schema:

↳ Ho quindi 3 possibilità che vanno tutte bene dal punto di vista della sicurezza, avrò però deformazioni differenti.

Affinché l'armatura al negativo riesca a portare M, deve essere ancorata alla piastra.
L'armatura al positivo ha meno bisogno di essere ancorata poiché il tiro massimo si ha verso la mezzaria, mentre il tiro massimo al negativo si ha nella sezione di incastro.

Nel travetto non ho un pilastro vero ma ho una trave di bordo. L'armatura negativa dovrà quindi piegarsi per ancorarsi portandosi il momento di incastro.



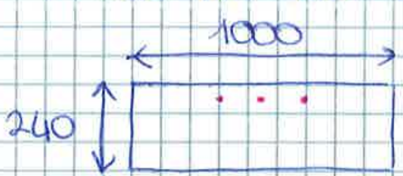
la normativa dice di prendere l'M max in campata, dividerlo per 4 e quel momento lo metto al negativo.

Nella sezione S è armatura è tesa sia inferiormente che superiormente perché il copriferro minimo è di 2,5 cm.

Vediamo ora come disporre le armature

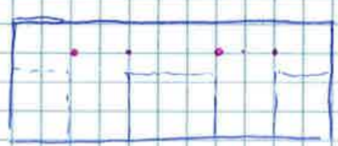
2-11

• SEZ. A: ho solo momento negativo, uso le tabelle di Montoya per la flessione e calcolo il ferro che mi serve in zona tesa.



Dalla tab. mi ricavo la area di armatura teorica e poi calcolo l'area di armatura reale che sarà maggiore di quella teorica.

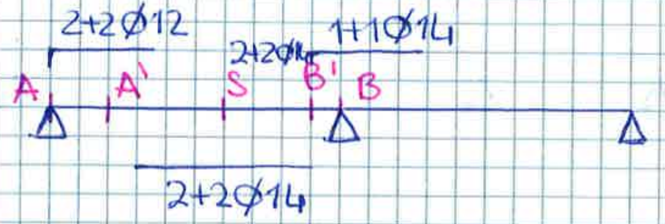
2+2 ϕ 12 : 2ϕ12 per un travetto, 2ϕ12 per l'altro, si mettono in corrispondenza delle nervature



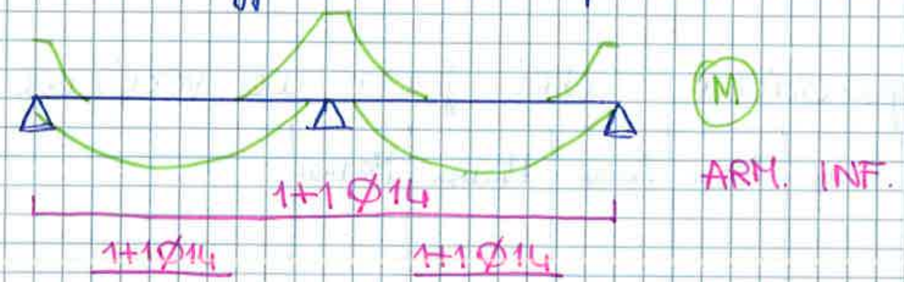
• SEZ S: 2+2ϕ 14

OSS È sempre meglio usare una coppia di barre per sicurezza.

Dopo aver calcolato le armature, vado sullo schema della trave



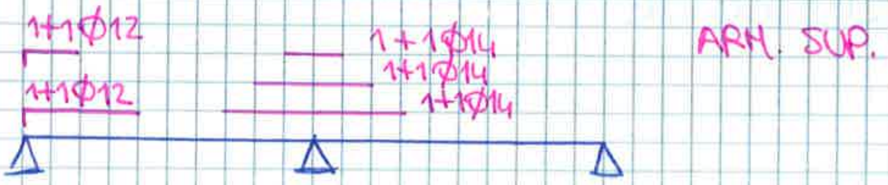
Guardo il diagramma di M. Ho M>0 quasi ovunque quindi dovrei mettere l'armatura tesa sotto ovunque tranne nei pressi di B ma nella norma c'è scritto che cmq lì devo mettere il 25% dell'armatura tesa. Quindi metto dappertutto 1+1 Ø14 e la rafforzo nei punti in cui ho M>0

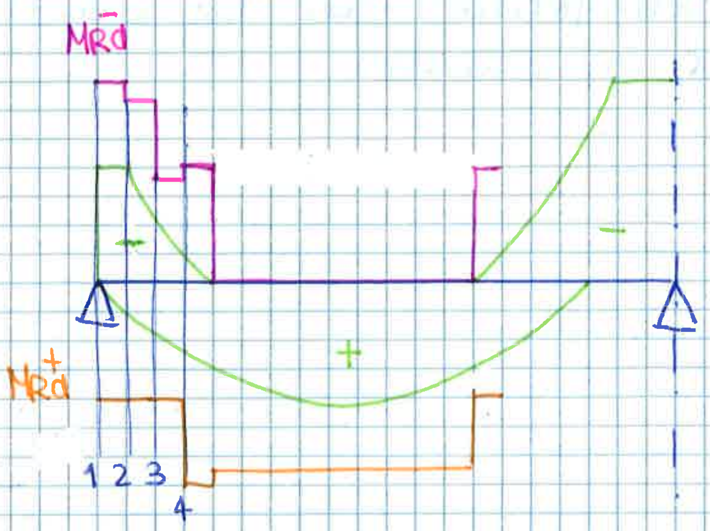


Questa è una delle soluzioni possibili.

NB cercare di fare spezzoni di armatura che siano multipli di 12.

Consideriamo ora l'armatura superiore. Mi servirebbero 3 ferri però di solito si usa un n° pari di ferri. Posso usare 3 ferri di lunghezze diverse.



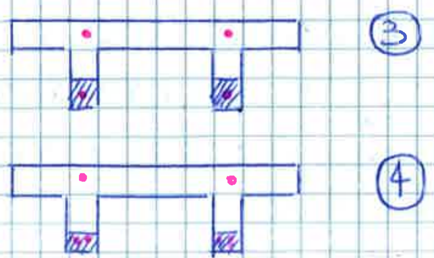


in sez ① ho 2 ferri tesi e un rettangolo compresso sotto, in ② non ho un rettangolo ma 2 rettangoli piccoli, l'AN si è alzato, e ridotto il braccio di leva interno → M_{Rd} è diminuito.

Nella ① ho un ferro teso sotto e tutta zona compressa, nella ② ho sempre ferro teso sotto e tutta zona compressa sup. largo quindi il braccio di leva non è cambiato nelle 2 sezioni → il M_{Rd}^{+} nelle 2 sez. è costante.

Nella sez 3 a T ho un ferro sotto e uno sopra. M_{Rd}^{-} sarà = a quello di ② ma con un ferro in meno → sarà ∼ alla metà. Al positivo invece ho sempre un ferro → M_{Rd}^{+} =.

La sez 4 ho 1 ferro al negativo e 2 al positivo. Però: la forza nell'armatura tesa è la stessa ma in 3 ho solo 1 ferro quindi per bilanciare mi serve più cls mentre nella 4, avendo 2 ferri, ho bisogno di meno cls compresso → M_{Rd}^{-} ↑ anche se di poco.



M_{Rd}^{+} raddoppia perché raddoppia l'armatura.

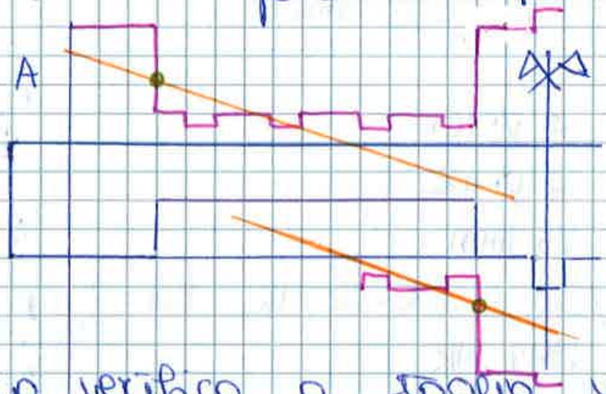
per esempio se ho un $2\phi 14$:

$\rho_L = \frac{2\phi 14}{100 \cdot 208} = 0{,}015 = 1{,}5\%$ ← qst va moltiplicato per 100.

$\rho_L = \frac{2\phi 12}{100 \cdot 208} = \frac{2 \cdot 6^2 \cdot \pi}{100 \cdot 208}$

la res a taglio va calcolata per ogni sezione in cui varia l'armatura.

bw è il parametro che fa cambiare la resistenza al taglio. ↑bw → ↑ Resistenza → Res > per le sez. rettangolari rispetto a quelle a T.



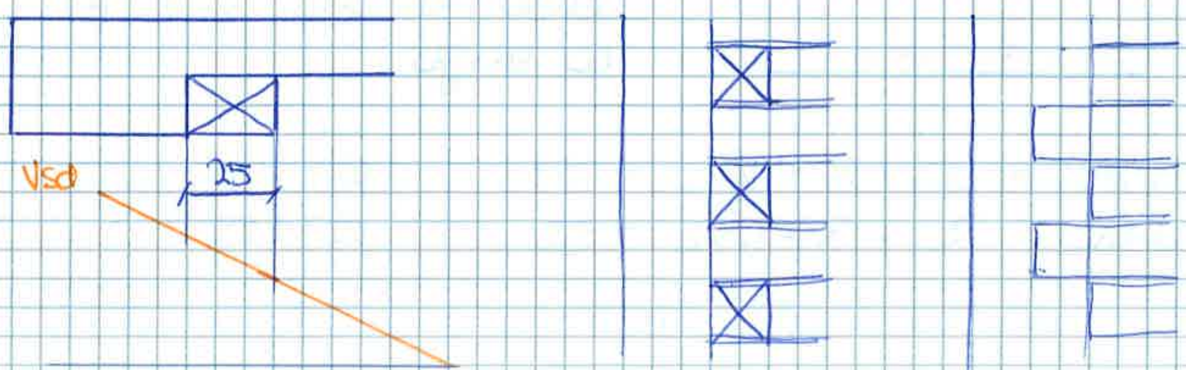
- PTO CRITICO
- taglio sollecitante
- " resistente

la verifica a taglio va fatta nei punti critici → ne ho solo 2. → dove cambio bw.

il taglio al negativo è simmetrico a quello al positivo.

Posso prendere 3 provvedimenti se Vsd > Vrd:

- ↑ ρ_L se la verifica è mancata di poco, aumento l'armatura.
- BLINDAGGIO DEL SOLAIO, cioè sposto la sezione critica togliendo una pignatta e riempiendola di cls. Tolgo una pignatta ogni due



M_{Rd} tende le fibre positive

$d(A_s) = 250 - 37 = 213$ mm
$d(A'_s) = 250 - 33 = 217$ mm
↑
distanze delle armature dai lembi opposti

① immagino che l'armatura compressa non ci sia e ci chiediamo dove cade l'AN.

$A_s = 4\phi 18 = 4 \cdot 9^2 \cdot \pi = 4 \cdot 81 \cdot 3{,}14 = 1017\ mm^2$

Posso usare le tab di Montoya: devo calcolare lo % mecc. di armatura ω:

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{1017 \cdot 391}{500 \cdot 213 \cdot 14{,}2} = 0{,}263$$

entro nella tab di Montoya con $\omega = 0{,}263$, ho il valore 0,260 e non 0,263.

$\xi = \frac{x}{d} \simeq 0{,}324$
↑
qst valore lo posso ottenere con le proporzioni con il valore di ξ per $\omega = 0{,}260$

$x = 0{,}324 \cdot 213 = 69$ mm

se NON ho armatura compressa, l'AN sarebbe al di sotto del lembo superiore di 69 mm quindi l'armatura sopra sarebbe in zona compressa e qst aiuta il cls.
In realtà x sarà più piccola → abbiamo trovato un limite superiore di x *
L'armatura sopra sarebbe inefficace se l'AN passasse esattamente per l'armatura (x = 33)
Il nostro AN vero sarà in mezzo ai 2 valori di x: $33 \leq x \leq 69$ (se ho $x < 33$ mm → entrambe le

* siccome ho armatura sp, mi serve meno cls compresso quindi l'AN sarà più alto (x sarebbe inferiore)

$T(A_s^1) = -248 \cdot 314 = -78$ kN (compresso)

$N_{Rd} = 398 - 293 - 78 = 27$ kN

↳ l'AN dovrò scendere di poco

(4) $X = \frac{51+69}{2} = 60$ mm

$C_{cls} = 0{,}81 \cdot 500 \cdot 60 \cdot 14{,}2 = 345$ kN

Qst AN è troppo profondo perché $C_c > T$

$T = A_s f_{yd} = 398$ kN

$\varepsilon(A_s^1) = \frac{3{,}5}{60} \cdot (60-33) = 1{,}58$ ‰

$\sigma'(A_s^1) = 1{,}58 \cdot 200 = 316$ MPa

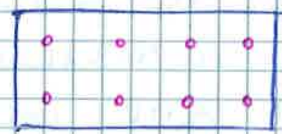
$T(A_s^1) = 316 \cdot 314 = 100$ kN

$N_{Rd} = 398 - 345 - 100 = -47$ kN

↳ trovo X e poi M_{Rd}.

M_{Rd} tende fibre negative

(1)



$4\phi 18 = A_s$

$4\phi 10 = A_s^1$

$A_s^1 = 314$ mm^2

$\omega(A_s^1) = \frac{314 \cdot 391}{500 \cdot 217 \cdot 14{,}2} = 0{,}079$

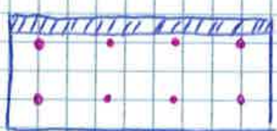
sulla tab. di Montoya ho $\omega = 0{,}074$ e $\omega = 0{,}095$

↳ $\xi = 0{,}091$ ↳ $\xi = 0{,}117$

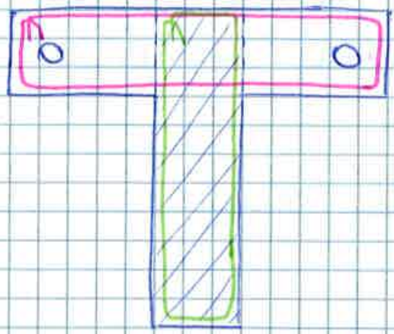
$$\left(\frac{X}{d}\right)_{0{,}079} = 0{,}091 + \frac{0{,}117 - 0{,}091}{0{,}095 - 0{,}074}(0{,}079 - 0{,}074) = 0{,}097$$

$X = 0{,}097 \cdot 217 = 21$ mm

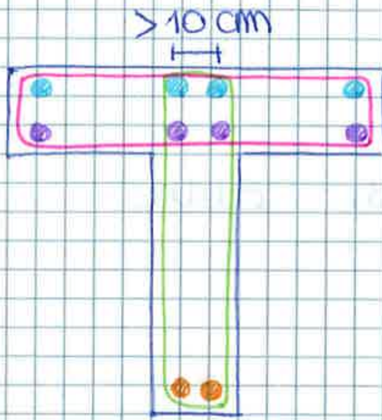
L'AN cade sopra l'armatura superiore che all'inizio non ho considerato → l'armatura è in zona tesa perché $d' = 37$ mm



se ho travi a T, solo la parte di anima porta il taglio (questo per convenzione). Si mettono

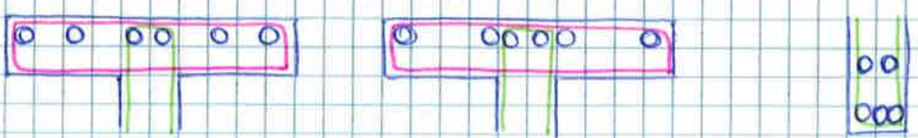


prima le staffe principali (verdi) che portano il taglio e poi quelle secondarie (rosa) che uniscono flangia ed anima (non rientrano nelle verifiche a taglio).
Si possono usare sia staffe aperte che chiuse.



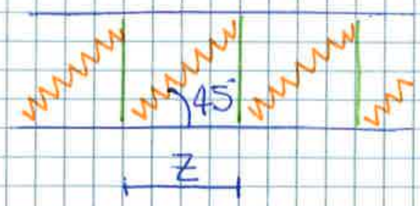
- ● armatura che metto a FLESSIONE
- ● armatura che metto a FLESSIONE per i momenti >0.
- ● lavorano male a flessione e vengono messi come puri ferri reggistaffa quindi sono di piccolo diametro (Ø 12 o Ø14)

Nel calcolo del momento devo considerare tutti i ferri, anche i reggistaffa (ho 3 livelli di armatura → 4 + 4 + 2)
Si progetta con i ferri ● e ● a flessione e poi si inseriscono i ferri ●.
Nell'anima della trave ci devono essere almeno 10 cm di interferro netto che servono ad inserire il vibratore.
Se devo inserire altri ferri, li inserisco nella flangia. Meglio usare meno ferri con Ø grandi che più ferri con Ø piccoli.



Sotto se non sono sufficienti 3 ferri se ne devono aggiungere altri. L'armatura longitudinale è sempre interna alle staffe, il copriferro quindi si riferisce sempre alle staffe.

Richiedere che $s \leq 0{,}75\, d$ equivale a chiedere che ci sia una staffa per ogni puntone inclinato.



$22° < \theta < 45°$

il criterio sul numero dei bracci è bene rispettarlo ma NON è essenziale, mentre il criterio sui passi è OBBLIGATORIO.

$\phi 8 \quad s = 150$ mm

questa è la staffatura minima che devo mettere.

Calcolo quindi il suo $V_{Rd,s}$ (taglio resistente lato acciaio):

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \, z \, f_{yd} \cdot \text{cotg}\,\theta =$$

$$= \frac{4 \cdot 4^2 \pi}{150} \cdot (0{,}9 \cdot 200) \cdot 391 \cdot \text{cotg}\,\theta =$$

$$= 94{,}3 \text{ kN} \cdot \text{cotg}\,\theta$$

Considero i due estremi di θ:

$\theta = 45° \rightarrow \text{cotg}\,\theta = 1 \rightarrow V_{Rd,s} = 94{,}3$ kN

$\theta = 22° \rightarrow \text{cotg}\,\theta = 2{,}5 \rightarrow V_{Rd,s} = 236$ kN

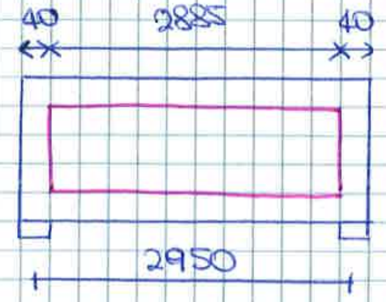
la resistenza lato cls è:

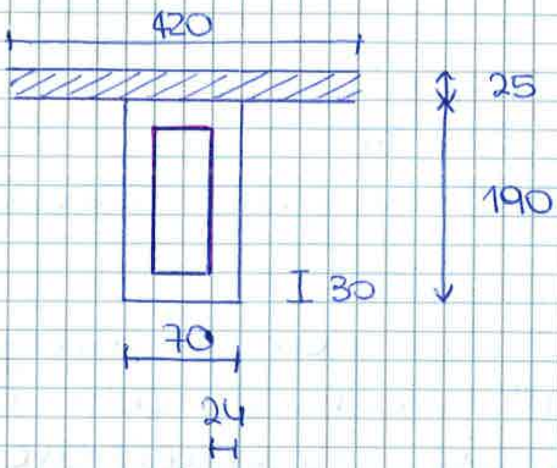
$$V_{Rd,c} = \underset{=1}{\alpha_{cw}} \cdot \underset{=750}{b_w} \cdot \underset{=(0{,}9 \cdot 200)}{z} \cdot \underset{= 0{,}6 \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)}_{0{,}9}}{\nu} \cdot f_{cd} / (\text{cotg}\,\theta + \text{tg}\,\theta)$$

$f_{ck} = 25$ MPa

$f_{cd} = 0{,}85 \cdot \frac{25}{1{,}5} = 14{,}2$ MPa

ESERCIZIO : PRECOMPRESSO





Lunghezza della trave è circa 30 m.
Su questa trave getto una soletta di cls.
L'interasse tra le travi è di 420 cm.
La trave viene compressa con pretensione, viene messa in opera, viene fatta la soletta e poi si esegue la post-tensione.
Considero una trave che cambia geometria durante la costruzione.

↳ MATERIALI

- Trave

  C 45/55
  $f_{ck} = 45$ MPa
  $f_{cm} = 45 + 8 = 53$ MPa
  $f_{ctm} = 3,8$ MPa (resistenza media a trazione)
  $f_{ctk} = 2,7$ MPa (resistenza caratteristica ")
  $E = 36283$ MPa

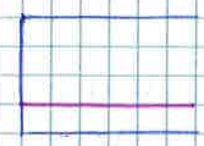
- Soletta

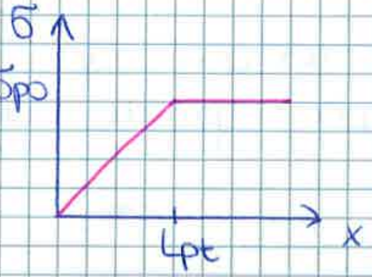
  C 25/30
  $f_{ck} = 25$ MPa
  $f_{cm} = 25 + 8 = 33$ MPa
  $f_{ctm} = 2,6$ MPa
  $f_{ctk} = 1,8$ MPa
  $E = 31476$ MPa

- Acciaio da precompressione

  $f_{tk} = 1860$ MPa (resistenza a rottura caratteristica)
  $f_{p0,1k} = 1570$ MPa
  $E = 196000$ MPa

1) Struttura costituita dalla sola trave, sto tagliando i trefoli di precompressione (azioni g1). La trave è soggetta ad una pretensione con trefoli di 0,6" con un area di 139 mm².





Quando taglio il trefolo, non ho subito σpo che è la tensione al martinetto, ma σpo viene raggiunto e mantenuto costante dopo una lunghezza di trasmissione Lpt. Il trefolo man mano che entra nella trave acquisisce tensione perché per aderenza, diminuisce lo scorrimento del cavo, contemporaneamente il cls acquisisce compressione.

Lpt usando le formule dell'EC2 è definito:

$L_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{po} / f_{bpt}$

coeff. che tiene conto del tipo di rilascio

tiene conto del tipo di acciaio da precompressione che sto considerando

diametro nominale

α_1: 1 → per rilascio graduale; 1,25 → " " istantaneo

α_2: 0,19 → se ho un trefolo; 0,25 → se ho una barra

$\phi = 0{,}6" \cdot 25{,}4 = 15{,}24$ mm

$\sigma_{po} \leq \min(0{,}8 \cdot f_{pk} ; 0{,}9 \cdot f_{p01k}) = \min(1488 ; 1413)$

tensione del trefolo subito dopo il rilascio

$\sigma_{po} = 1400$ MPa

$$L_{DISP} = \sqrt{L_{pt}^2 + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{altezza utile della trave}}}{d^2}} = \sqrt{704^2 + (1900-70)^2} = 1960 \text{ mm}$$

considero barre poste a 70 mm dall'intradosso.

valutiamo le tensioni nella trave al momento di rilascio dei trefoli

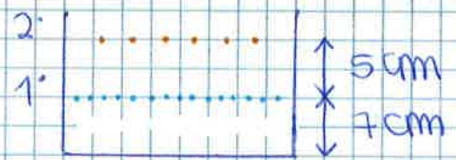
considero una sezione ad $L/2 = 14,75$ m
calcolo quindi la tensione della precompressione usando il metodo di colonnetti:

$$\lambda = \frac{E_{sp}}{A_c\, E_c} \sum_{i=1}^{n} \bar{\varepsilon}_i \cdot A_i = \frac{196\,000}{1,044 \cdot 36283} \cdot \left(-\frac{1400}{196000}\right) \cdot \Sigma A_i$$

predeformazione
tutti i trefoli sono tesati a 1400 MPa
posso quindi portarla fuori dalla sommatoria

per calcolare ΣA_i devo ipotizzare un numero di trefoli. Scelgo di mettere 2 livelli di trefoli:

1. 7 cm dall'intradosso → 12 trefoli
2. 5 cm dal primo livello → 6 trefoli



$$\left.\begin{matrix} \to 6 \cdot 139 \cdot 10^{-6} + \\ \to 12 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \end{matrix}\right\} = \Sigma A_i$$

$\lambda = -9,247\,E\text{-}5$

$$\mu = \frac{E_{sp}}{J_c \cdot E_c} \sum_{i=1}^{n} \bar{\varepsilon}_i \cdot A_i \cdot (Y_G - Y_i) = \frac{196000}{0,3598 \cdot 36283} \cdot \left(-\frac{1400}{196000}\right) \cdot$$

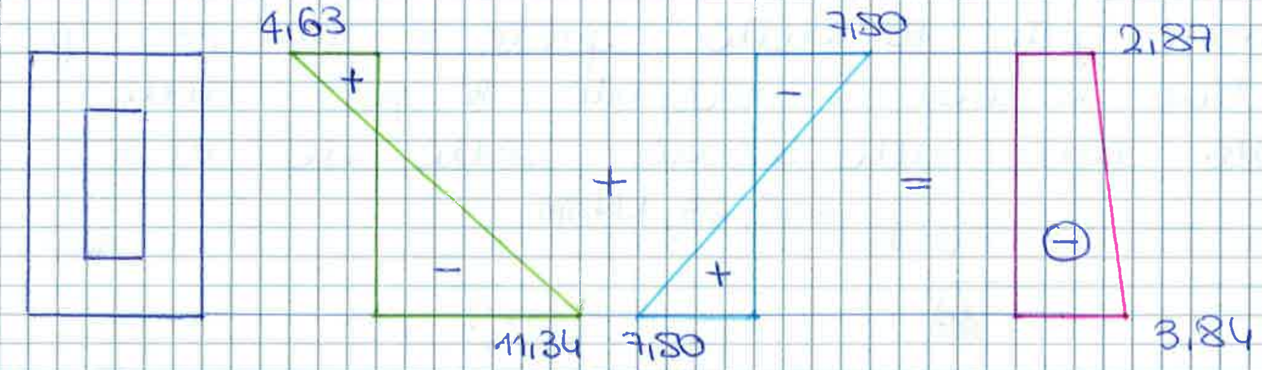
$$\cdot \left(12 \cdot 139E\text{-}6 \cdot (0,95 - 0,07) + 6 \cdot 139E\text{-}6 \cdot (0,95 - (0,07 + 0,05))\right)$$

$= -2,316\,E\text{-}4$ 1/m (curvatura)

gioco il peso proprio. Quindi lo stato tensionale totale è dovuto all'effetto della precompressione più quello del peso proprio.

Il momento dovuto al peso proprio vale:
$M_{g1} = 2839,2$ KNm

$\sigma_c = \frac{M}{J} \cdot (y_G - y)$ → per $y = 1,90$m → $-7,50$ MPa
→ per $y = 0,00$m → $7,50$ MPa



M_{g1} provoca una variazione di tensione nei trefoli che sono aderenti al cls. Questa varrà:

$\sigma_{sp} = \frac{M}{J} \cdot (y_G - y) \cdot E_{sp}/E_{G,TR}$ = → $y = 0,12$m → $\sigma_{sp} = 35,38$ MPa
→ $y = 0,07$m → $\sigma_{sp} = 37,51$ MPa

↑ coeff. di omogeneizzazione

La variazione di tensione nei trefoli dovuta ai carichi applicati è trascurabile perché la tensione di precompressione è ~ 1340 MPa, quella per il peso proprio vale ~ 35 MPa.

Questo è tutto ciò che avviene per $x = L/2$. Se cambio sezione, per esempio per $x \to 0$, M_g diminuisce, si modifica lo stato tensionale per peso proprio mentre quello per precompressione resta uguale. Se per assurdo andassi a considerare la sezione con $x = 0$, avrei solo precompressione e la struttura si fessura all'estradosso. Per diminuire la tensione all'estremità posso fare un inguainamento avendo con solo 6 cavi e non 6+6.

Questa è la situazione che ho alla fine della costruzione della struttura

Posso trovare le tensioni nei trefoli pari a quella precedente più il $\Delta\sigma$ dovuto al peso g_2.

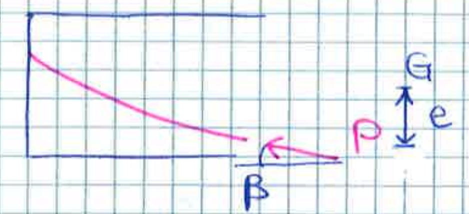
$$\sigma_{sp} \begin{cases} \nearrow 1415 \text{ MPa} & \text{per } y = 0{,}12 \text{ m} \\ \searrow 1417 \text{ MPa} & \text{per } y = 0{,}07 \text{ m} \end{cases}$$

Fin'ora ho analizzato la sezione in mezzeria ora vediamo cosa accade per le altre sezioni:

X	σ_c	
	$y = 1,90$	$y = 0$
$L_{pT} = 0,563$	3,50	−10,21
3,50	−1,66	−5,05
7	−6,26	−0,45
10	−9,19	2,45
14,75	−10,41	3,70

La resistenza a trazione media della trave di cls è di 3,8 MPa, sono arrivata al limite della resistenza a trazione, cioè la mia trave è non fessurata. Mi sono avvicinato al limite nella sezione di mezzeria ($x = 14,75$) lato intradosso, ($\sigma_c = 3,70$) che nella sezione iniziale lato estradosso ($\sigma_c = 3,50$). Ho bilanciato i cavi in modo da avere in ogni sezione una resistenza a trazione inferiore a 3,8 MPa.

Da questo punto in avanti la sezione si comporta come trave + soletta.



Per ogni sezione ho noto il tiro P.

$N_P = -P \cdot \cos\beta$

↑ ho il segno meno perché è di compressione

$V_P = P \cdot \operatorname{sen}\beta$

$M_P = N_P \cdot e$

↑ eccentricità rispetto al baricentro della sezione di cls o della sezione omogeneizzata.

Il tiro P ad $x = 14{,}75$ m vale:

$P = \underbrace{1325{,}7}_{\sigma_P} \cdot 2 \cdot 12 \cdot 150 / 1000 = +4772$ kN

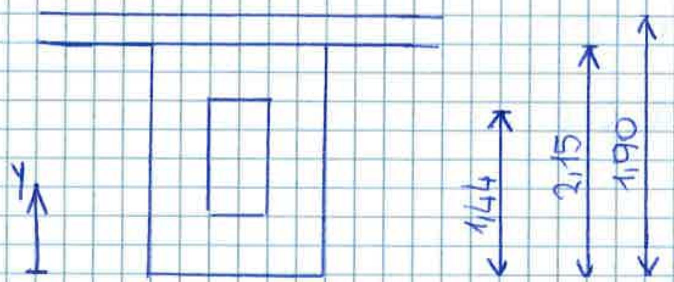
↑ NR CAVI ↑ Ø ↑ area dei trefoli [mm²]

$N_P = -4772 \cdot \cos 0 = -4772$ kN

$V_P = 4772 \cdot \operatorname{sen} 0 = 0$ kN

$M_P = -4772 \cdot (1{,}44 - 0{,}20) = -5917$ kN

↑ baricentro della sezione trave + soletta.



Noti N_P, V_P, M_P, calcolo le variazioni di tensioni dovute all'applicazione di N_P, V_P, M_P:

$$\Delta\sigma_c = n \left(\frac{N_P}{A} + \frac{M_P}{J}(Y_G - Y) \right)$$

↑ coefficiente di omogeneizzazione. Sto considerando 2 cls diversi, uno della trave e uno della soletta.

$A = 1{,}955$ m² $J = 0{,}9086$ m⁴ $Y_G = 1{,}44$ m

Aggiungo ora i permanenti portati:

$g_3 = 39,9$ KN/m $\rightarrow$ $M_{g3} = 4340,4$ KNm

$\sigma_c =$
- $1,90 - 2,94 = -1,04$ MPa $y = 2,15$ m
- $0,48 - 1,91 = -1,43$ MPa $y = 1,90$ m SOL
- $-9,85 - 2,20 = -12,05$ MPa $y = 1,90$ m TR
- $-8,12 + 6,88 = -1,24$ MPa $y = 0$ m

$$\sigma_c = n \cdot \left(\frac{N_P}{A} + \frac{M_P}{J} (y_G - y) \right)$$

$\sigma_P =$
- 1390 MPa $y = 0,12$ m
- 1391 MPa $y = 0,07$ m

} PRETENSIONE

I cavi cambiano tensione se la guaina è già stato iniettato, se non lo è, la tensione nei cavi è sempre la stessa perchè non ho aderenza tra acciaio e cls.

$\sigma_P = 1325,7$ POST-TENSIONE

A favore di sicurezza considero che l'iniezione avvenga dopo l'inserimento dei permanenti portati. Per quanto riguarda i cavi post-tesi σ_P continuano ad essere pari a 1325,7 MPa.

Lo stato tensionale disegnato prima corrisponde alla combinazione quasi permanente delle azioni al tempo iniziale, mi mancano solo da applicare i carichi variabili. Mi sto riferendo al tempo t_0 di precompressione quindi non ho ancora tenuto conto delle cadute di precompressione.

Nella combinazione quasi permanente delle azioni dovrei verificare che la tensione nel cls σ_c, risulta minore o uguale di $0,45\ f_{ck}$

$\sigma_c \leq 0,45\ f_{ck}$
- $= 20,25$ MPa $\rightarrow$ trave
- $= 11,25$ MPa $\rightarrow$ soletta

scrivo i risultati in funzione dell'ascissa

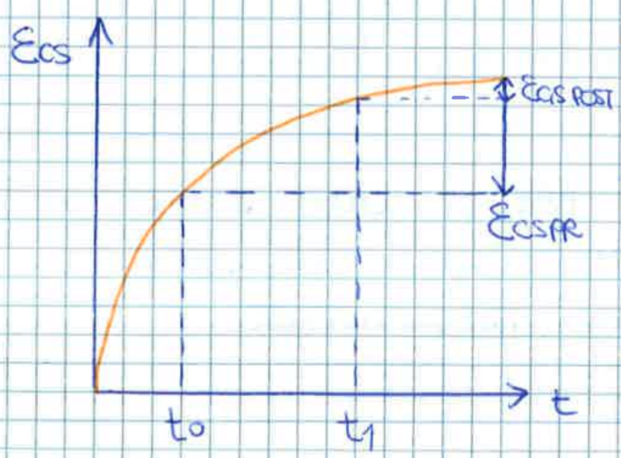
↳ COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE

X	NEI CAVI POST TESI σ_p	σ_c			
		Y = 2,15	Y = 1,90 S	Y = 1,90 T	Y = 0
Lpt = 0,563	1304	-0,5	-1,05	2,29	-16,26
3,50	1322	-0,47	-1,05	-2,87	-11,30
7,00	1343	-0,63	-1,17	-7,60	-6,46
10,00	1340	-0,91	-1,34	-10,71	-2,90
L/2 = 14,75	1325	-1,04	-1,43	-12,05	-1,24

↳ COMBINAZIONE CARATTERISTICA

X	σ_c			
	Y = 2,15	Y = 1,90 S	Y = 1,90 T	Y = 0
0,563	-0,61	-1,12	2,20	-15,99
3,50	-1,12	-1,47	-3,35	-9,78
7,00	-1,76	-1,89	-8,44	-3,84
10,00	-2,33	-2,26	-11,77	0,42
14,75	-2,59	-2,43	-13,21	2,38

$$\Delta\sigma_{p\,C+S+R} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_{sp} + 0{,}8 \cdot \Delta\sigma_{p,RIL} + E_{sp}/E_{cm} \cdot \varphi(t,t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_{sp}}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c}\left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right)\left(1 + 0{,}8 \cdot \varphi(t,t_0)\right)}$$



← andamento del ritiro nel tempo

t_0: metto la precompressione

t_1: metto la post-tensione

Pretensione → $\sigma_{sp} = 1390$ MPa
Post-tensione → $\sigma_{sp} = 1326$ MPa

Ipotizzo una classe di rilassamento 2:
$\rho_{1000} = 2,5\%$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{sp}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

$\mu = \frac{\sigma_{sp}}{f_{pk}} =$ → 0,747 pretensione ; → 0,713 post-tensione

$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{sp}} =$ → 0,0483 pretensione ; → 0,0413 post-tensione

$\Delta\sigma_{p,r} =$ → 67,14 pretensione ; → 54,71 post-tensione

Interpolando linearmente i valori di σ_c tra $y = 1,90$ e $y = 0$ ottengo i valori che mi interessano

z_{cp}: distanza del cavo dalla sezione
$z_{cp} = 1,44 - 0,07$
↑
baricentro della sezione trave + soletta

$\sigma_{c,qp}$: tensione nella combinazione quasi permanente a livello del cavo.

$\sigma_{c,qp} = 1,64$ MPa

Ap: area di precompressione totale

$A_p = (12+6) \cdot 139 + 2 \cdot 12 \cdot 150 = 6102$ mm^2

$\sigma_c(\infty;\ \text{caratt.}) = $

$-2{,}59 - 0{,}32 = -2{,}92$ $\quad y = 2{,}15$

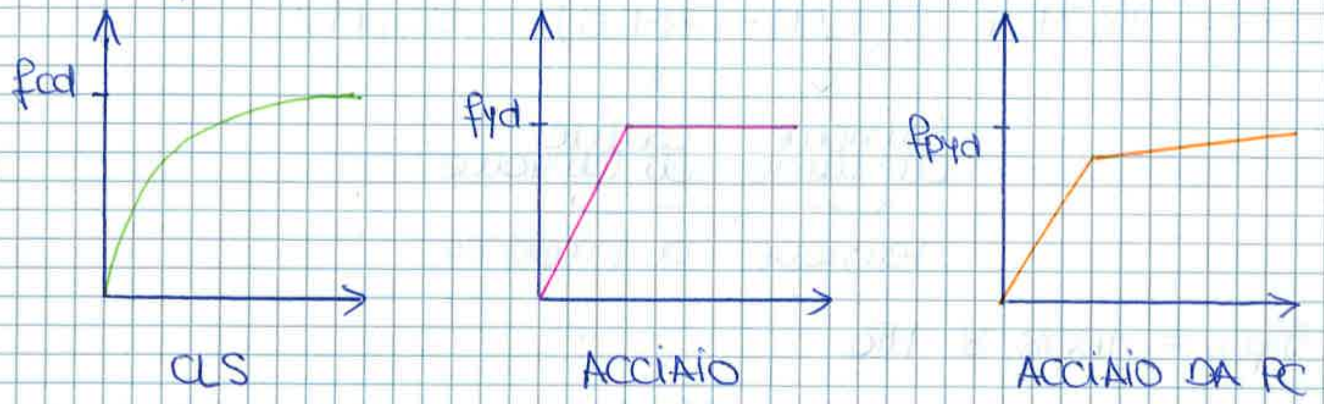
$-2{,}43 - 0{,}09 = -2{,}52$ $\quad y = 1{,}90\ S$

$-13{,}21 - 0{,}10 = -13{,}31$ $\quad y = 1{,}90\ T$

$2{,}38 + 2{,}38 = 4{,}72$ $\quad y = 0$

$4{,}72 > f_{ctm}$ della trave che è pari a 3,8.
La trave a tempo ∞ si fessura. Devo fare le verifiche di fessurazione e valutare l'ampiezza della fessura

Le leggi costitutive sono:



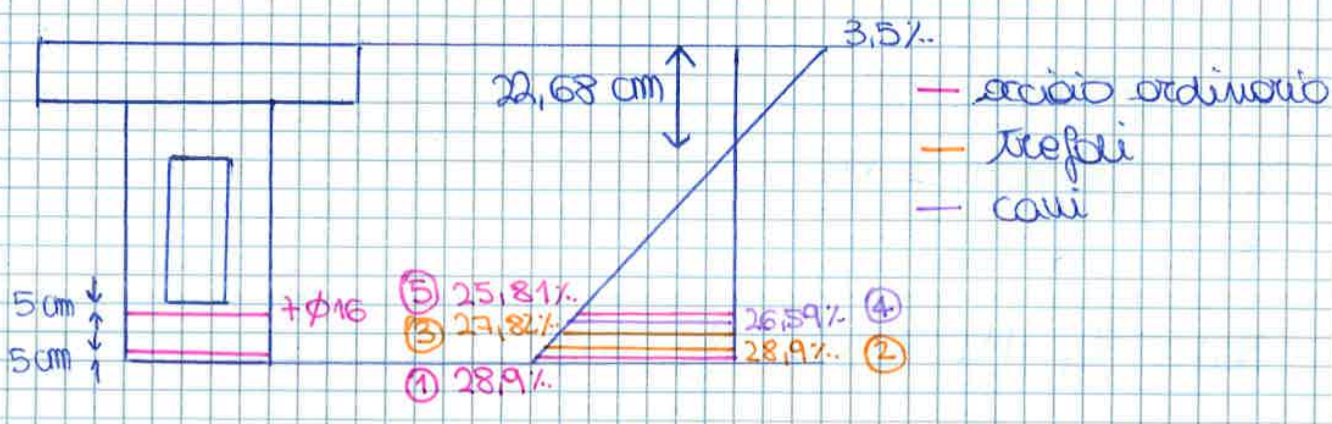
f_{cd} < 14,17 MPa (soletta) / 25,5 MPa (trave)

B450 C → $f_{yd} = 391$ MPa

$f_{p01d} = 1365$ MPa

$f_{pd} = 1617$ MPa

Quando faccio le verifiche allo SLU non considero le modalità costruttive.
Considero la sezione trave + soletta



$M_{Rd} = 20768 \text{ kNm}$

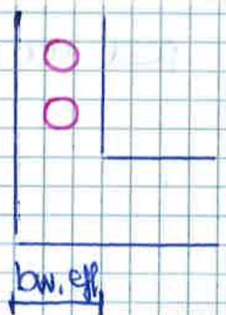
M_{Rd} va confrontato con M_{sd}:

$$M_{sd} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q =$$
$$= 1{,}3\,(\underbrace{2839{,}14}_{\text{PP trave}} + \underbrace{2855{,}51}_{\text{PP soletta}}) + 1{,}5 \cdot \underbrace{4340{,}38}_{\text{terreno}} + 1{,}5 \cdot \underbrace{2284{,}4}_{\text{neve}} =$$
$$= 17340 < M_{Rd} \rightarrow \text{ok}$$

$$V_{sd} = \left(1{,}3 \cdot (26{,}1 + 26{,}25) + 1{,}5\,(\overset{\text{terreno}}{39{,}9}) + 1{,}5 \cdot \overset{\text{neve}}{21}\right) \cdot \underbrace{\frac{29{,}5}{2}}_{\text{luce}} - \underbrace{546}_{\text{taglio dovuto alla PC: } V_P} = 1805{,}2 \text{ kN}$$

$$V_P = \sigma_P\, A_P \cdot \operatorname{sen}\beta = 1147 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 150 \cdot \operatorname{sen}(7{,}6) \cdot 10^{-3} = 546 \text{ kN}$$

$V_{Rd,c} = 555 \text{ kN}$



$$b_w = b_{w\,eff} - 0{,}5 \cdot \Sigma\phi = 2 \cdot (24 - 0{,}5 \cdot 0{,}8) = 40 \text{ cm}$$

$V_{Rd,max} = 4782 \text{ kN} > V_{sd}$ $\quad(\cot\theta \le 2{,}5)$

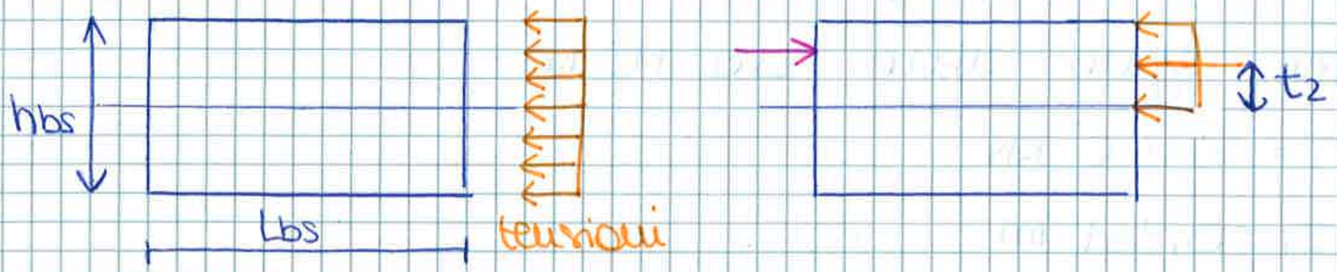
$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sd}}{z \cdot f_{yd} \cdot \cot\theta} = \frac{1805 \cdot 10^3}{0{,}9 \cdot 2000 \cdot 391 \cdot 2{,}5} = 1{,}025 \ \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} = 10{,}25 \text{ cm}^2/\text{m}$$

4 bracci ϕ 10/20

$$\rho_{w,min} = \frac{0{,}08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = 0{,}0012 < \rho_w = 0{,}0039$$

t_1: distanza tra i baricentri dei trefoli nel semiprisma superiore ed il baricentro del prisma → $t_1 = 120 - 87 = 33$ mm

t_2: distanza tra il baricentro della tensione dei trefoli del semipiano superiore ed il baricentro del prisma → $t_2 = Y_a/2 = 43{,}5$



$\gamma_P = 1{,}2$

↑ preso dall'EC2 per verifiche locali

$F_{sd} = 1400 \cdot 139 = 194\,600$ N

↑ tensione del singolo trefolo

$z_{bs} = \frac{L_{bs}}{2}$

$L_{bs} = \sqrt{h_{bs}^2 + (0{,}6 \cdot L_{bpt})^2} = \sqrt{174^2 + (0{,}6 \cdot 563)^2} = 380$ mm

$L_{bs} < L_{bpt}$

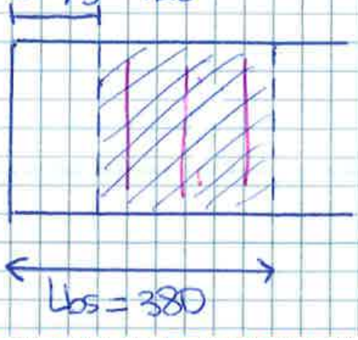
$z_{bs} = 190$ mm

$N_{bs} = 238$ kN

↑ sforzo normale di Bursting che deve essere assorbito da un'area $A_{s,bs}$

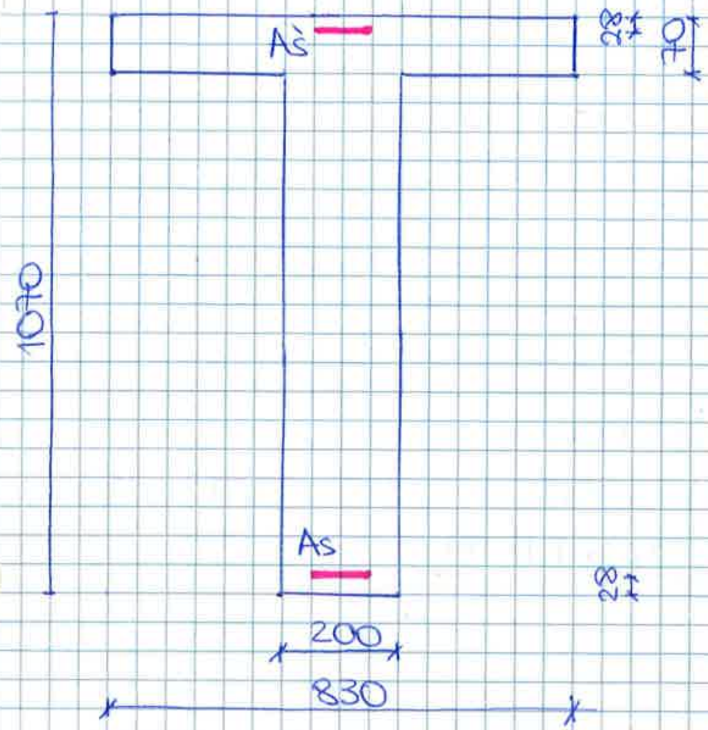
$A_{s,bs} = \frac{N_{bs}}{f_{yd}} = \frac{238}{39{,}1} = 6{,}1$ cm^2

↑ da disporre tra $L_{bs}/3$ e L_{bs}



← /// qui ci devono essere ~ 6 cm^2 di armatura

ESERCITAZIONE INDIVIDUALE: DOMINIO DI RESISTENZA



$\alpha_{cc} = 0{,}85$

$\varepsilon_{ud} = 6{,}8\,‰$

$E_s = 200'000$ MPa

$f_{ck} = 28$ MPa

$f_{yk} = 455$ MPa

$A_s = 2994$ mm^2

$A'_s = 2335$ mm^2

↳ Resistenza a compressione del cls:

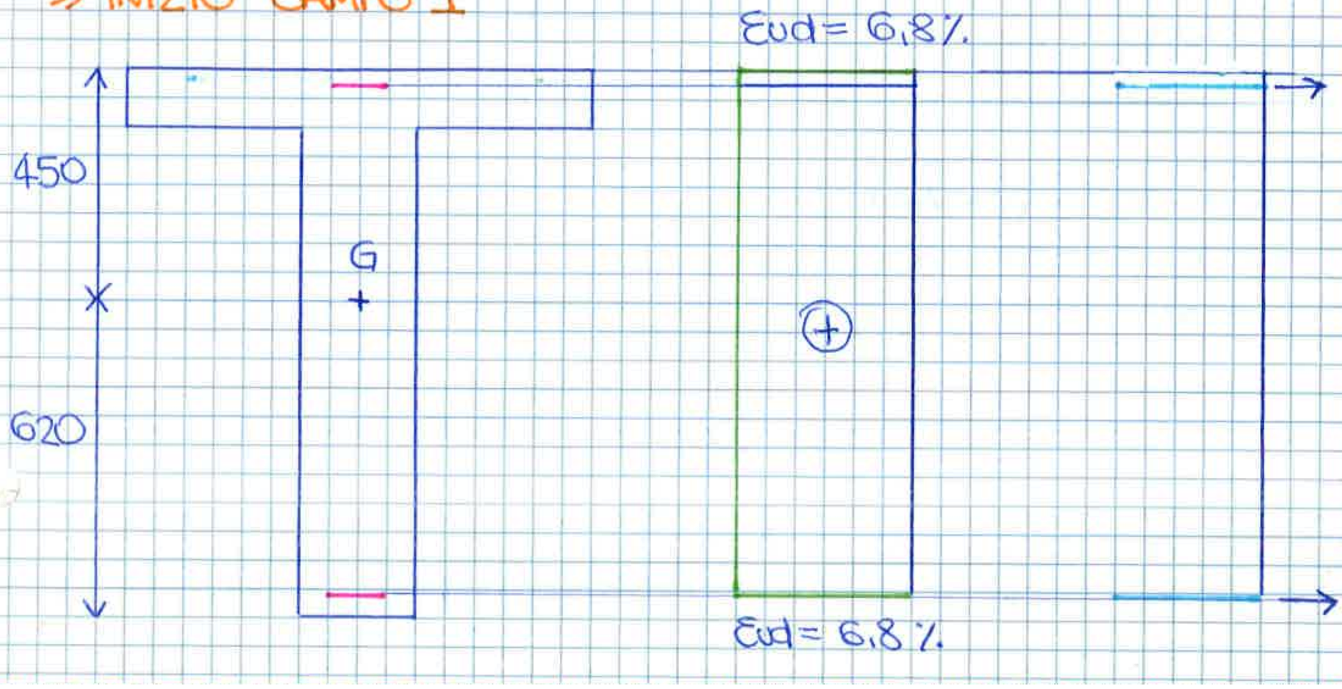
$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \cdot \frac{1}{\gamma_c} = 0{,}85 \cdot 28 \cdot \frac{1}{1{,}5} = 15{,}9 \text{ MPa}$$

↳ Resistenza dell'acciaio:

$$f_{yd} = f_{yk} \cdot \frac{1}{\gamma_s} = \frac{455}{1{,}15} = 395{,}7 \text{ MPa}$$

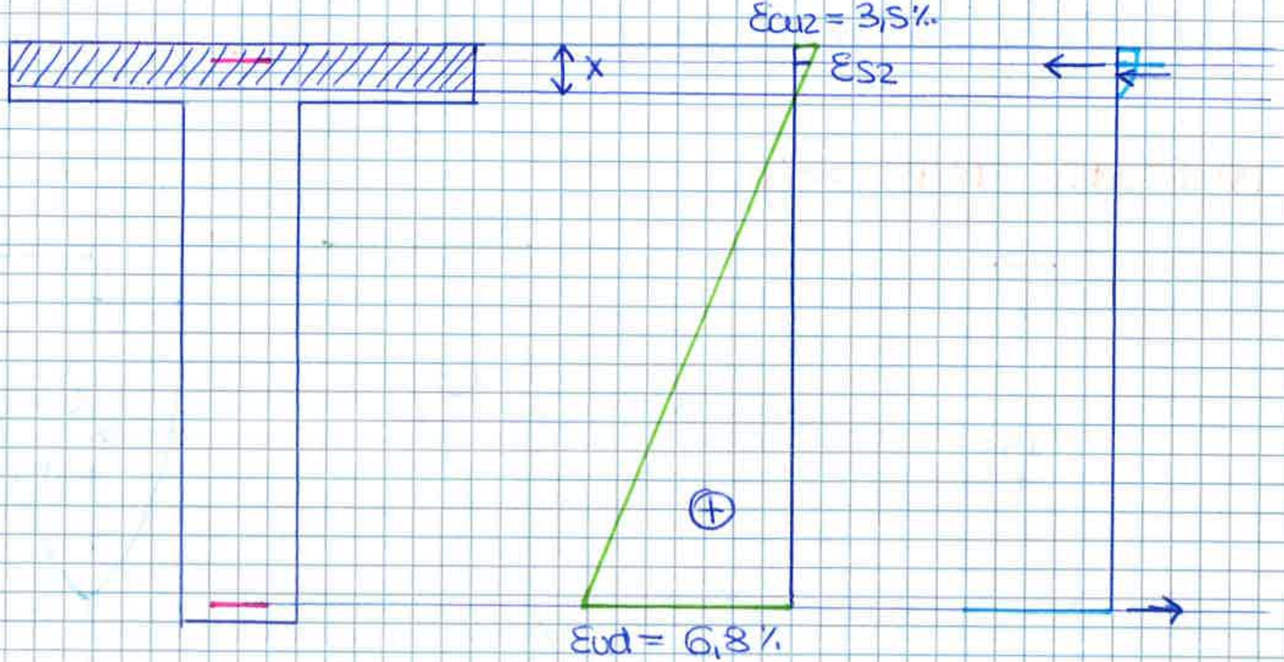
↳ $\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E = 395{,}7/200000 = 1{,}98\,‰$

» INIZIO CAMPO 1



$$\underline{M_{Rd}} = \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot b_{1G} + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot b_{2G} =$$
$$= 395{,}7 \cdot 2994 \cdot (620-28) - 365{,}5 \cdot 2335 \cdot (450-28) =$$
$$= 341204938{,}6 \text{ Nmm} = \underline{341{,}2 \text{ kNm}}$$

» FRONTIERA CAMPO 2-3



$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{ud} + \varepsilon_{cu2} = 68{,}0 + 3{,}5 = 71{,}5 ‰$$

$$d : \Delta\varepsilon = x : \varepsilon_{cu2}$$
$$(1070-28) : 71{,}5 = x : 3{,}5$$
$$x = (1070-28) \cdot \frac{3{,}5}{71{,}5} = 51 \text{ mm} < H_{sol} = 70 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{cu2} : x = \varepsilon_{s2} : (x - (c + \phi/2))$$
$$3{,}5 : 51 = \varepsilon_{s2} : (51-28)$$
$$\varepsilon_{s2} = 3{,}5 \cdot \frac{51-28}{51} = 1{,}58 ‰ < 1{,}98‰ \rightarrow \text{NO SNERVAMENTO}$$

$$\sigma_{s2} = E \cdot \varepsilon_{s2} = 200000 \cdot \frac{1{,}58}{1000} = 316 \text{ MPa}$$

$$\beta_1(\varepsilon_{cu2}) = 1 - \frac{2}{3|\varepsilon_{cl}} = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}5} = 0{,}81$$

$$\underline{N_{Rd}} = -f_{cd} \cdot B \cdot x \cdot \beta_1 + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{s2} \cdot A_{s2} =$$
$$= -15{,}9 \cdot 830 \cdot 51 \cdot 0{,}81 + 395{,}7 \cdot 2994 - 316 \cdot 2335 =$$
$$= -98302{,}3 \text{ N} = \underline{-98{,}3 \text{ kN}}$$

$\beta_1 \cdot (\varepsilon_{cu2}) = 0{,}81$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2}{3 \cdot |\varepsilon_c|} = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}13} = 0{,}787$$

$$N_{Rd\,cls} = -\left(f_{cd} \cdot B \cdot x \cdot \beta_1(\varepsilon_{cu2}) - f_{cd} \cdot (B - B_w) \cdot (x - H_{sa}) \cdot \beta_1(\varepsilon_c)\right)$$
$$= -(15{,}9 \cdot 830 \cdot 663 \cdot 0{,}81 - 15{,}9 \cdot (830-200) \cdot (663-70) \cdot$$
$$\cdot\, 0{,}787) =$$
$$= -(7087184{,}9 - 4674888{,}03) = -2412296{,}8\ N$$

$$\underline{N_{Rd}} = N_{Rd}(cls) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{s2} \cdot A_{s2} =$$
$$= -2412296{,}8 + 395{,}7 \cdot 2994 - 395{,}7 \cdot 2335 =$$
$$= -2151530{,}6\ N = \underline{-2151{,}5\ kN}$$

$\beta_2(\varepsilon_{cu2}) = 0{,}42$

$$\beta_2(\varepsilon_c) = \frac{3 \cdot |\varepsilon_c| - 4 + 2/|\varepsilon_c|}{6 \cdot |\varepsilon_c| - 4} = \frac{3 \cdot 3{,}13 - 4 + 2/3{,}13}{6 \cdot 3{,}13 - 4} = 0{,}41$$

$\beta_2(\varepsilon_{cu2}) \cdot x = 0{,}42 \cdot 663 = 278\ mm < 450\ mm \rightarrow$ SOPRA G

$\beta_2(\varepsilon_c) \cdot (x - H_{sa}) = 0{,}41 \cdot (663 - 70) = 243\ mm < 450 - 70$
$\hookrightarrow$ SOPRA G

$$M_{Rd\,cls} = N^{+}_{Rd\,cls} \cdot (y_G - \beta_2(\varepsilon_{cu2}) \cdot x) - N^{-}_{Rd\,cls} \cdot (y_G - H_{sa} - \beta_2(\varepsilon_c) \cdot (x - H_s))$$
$$= 7087184{,}9 \cdot (450 - 0{,}42 \cdot 663) - 4674888{,}03 \cdot$$
$$\cdot\, (450 - 70 - 0{,}41 \cdot (663 - 70)) = 575883774{,}4\ Nmm$$

$$\underline{M_{Rd}} = M_{Rd\,cls} + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot b_{1G} + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot b_{2G} =$$
$$= 575883774{,}4 + 395{,}7 \cdot 2994 \cdot (620 - 28) +$$
$$+ 395{,}7 \cdot 2335 \cdot (450 - 28) = 1667152357\ Nmm =$$
$$= \underline{1667{,}15\ kNm}$$

$\underline{N_{Rd}} = N_{Rd\,cls} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{s2} \cdot A_{s2} =$

$= -3464307{,}9 - 18 \cdot 2994 - 395{,}7 \cdot 2335 =$

$= -4442159{,}4\,N = \underline{-4442{,}2\ kN}$

$\beta_2(\varepsilon_{cu2}) = 0{,}416$

$$\beta_2(\varepsilon_c) = \frac{3 \cdot |\varepsilon_c| - 4 + 2/|\varepsilon_c|}{6 \cdot |\varepsilon_c| - 4} = \frac{2 \cdot 3{,}27 - 4 + 2/3{,}27}{6 \cdot 3{,}27 - 4} = 0{,}411$$

$\beta_2(\varepsilon_{cu2}) \cdot x = 0{,}416 \cdot 1070 = 445{,}12 < 450 \rightarrow$ SOPRA G

$\beta_2(\varepsilon_c) \cdot (x - H_{sa}) = 0{,}411 \cdot (1070 - 70) = 411 > 450 - 7 \rightarrow$ SOTTO G

$M_{Rd\,cls} = N^{+}_{Rd\,cls} \cdot (y_G - \beta_2(\varepsilon_{cu2})\,x) + N^{-}_{Rd\,cls}\,(\beta_2(\varepsilon_c) \cdot (x - H_{sa}) - (H - H_{sa})) =$

$= 11437839{,}9\,(450 - 0{,}416 \cdot 1070) + 7973532 \cdot$

$\cdot (0{,}411 \cdot (1070 - 70) - (450 - 70)) = 302996150{,}7\ Nmm$

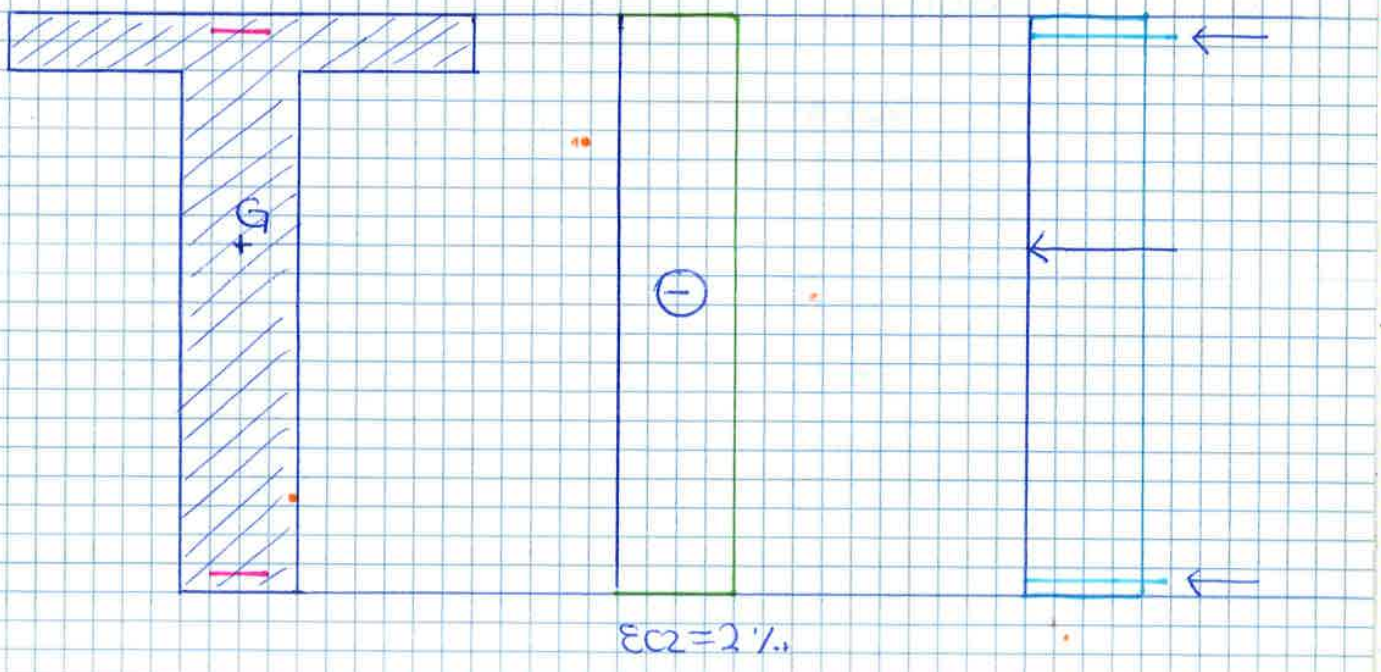
$= 302{,}9\ kNm$

$\underline{M_{Rd}} = M_{Rd\,cls} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot b_{1G} + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot b_{2G} =$

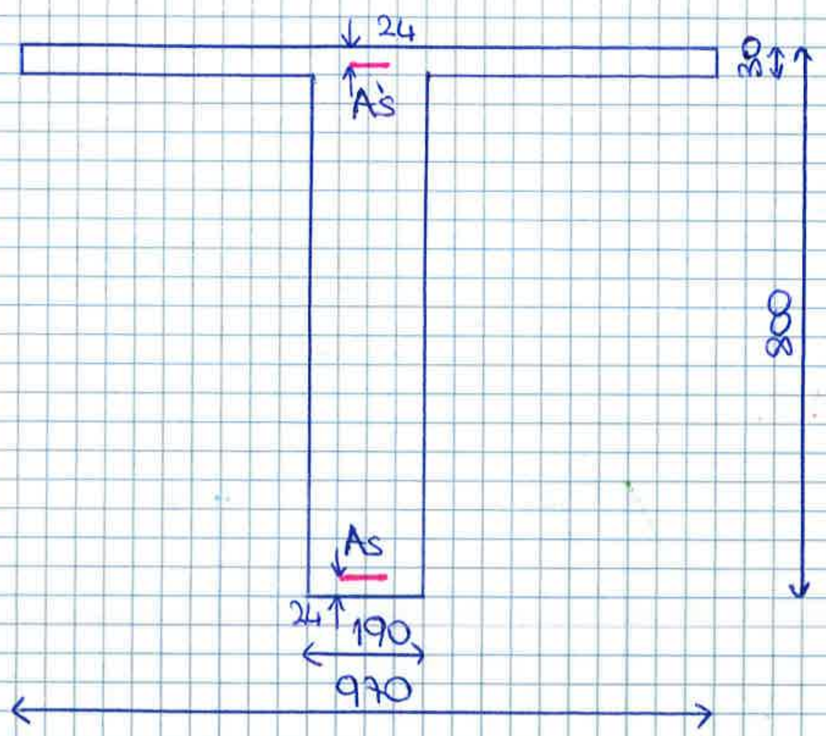
$= 302996150{,}7 - 18 \cdot 2994 \cdot (620 - 28) + 395{,}7 \cdot 2335 \cdot$

$(450 - 28) = 661002995{,}7\ Nmm = \underline{661\ kNm}$

» FINE CAMPO 5



- ESERCITAZIONE INDIVIDUALE 2 : MOMENTO-CURVATURA



$\alpha_{cc} = 0{,}85$

$\varepsilon_{ud} = 6{,}8‰$

$E_s = 200000$ MPa

$f_{ck} = 46$ MPa

$f_{yk} = 430$ MPa

$A_s = 2087$ mm^2

$A'_s = 1941$ mm^2

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \cdot \frac{1}{\gamma_c} = 0{,}85 \cdot 46 \cdot \frac{1}{1{,}5} = 26{,}07 \text{ MPa}$$

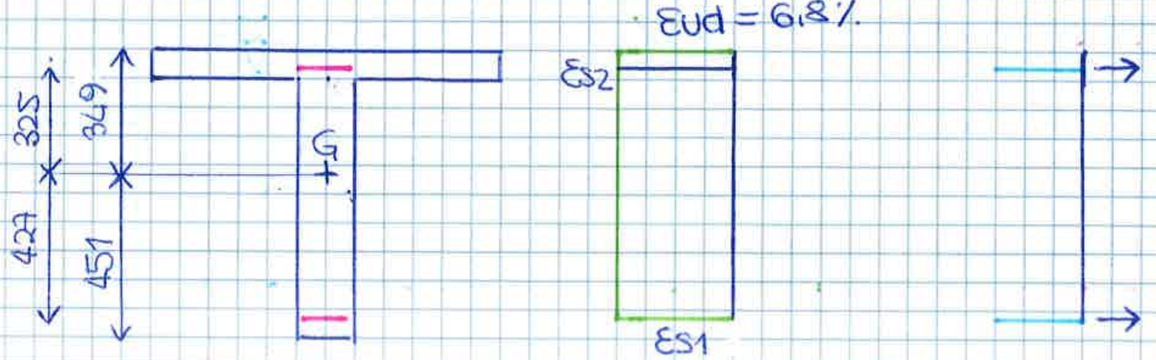
$$f_{yd} = f_{yk} \cdot \frac{1}{\gamma_s} = 430 \cdot \frac{1}{1{,}15} = 373{,}91 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} = \frac{373{,}91}{200000} = 1{,}87 ‰$$

(1) Calcolo di M_{Rd} e χ noto $N_{sd} = -2606$ KN

Devo trovare in quale campo si trova N_{sd}.

» INIZIO CAMPO 1



$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{ud} + \varepsilon_{cu2} = 6{,}8 + 0{,}35 = 7{,}15\% = 71{,}5‰$$

$$776 : \Delta\varepsilon = X : 3{,}5 \rightarrow X = 776 \cdot \frac{3{,}5}{71{,}5} = 38 \text{ mm}$$

$$38 : \varepsilon_{cu2} = (38-24) : \varepsilon_{s2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = 3{,}5 \cdot \frac{(38-24)}{38} = 1{,}29‰$$

$$\varepsilon_{s2} = 1{,}29‰ < 1{,}87‰ \rightarrow \sigma_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E = \frac{1{,}29}{1000} \cdot 200000 = 258 \text{ MPa}$$

$$38 : \varepsilon_{cu2} = (38-30) : \varepsilon_c \rightarrow \varepsilon_c = 3{,}5 \cdot \frac{38-30}{38} = 0{,}93‰ < 2‰$$

$$\beta_1(\varepsilon_{cu2}) = 1 - \frac{2}{3 \cdot |\varepsilon_{cu2}|} = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}5} = 0{,}81$$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = \frac{|\varepsilon_c|}{2} \cdot \left(1 - \frac{|\varepsilon_c|}{6}\right) = \frac{0{,}93}{2} \cdot \left(1 - \frac{0{,}93}{6}\right) = 0{,}39$$

$$N_{Rd}^{cls} = -\left(f_{cd} \cdot B \cdot X \cdot \beta_1(\varepsilon_{cu2}) - f_{cd} \cdot \beta_1(\varepsilon_c) \cdot (X - H_s) \cdot (B - B_w)\right) =$$
$$= -\left(26{,}07 \cdot 970 \cdot 38 \cdot 0{,}81 - 26{,}07 \cdot 0{,}39 \cdot (38-30) \cdot (970-190)\right)$$
$$= -(778361{,}6 - 63443{,}9) = -714917{,}7 \text{ N}$$

$$N_{Rd} = N_{Rd}^{cls} - \sigma_{s2} \cdot A'_s + \sigma_{s1} \cdot A_s =$$
$$= -714917{,}7 - 258 \cdot 1941 + 373{,}91 \cdot 2087 = -435{,}3 \text{ kN}$$

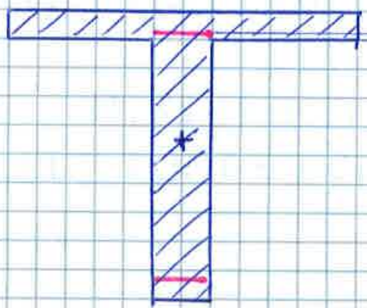
$$\beta_2(\varepsilon_{cu2}) = \frac{3 \cdot |\varepsilon_{cu2}| - 4 + 2/|\varepsilon_{cu2}|}{6 \cdot |\varepsilon_{cu2}| - 4} = \frac{3 \cdot 3{,}5 - 4 + 2/3{,}5}{6 \cdot 3{,}5 - 4} = 0{,}416$$

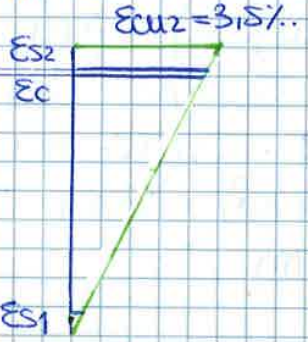
$$\beta_2(\varepsilon_c) = \frac{8 - \varepsilon_c}{4(6 - \varepsilon_c)} = \frac{8 - 0{,}93}{4(6 - 0{,}93)} = 0{,}349$$

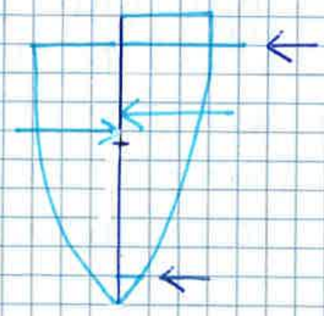
$$M_{Rd} = \overset{+}{N}{}_{Rd}^{cls} \cdot (y_G - \beta_2(\varepsilon_{cu2}) X) - \overset{-}{N}{}_{Rd}^{cls} \cdot \left(y_G - H_{sa} - \beta_2(\varepsilon_c)(X - H_{sa})\right) +$$
$$+ \sigma_{s1} \cdot A_s \cdot b_{1G} + \sigma_{s2} \cdot A'_s \cdot b_{2G} =$$
$$= 778361{,}6 \cdot (349 - 0{,}416 \cdot 38) - 63443{,}9 (349 - 30 -$$
$$- 0{,}349 \cdot (38-30)) + 1941 \cdot 258 \cdot 325 + 2087 \cdot 373{,}91 \cdot 427 =$$
$$= 735{,}24 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = N_{Rd\,cls}^{\rightarrow} \cdot (y_G - \beta_2(\varepsilon_{cu2}) \cdot x) - N_{Rd\,cls}^{-} (y_G - H_{sol} - \beta_2(\varepsilon_c) \cdot (x - H_s)) +$$
$$+ \sigma_{s1} \cdot A_s \cdot b_{1G} + \sigma_{s2} \cdot A'_s \cdot b_{2G} =$$
$$= 10118700 \cdot (349 - 0{,}416 \cdot 494) - 7519897{,}8 \cdot (349 - 30 -$$
$$- 0{,}411 \cdot (494 - 30)) + 373{,}91 \cdot (2087 \cdot 427 + 1941 \cdot 325) =$$
$$= \underline{1056{,}3 \text{ kNm}}$$

>> FRONTIERA CAMPO 4a-5







$$800 : \varepsilon_{cu2} = 800 - 24 : \varepsilon_{s2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = 3{,}5 \cdot \frac{800-24}{800} = 3{,}395\ ‰$$

$$\varepsilon_{s2} = 3{,}395\ ‰ > 1{,}87\ ‰ \rightarrow \sigma_{s2} = 373{,}91 \text{ MPa}$$

$$800 : \varepsilon_{cu2} = 800 - 30 : \varepsilon_c \rightarrow \varepsilon_c = 3{,}5 \cdot \frac{800-30}{800} = 3{,}369\ ‰$$

$$800 : \varepsilon_{cu2} = 24 : \varepsilon_{s1} \rightarrow \varepsilon_{s1} = 3{,}5 \cdot \frac{24}{800} = 0{,}105\ ‰ < 1{,}87\ ‰$$

$$\hookrightarrow \sigma_{s1} = \varepsilon_{s1} \cdot E = \frac{0{,}105}{1000} \cdot 200000 = 21 \text{ MPa}$$

$$\beta_1(\varepsilon_{cu2}) = 0{,}81$$

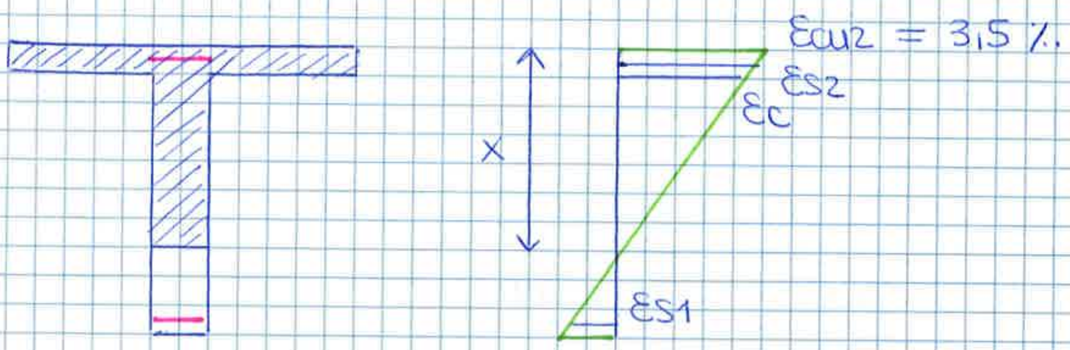
$$\beta_1(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2}{3 \cdot \varepsilon_c} = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}369} = 0{,}802$$

$$N_{Rd\,cls} = -(f_{cd} \cdot B \cdot x \cdot \beta_1(\varepsilon_{cu2}) - f_{cd} \cdot (x - H_s) \cdot (B - B_w) \cdot \beta_1(\varepsilon_c)) =$$
$$= -(26{,}07 \cdot 970 \cdot 800 \cdot 0{,}81 - 26{,}07 \cdot (970 - 190) \cdot (770) \cdot 0{,}802) =$$
$$= -(16386559{,}2 - 12557428{,}9) = -3829130{,}3 \text{ N}$$

$$\underline{N_{Rd}} = N_{Rd\,cls} - \sigma_{s1} \cdot A_s - \sigma_{s2} \cdot A'_s =$$
$$= -3829130{,}3 - 373{,}91 \cdot 1941 - 21 \cdot 2087 = \underline{-4598{,}7 \text{ kN}}$$

- $494 \text{ mm} < x < 800 \text{ mm}$

$$x = \frac{800 + 494}{2} = 647 \text{ mm}$$



$$\varepsilon_{cu2} : x = \varepsilon : x_\varepsilon$$

$$\hookrightarrow \varepsilon_{s2} = 3{,}5 \cdot \frac{647 - 24}{647} = 3{,}37 \text{‰} > 1{,}87 \text{‰}$$

$$\hookrightarrow \sigma_{s2} = 373{,}91 \text{ MPa}$$

$$\hookrightarrow \varepsilon_c = 3{,}5 \cdot \frac{647 - 30}{647} = 3{,}338 \text{‰} > 2 \text{‰}$$

$$\hookrightarrow \varepsilon_{s1} = 3{,}5 \cdot \frac{800 - 647 - 24}{647} = 0{,}698 \text{‰} < 1{,}87 \text{‰}$$

$$\hookrightarrow \sigma_{s1} = \frac{0{,}698}{1000} \cdot 200000 = 139{,}6 \text{ MPa}$$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}37} = 0{,}802$$

$$N_{Rd} = -\left(f_{cd} \cdot B \cdot x \cdot \beta_1(\varepsilon_{cu2}) - f_{cd} \cdot \beta_1(\varepsilon_c) \cdot (x - H_s) \cdot (B - B_w)\right) - \sigma_{s2} \cdot A_s' + \sigma_{s1} \cdot A_s =$$

$$= -(26{,}07 \cdot 970 \cdot 647 \cdot 0{,}81 - 26{,}07 \cdot 0{,}802 \cdot (970 - 190) \cdot (647 - 30)) - 373{,}91 \cdot 1941 + 139{,}6 \cdot 2087 =$$

$$= -3624{,}8 \text{ kN}$$

$$|N_{Rd}| - |N_{sd}| = 3624{,}8 - 2606 > 0$$

- 494 mm < x < 514 mm

$$x = \frac{494 + 514}{2} = 504 \text{ mm}$$

↳ $\varepsilon_{s2} = 3{,}5 \cdot \frac{504-24}{504} = 3{,}33‰ > 1{,}87‰$

↳ $\sigma_{s2} = 373{,}91$ MPa

↳ $\varepsilon_{s1} = 3{,}5 \cdot \frac{776-504}{504} = 1{,}89‰ > 1{,}87‰$

↳ $\sigma_{s1} = 373{,}91$ MPa

↳ $\varepsilon_c = 3{,}5 \cdot \frac{504-30}{504} = 3{,}29‰$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}29} = 0{,}797$$

$$N_{Rd} = -(26{,}07 \cdot 970 \cdot 504 \cdot 0{,}81 - 26{,}07 \cdot (970-190)(504-30) \cdot 0{,}797) + 373{,}91\,(2087 - 1941) = -2586{,}98 \text{ kN}$$

$$|N_{Rd}| - |N_{sd}| = 2586{,}9 - 2606 < 0$$

- 504 mm < x < 514 mm

$$x = \frac{504 + 514}{2} = 509 \text{ mm}$$

↳ $\varepsilon_{s2} = 3{,}5 \cdot \frac{509-24}{509} = 3{,}33‰ > 2‰$

↳ $\sigma_{s2} = 373{,}91$ MPa

↳ $\varepsilon_{s1} = 3{,}5 \cdot \frac{776-509}{509} = 1{,}84‰ < 1{,}87‰$

↳ $\sigma_{s1} = 1{,}87 \cdot 200 = 367{,}19$ MPa

↳ $\varepsilon_c = 3{,}5 \cdot \frac{509-30}{509} = 3{,}294‰$

$$\beta_1(\varepsilon_c) = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}294} = 0{,}798$$

$$N_{Rd} = -(26{,}07 \cdot 970 \cdot 509 \cdot 0{,}81 - 26{,}07 \cdot (970-190) \cdot (509-30) \cdot 0{,}798) - 373{,}91 \cdot 1941 + 367{,}19 \cdot 2087 = -2612{,}6 \text{ kN}$$

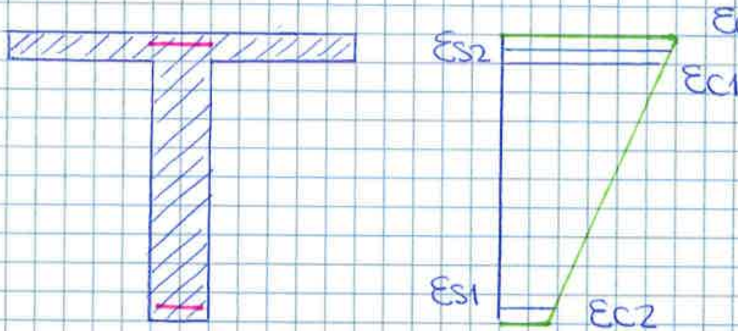
$$|N_{Rd}| - |N_{sd}| = 2612{,}6 - 2606 \sim 0$$

↳ <u>A.N. $x = 509$ mm</u>

(2) Noto χ, calcolo x e M:

$$\chi = 0{,}59 \cdot \chi(M_{Rd}) = 0{,}59 \cdot 6{,}876 \cdot 10^{-6} = 4{,}057 \cdot 10^{-6} \ 1/mm$$

$\varepsilon_{cu2} = 3{,}5‰$



$$\chi = \frac{\varepsilon_{cu2}}{x} \rightarrow x = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\chi} = \frac{3{,}5}{1000} \cdot \frac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 863 \ mm$$

$\hookrightarrow \varepsilon_{s1} = 3{,}5 \cdot \frac{863 - 800 - 24}{863} = 0{,}158 < 1{,}87‰$

$\hookrightarrow \sigma_{s1} = 0{,}158 \cdot 200 = 31{,}6 \ MPa$

$\hookrightarrow \varepsilon_{c1} = 3{,}5 \cdot \frac{863 - 30}{863} = 3{,}378‰$

$\hookrightarrow \varepsilon_{c2} = 3{,}5 \cdot \frac{863 - 800}{863} = 0{,}255‰$

$\hookrightarrow \varepsilon_{s2} > \varepsilon_{c1} \rightarrow > 1{,}87‰ \rightarrow \sigma_{s2} = 373{,}91 \ MPa$

$$\beta_1 = 1 - \frac{2}{3 \cdot \varepsilon_{c1}} = 1 - \frac{2}{3 \cdot 3{,}378} = 0{,}803$$

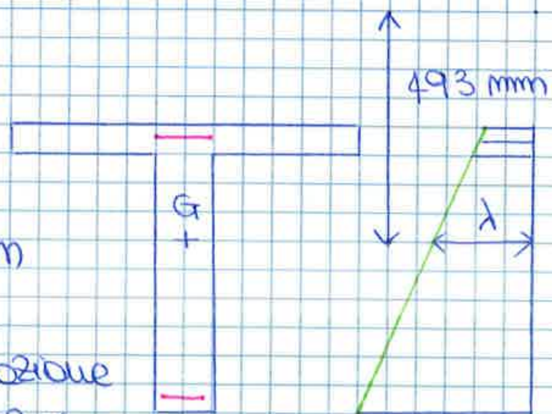
$$\beta_1(\varepsilon_{c2}) = \frac{\varepsilon_{c2}}{2}\left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{6}\right) = \frac{0{,}255}{2}\left(1 - \frac{0{,}255}{6}\right) = 0{,}122$$

$$N_{int} = -(0{,}81 \cdot 970 \cdot 863 \cdot 26{,}07 - 0{,}803 \cdot (970 - 190) \cdot (863 - 30) \cdot 26{,}07 - 0{,}122 \cdot 190 \cdot (863 - 800) \cdot 26{,}07) - 373{,}91 \cdot 1941 - 31{,}6 \cdot 2087 = -4828{,}8 \ kN$$

$$\lambda = 3{,}5 \cdot \frac{863 - 349}{863} = 2{,}08‰$$

Ipotizzo $\lambda = 2‰$

$$x = \frac{\lambda}{\chi} = \frac{2}{1000} \cdot \frac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 493 \ mm$$



N_{int} sarà di sicuro di trazione

$N = -2606$ sarò tra $-2{,}08‰ < \lambda < 2‰$

- $-2{,}08\ \text{‰} < \lambda < -0{,}04\ \text{‰}$

$$\lambda = -\frac{0{,}04 + 2{,}08}{2} = -1{,}06\ \text{‰}$$

$$x = \frac{1{,}06}{1000} \cdot \frac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 261\ mm$$

$\hookrightarrow \varepsilon_{c1} = 1{,}06 \cdot \frac{349 + 261}{261} = 2{,}47\ \text{‰} > 2\ \text{‰}$

$\hookrightarrow \varepsilon_{s2} = 1{,}06 \cdot \frac{325 + 261}{261} = 2{,}38\ \text{‰} > 1{,}87\ \text{‰}$

$\hookrightarrow \sigma_{s2} = 373{,}91\ MPa$

$\hookrightarrow \varepsilon_{c2} = 1{,}06 \cdot \frac{349 - 30 + 261}{261} = 2{,}36\ \text{‰} > 2\ \text{‰}$

$\hookrightarrow \varepsilon_{s1} = 1{,}06 \cdot \frac{427 - 261}{261} = 0{,}67\ \text{‰} < 1{,}87\ \text{‰}$

$\hookrightarrow \sigma_{s1} = 0{,}67 \cdot 200 = 134{,}84\ MPa$

$$\beta_1(\varepsilon_{c1}) = 1 - \frac{2}{3 \cdot 2{,}47} = 0{,}73$$

$$\beta_1(\varepsilon_{c2}) = 1 - \frac{2}{3 \cdot 2{,}36} = 0{,}72$$

$$N_{int} = -(26{,}07 \cdot 970 \cdot (349 + 261) \cdot 0{,}73 - 26{,}07\,(970 - 190) \cdot (349 - 30 + 261) \cdot 0{,}72) - 373{,}91 \cdot 1941 + 134{,}84 \cdot 2087 = -3212\ kN < -2606\ kN$$

- $-1{,}06\ \text{‰} < \lambda < -0{,}04\ \text{‰}$

$$\lambda = -\frac{1{,}06 + 0{,}04}{2} = -0{,}55\ \text{‰}$$

$$x = \frac{\lambda}{\chi} = \frac{0{,}55}{1000} \cdot \frac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 136\ mm$$

$\hookrightarrow \varepsilon_{c1} = 0{,}55 \cdot \frac{349 + 136}{136} = 1{,}96\ \text{‰}$

$\hookrightarrow \varepsilon_{s2} = 0{,}55 \cdot \frac{349 - 24 + 136}{136} = 1{,}86\ \text{‰} < 1{,}87\ \text{‰}$

$\hookrightarrow \sigma_{s2} = 1{,}86 \cdot 200 = 372\ MPa$

$\hookrightarrow \varepsilon_{c2} = 0{,}55 \cdot \frac{349 - 30 + 136}{136} = 1{,}84\ \text{‰}$

- $-0{,}805 < \lambda < -0{,}55\ ‰$

$\lambda = -\dfrac{0{,}805 + 0{,}55}{2} = 0{,}6775 = 0{,}678\ ‰$

$x = \dfrac{\lambda}{\chi} = \dfrac{0{,}678}{1000 \cdot 4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 167\ mm$

↳ $\varepsilon_{c1} = 0{,}678 \cdot \dfrac{349 + 167}{167} = 2{,}09\ ‰$

↳ $\varepsilon_{s2} = 0{,}678 \cdot \dfrac{349 + 167 - 24}{167} = 1{,}98\ ‰ > 1{,}87\ ‰$

↳ $\sigma_{s2} = 373{,}91\ MPa$

↳ $\varepsilon_{c2} = 0{,}678 \cdot \dfrac{349 + 167 - 30}{167} = 1{,}97\ ‰$

↳ $\varepsilon_{s1} = 0{,}678 \cdot \dfrac{427 - 167}{167} = 1{,}056\ ‰ < 1{,}87\ ‰$

↳ $\sigma_{s1} = 1{,}056 \cdot 200 = 211{,}11\ MPa$

$\beta_1(\varepsilon_{c1}) = 1 - \dfrac{2}{3 \cdot 2{,}09} = 0{,}681$

$\beta_1(\varepsilon_{c2}) = \dfrac{1{,}97}{2} \cdot \left(1 - \dfrac{1{,}97}{6}\right) = 0{,}662$

$N_{int} = -(26{,}07 \cdot 970 \cdot (349 + 167) \cdot 0{,}681 - 26{,}07\ (970 - 190) \cdot (349 - 30 + 167) \cdot 0{,}662) - 1941 \cdot 373{,}91 + 211{,}11 \cdot 2087 = -2628{,}9\ kN$

- $-0{,}678 < \lambda < -0{,}55$

$\lambda = -\dfrac{0{,}678 + 0{,}55}{2} = 0{,}614$

$x = \dfrac{\lambda}{\chi} = \dfrac{0{,}614}{1000} \cdot \dfrac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 151\ mm$

↳ $\varepsilon_{c1} = 0{,}614 \cdot \dfrac{349 + 151}{151} = 2{,}03\ ‰$

↳ $\varepsilon_{s2} = 0{,}614 \cdot \dfrac{349 + 151 - 24}{151} = 1{,}94\ ‰ > 1{,}87\ ‰$

↳ $\sigma_{s2} = 373{,}91\ MPa$

↳ $\varepsilon_{c2} = 0{,}614 \cdot \dfrac{349 + 151 - 30}{151} = 1{,}91\ ‰$

- $-0{,}678\text{‰} < \lambda < -0{,}646\text{‰}$

$$\lambda = -\frac{0{,}646 + 0{,}678}{2} = -0{,}662\text{‰}$$

$$x = \frac{0{,}662}{1000} \cdot \frac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 163\ mm$$

↳ $\varepsilon_{c1} = 0{,}662 \cdot \frac{349+163}{163} = 2{,}08\text{‰}$

↳ $\varepsilon_{s2} = 0{,}662 \cdot \frac{349+163-24}{163} = 1{,}98\text{‰} > 1{,}87\text{‰}$

↳ $\sigma_{s2} = 373{,}91\ MPa$

↳ $\varepsilon_{c2} = 0{,}662 \cdot \frac{349+163-30}{163} = 1{,}957\text{‰}$

↳ $\varepsilon_{s1} = 0{,}662 \cdot \frac{427-163}{163} = 1{,}07\text{‰} < 1{,}87\text{‰}$

↳ $\sigma_{s1} = 1{,}07 \cdot 200 = 214{,}44\ MPa$

$$\beta_1(\varepsilon_{c1}) = 1 - \frac{2}{3 \cdot 2{,}08} = 0{,}679$$

$$\beta_1(\varepsilon_{c2}) = \frac{1{,}957}{2}\left(1 - \frac{1{,}957}{6}\right) = 0{,}659$$

$$N_{int} = -(26{,}07 \cdot 970 \cdot (349+163) \cdot 0{,}679 - 26{,}07 \cdot (970-190) \cdot (349-30+163) \cdot 0{,}659) - 1941 \cdot 373{,}91 + 2087 \cdot 214{,}44 = -2610{,}5\ kN < -2606\ kN$$

- $-0{,}662\text{‰} < \lambda < -0{,}646\text{‰}$

$$\lambda = -\frac{0{,}646 + 0{,}662}{2} = -0{,}654\text{‰}$$

$$x = \frac{0{,}654}{1000} \cdot \frac{1}{4{,}057 \cdot 10^{-6}} = 161\ mm$$

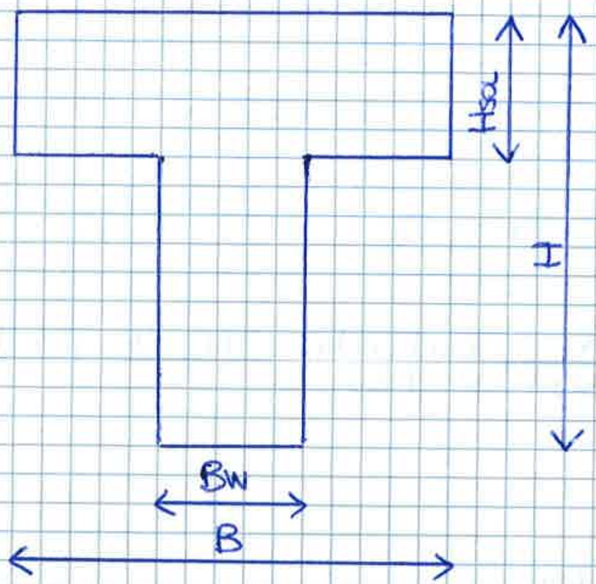
↳ $\varepsilon_{c1} = 0{,}654 \cdot \frac{349+161}{161} = 2{,}07\text{‰}$

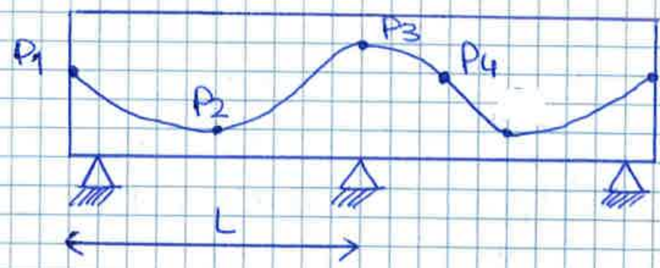
↳ $\varepsilon_{s2} = 0{,}654 \cdot \frac{349+161-24}{161} = 1{,}97\text{‰} > 1{,}87\text{‰}$

↳ $\sigma_{s2} = 373{,}91\ MPa$

↳ $\varepsilon_{c2} = 0{,}654 \cdot \frac{349+161-30}{161} = 1{,}95\text{‰} < 2\text{‰}$

ESERCITAZIONE INDIVIDUALE 3: C.A. PRECOMPRESSO TRACCIATO DEI CAVI





$f_{ck} = 45$ MPa
Classe di cemento: N
RH = 70%
$t_s = 3$ gg
$t_0 = 7$ gg
$t = 25500$ gg
$t_{ril} = 500'000$ h

$f_{pk} = 1860$ MPa
$E_s = 196'000$ MPa
Classe rilassamento: 2
$\sigma_{p0} = 1450$ MPa
$\mu = 0,19$ 1/rad
$k = 0,01$ rad/m
$\Delta a = 2$ mm

$L = 15$ m
$B = 0,90$ m
$B_w = 0,40$ m
$H = 1$ m
$H_{sol} = 0,30$ m
$A_p = 2224$ mm^2

P1: $X_1 = 0$
$Y_1 = 0,63$ m
$\beta_1 = 7,2$

P2: $X_2 = 6$ m
$Y_2 = 0,15$ m
$\beta_2 = 0$

P3: $X_3 = 15$ m
$Y_3 = 0,85$ m
$\beta_3 = 0$

P4: $X_4 = 22,13$ m

$M_g = -730$ kNm

Le equazioni delle parabole risultano quindi:

① $0,0049 \cdot x^2 - 0,126\,x + 0,63 = y$ $\qquad 0 \leq x \leq 3$

② $0,016\,x^2 - 0,194 \cdot x + 0,731 = y$ $\qquad 3 \leq x \leq 6$

③ $0,017\,x^2 - 0,207\,x + 0,772 = y$ $\qquad 6 \leq x \leq 10,5$

④ $-0,017\,x^2 + 0,518\,x - 3,039 = y$ $\qquad 10,5 \leq x \leq 15$

$x_4 = 22,13$

$x_4 - L = 7,13\ m$

$x = 15 - 7,13 = 7,87\ m > 6\ m \rightarrow 3^{\wedge}$ parabola

$y_4 = 0,017 \cdot 7,87^2 - 0,207 \cdot 7,87 + 0,772 = 0,210\ m$

$tg\beta = 2 \cdot x \cdot 0,017 - 0,207$
$= 2 \cdot 7,87 \cdot 0,017 - 0,207 = 0,0606$

$\beta_4 = 3,698°$

→ 2. Calcolo della lunghezza di rientro $L_{RIENTRO}$ interessata dalla diminuzione di tensione per effetto del rientro ancoraggi ^{2mm} e di $\sigma_{p,att}$ che è la tensione del cavo nel punto 4 dopo tesatura da sinistra.

L_p lo si trova tramite ciclo iterativo quando Δd calcolato $\sim 2\ mm$

$$\Delta d = \Sigma \Delta P \cdot \frac{1}{E_{sp} \cdot A_p}$$

$$\Delta P(x) = P_1(x) - P_2(x)$$

$$P_1(x) = P_{1,0} \cdot e^{-\mu(\alpha + K \cdot x)}$$

$$P_2(x) = P_{2,0} + P_{2,0}\left(1 - e^{-\mu(\alpha + Kx)}\right)$$

$$P_{20} = \frac{P_{10} \cdot e^{-\mu(\alpha_{Lp} + K \cdot \ell_p)}}{2 - e^{-\mu(\alpha_{Lp} + K \cdot \ell_p)}}$$

$P_{10} = A_p \cdot \sigma_{p0}$

$x = 8$

$\beta = tg^{-1}(2 \cdot 0{,}017 \cdot 8 - 0{,}207) = 3{,}719$

$\alpha = 8{,}976 + |1{,}776 - 3{,}719| = 10{,}919$

$x = 9$

$\beta = tg^{-1}(2 \cdot 0{,}017 \cdot 9 - 0{,}207) = 5{,}654$

$\alpha = 10{,}919 + |3{,}719 - 5{,}654| = 13{,}401$

$x = 10$

$\beta = tg^{-1}(2 \cdot 0{,}017 \cdot 10 - 0{,}207) = 7{,}576$

$\alpha = 13{,}401 + |5{,}654 - 7{,}576| = 15{,}324$

$x = 10{,}5$

$\beta = tg^{-1}(2 \cdot 0{,}017 \cdot 10{,}5 - 0{,}207) = 8{,}531$

$\alpha = 13{,}401 + |5{,}654 - 8{,}531| = 16{,}278$

per brevità si riportano solo i risultati finali

x [m]	β [°]	α [°]	x [m]	β [°]	α [°]
0	-7,2	0	17	-3,947	28,757
1	-6,628	0,572	18	-5,912	30,722
2	-6,0934	1,1266	19	-7,864	32,674
3	-5,518	1,682	20	-7,872	34,604
4	-3,776	3,424	21	-5,9205	36,555
5	-1,947	5,253	22	-3,955	38,516
6	-0,115	7,085	22,13	-3,698	38,773
7	1,776	8,976			
8	3,719	10,919			
9	5,654	13,401			
10	7,576	15,324			
10,5	8,531	16,278			
11	7,877	16,932			
12	5,926	18,884			
13	3,96	20,85			
14	1,986	22,824			
15	0	24,81			
16	-1,972	26,782			

- $L_p = 6\,m$

$\alpha(6\,m) = 7{,}085° = 0{,}1236$ rad

$P_{10} = 3224{,}8$ kN

$$P_{20} = \frac{3224{,}8 \cdot \exp(-0{,}19\,(0{,}1236 + 0{,}01 \cdot 6))}{2 - \exp(-0{,}19\,(0{,}1236 + 0{,}01 \cdot 6))} = 3011{,}02 \text{ kN}$$

$\Delta P_0 = 3224{,}8 - 3011{,}02 = 213{,}78$ kN

$\alpha(1\,m) = 9{,}98 \cdot 10^{-3}$ rad

$P_{11} = 3224{,}8 \cdot \exp(-0{,}19 \cdot (9{,}98 \cdot 10^{-3} + 0{,}01 \cdot 1)) = 3212{,}58$ kN

$P_{21} = 3011{,}02 \cdot (2 - \exp(-0{,}19\,(9{,}98 \cdot 10^{-3} + 0{,}01 \cdot 1)) = 3022{,}43$ kN

$\Delta P_1 = 3212{,}58 - 3022{,}43 = 190{,}15$ kN

$\alpha(2\,m) = 0{,}0196$ rad

$P_{21} = 3224{,}8 \cdot \exp(-0{,}19\,(0{,}0196 + 0{,}01 \cdot 2)) = 3200{,}63$ kN

$P_{22} = 3011{,}02 \cdot (2 - \exp(-0{,}19\,(0{,}0196 + 0{,}01 \cdot 2)) = 3033{,}59$ kN

$\Delta P_2 = 3200{,}63 - 3033{,}59 = 167{,}04$ kN

$\alpha(3\,m) = 0{,}0294$ rad

$P_{31} = 3224{,}8 \cdot \exp(-0{,}19\,(0{,}0294 + 0{,}01 \cdot 3)) = 3188{,}61$ kN

$P_{32} = 3011{,}02 \cdot (2 - \exp(-0{,}19\,(0{,}0294 + 0{,}01 \cdot 3)) = 3044{,}81$ kN

$\Delta P_3 = 3188{,}61 - 3044{,}81 = 143{,}8$ kN

$\alpha(4\,m) = 0{,}0598$ rad

$P_{41} = 3224{,}8 \cdot \exp(-0{,}19 \cdot (0{,}0598 + 0{,}01 \cdot 4)) = 3164{,}23$ kN

$P_{42} = 3011{,}02 \cdot (2 - \exp \cdot (-0{,}19 \cdot (0{,}0598 + 0{,}01 \cdot 4)) = 3067{,}58$ kN

$\Delta P_4 = 3164{,}23 - 3067{,}58 = 96{,}65$ kN

$\alpha(5\,m) = 0{,}09168$ rad

$P_{51} = 3224{,}8 \cdot \exp(-0{,}19\,(0{,}09168 + 0{,}01 \cdot 5)) = 3139{,}15$ kN

$P_{52} = 3011{,}02 \cdot (2 - \exp(-0{,}19\,(0{,}09168 + 0{,}01 \cdot 5)) = 3090{,}9$ kN

$\Delta P_5 = 3139{,}15 - 3090{,}99 = 48{,}16$ kN

$$\Delta a_2 = \frac{1}{196000 \cdot 2224 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{213{,}78}{2} + 190{,}15 + 167{,}04 + 143{,}8 + 96{,}65 + 48{,}16 \right) = 1{,}727 \text{ mm} < 2 \text{ mm} \rightarrow \uparrow L_p$$

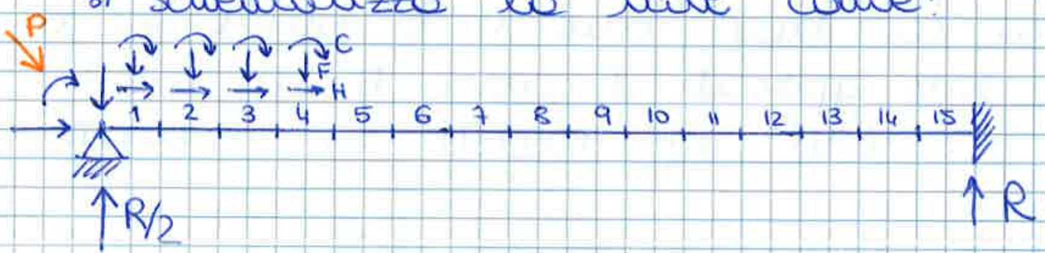
$$\Delta a_3 = \frac{1}{196000 \cdot 2224 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{232,17}{2} + 208,61 + 185,57 + 162,4 + 115,39 + 67,39 + \frac{19,03}{2} \cdot (1+0,4) \right) = 1,99 \text{ mm}$$

$L_{RIENTRO} = 6,4$ m

$$\sigma_{p,att} = \sigma_{p0} \cdot e^{-\mu(\alpha + k \cdot x)} =$$
$$= 1450 \cdot \exp\left(-0,19 \cdot \left(\frac{38,773}{180/\pi} + 0,01 \cdot 22,13\right)\right) = 1222,55 \text{ MPa}$$

→ 3. Calcolo della reazione R nell'appoggio di continuità dopo la tesatura ed il rientro ancoraggi da entrambi i lati (situazione simmetrica).

Si schematizza la trave come:



Su di esso agisce la forza di tesatura esterna P (che vado a scomporre in una forza verticale, orizzontale ed una coppia).
Divido la trave in 15 conci da un metro nei cui baricentri agisce la forza P:

$P_1 = P_{20} \cdot (2 - \exp(+\mu \cdot (\alpha + kx)))$ $\quad x < L_p$

$P_1 = P_{10} \cdot (\exp(+\mu \cdot (\alpha + kx)))$ $\quad x > L_p$

Sui singoli conci agiscono i carichi equivalenti

$H = P_i \cdot \cos(\beta_i) - P_{i-1} \cdot \cos(\beta_{i-1})$

$F = P_i \cdot \text{sen}(\beta_i) - P_{i-1} \cdot \text{sen}(\beta_{i-1})$

$$C = (P_{i-1} \text{sen}(\beta_{i-1}) + P_i \text{sen}(\beta_i)) \cdot \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{2}\right) - P_{i-1} \cdot \cos(\beta_{i-1}) \cdot (y_{Gi-1} - y_{i-1}) + P_i \cos(\beta_i) \cdot (y_{Gi} - y_i)$$

$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0{,}2 \cdot t^{0{,}5}) = 1 - \exp(-0{,}2 \cdot 25500^{0{,}5}) = 1$

$\varepsilon_{ca}(t) = 1 \cdot 8{,}75 \cdot 10^{-5} = 8{,}75 \cdot 10^{-5}$

$\varepsilon_{cd0} = 0{,}85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)\right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$

classe N $\rightarrow$ $\alpha_{ds1} = 4$

$\alpha_{ds2} = 0{,}12$

$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 45 + 8 = 53$ MPa

$\beta_{RH} = 1{,}55 \cdot \left(1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right) = 1{,}55 \cdot \left(1 - \left(\frac{70}{100}\right)^3\right) = 1{,}01835$

$\varepsilon_{cd0} = 0{,}85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot \exp\left(-0{,}12 \cdot \frac{53}{10}\right)\right] \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}01835 =$
$= 3{,}0245 \cdot 10^{-4}$

$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd0}$

$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0{,}04 \cdot \sqrt{h_0^3}}$

$h_0 = 2A_c/u$

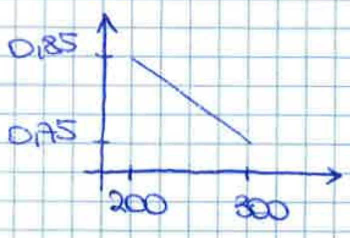
$A_c = 0{,}90 \cdot 0{,}3 + 0{,}7 \cdot 0{,}4 = 0{,}55 \ m^2$

$u = 2 \cdot 0{,}90 + 2 \cdot 0{,}30 + 2 \cdot 0{,}7 = 3{,}8$ m

$h_0 = 2 \cdot 0{,}55 / 3{,}8 = 0{,}28947$ m $= 289{,}47$ mm

$h_0 \geq 200 \rightarrow k_h = 0{,}85$

$h_0 \geq 300 \rightarrow k_h = 0{,}75$



$(300 - 200) : (0{,}85 - 0{,}75) = (300 - 289{,}47) : x$

$x = 0{,}01053$

$k_h = x + 0{,}75 = 0{,}76053$

$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{25500 - 3}{(25500 - 3) + 0{,}04 \cdot \sqrt{287{,}47^3}} = 0{,}9924$

$\varepsilon_{cd}(t) = 0{,}9924 \cdot 0{,}76053 \cdot 3{,}0245 \cdot 10^{-4} = 2{,}2828 \cdot 10^{-4}$

$\varepsilon_{c,sh} = 2{,}2828 \cdot 10^{-4} + 8{,}75 \cdot 10^{-5} = 3{,}158 \cdot 10^{-4}$

$\alpha = 8{,}976 + |1{,}776 - 3{,}467| = 10{,}667° = 0{,}186$

$\sigma_{sp} = 1450 \cdot (\exp(-0{,}19 \cdot (0{,}186 + 0{,}01 \cdot 7{,}87))) = 1378{,}88$

$\mu = 1378{,}88/1860 = 0{,}741$

$\Delta\sigma_{rel} = 1378{,}88 \cdot 0{,}66 \cdot 2{,}5 \cdot \exp\left(9{,}1 \cdot 0{,}741 \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0{,}75(1-0{,}741)}\right) \cdot 10^{-5} = 64{,}53 \text{ MPa}$

$N(X_4) = -3054329 \text{ N}$

$M(X_4) = -730 \text{ KNm}$

$\sigma_c = \frac{N}{A_c} + \frac{M}{J_c} \cdot z_{cp}$

$z_{cp} = y_G - y_4 = 595{,}45 - 210{,}44 = 385{,}01 \text{ mm}$

$J_c = J_c^{(1)} + J_c^{(2)} = \left(\frac{bh^3}{12} + bh(y_G^{(1)} - y_G)^2\right) + \left(\frac{bh^3}{12} + bh(y_G^{(2)} - y_G)^2\right) =$

$= \frac{0{,}9 \cdot 0{,}3^3}{12} + 0{,}9 \cdot 0{,}3\,(0{,}85 - 0{,}595)^2 + \frac{0{,}4 \cdot 0{,}7^3}{12} + 0{,}4 \cdot 0{,}7\,(0{,}35 -$

$-0{,}595)^2 = 0{,}0478 \text{ m}^4 = 47821969697 \text{ mm}^4$

$A_c = 550000 \text{ mm}^2$

$\sigma_c = \frac{-3054329}{550000} + \frac{730 \cdot 10^6}{47821969697} \cdot 385{,}01 = 11{,}43 \text{ MPa}$

$\alpha = \frac{E_{sp}}{E_{cm}} = \frac{196000}{22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0{,}3}} = \frac{196000}{22 \cdot \left(\frac{53}{10}\right)^{0{,}3}} = 5{,}4$

$\Delta\sigma_p = \frac{196000 \cdot 3{,}158 \cdot 10^{-4} + 5{,}4 \cdot 11{,}43 \cdot 1{,}901 + 64{,}53}{1 + 5{,}4 \cdot \frac{2224}{550000} \cdot \left(1 + 550000 \cdot \frac{385{,}01^2}{47821969697}\right)(1 + 0{,}8 \cdot 1{,}901)} = 201{,}21 \text{ MPa}$

$\sigma_p(\infty) = \sigma_{sp} - \Delta\sigma_p = 1378{,}88 - 201{,}21 = 1177{,}67 \text{ MPa}$