

MODULO SIGMAC PROCEDURA PREDIM

TEST CASES – ed. 8.25 10/2011

INDICE

Premessa	2
1 –TC PREDIM 1 – Ponte con travi H40/70 accostate.....	3
1.1 Parametri di confronto	3
1.1.1 Formule teoriche.....	3
1.1.1.1 Parametri 12 e 13 – indici di utilizzo delle sezioni di calcestruzzo.....	3
Calcestruzzo trave prefabbricata.....	4
Calcestruzzo del getto in opera.....	5
Calcolo zone di utilizzo delle fibre	5
Calcolo range di tensioni utilizzato.....	5
Calcolo precompressione necessaria.....	6
Cadute di precompressione.....	6
Escursione totale tensioni ai lembi:	7
Indice utilizzo trave:	7
Indice utilizzo soletta:	7
1.1.1.2 Parametro 10 – quantità di acciaio da precompressione	7
1.1.1.3 Parametro 11 – quantità di acciaio lento nella trave prefabbricata	7
1.1.2 Effetto globale	8
1.2 Risultati della procedura	11
1.2.1 Formule teoriche.....	11
1.2.2 Effetto globale	12
2 –TC PREDIM 2 – impalcato con 7 travi a T – L=20m.....	15
2.1 Parametri di confronto	15
2.1.1 Formule teoriche.....	15
2.1.1.1 Parametri 12 e 13 – indici di utilizzo	15
Calcolo zone di utilizzo delle fibre	15
Calcolo range di tensioni utilizzato.....	16
Calcolo precompressione necessaria.....	16
Cadute di precompressione.....	17
Escursione totale tensioni ai lembi:	17
Indice utilizzo trave:	17
Indice utilizzo soletta:.....	17
2.1.1.2 Parametro 10 – quantità di acciaio da precompressione	18
2.1.1.3 Parametro 11 – quantità di acciaio lento	18
2.1.2 Effetto globale	18
2.2 Risultati della procedura	21
2.2.1 Formule teoriche.....	21
2.2.2 Effetto globale	21
3 –TC PREDIM 3 – impalcato con 3 travi a V – L=30m.....	23
3.1 Parametri di confronto	23
3.1.1 Formule teoriche.....	23
3.1.1.1 Parametri 12 e 13 – indici di utilizzo delle sezioni di calcestruzzo.....	23
Calcolo zone di utilizzo delle fibre	23
3.1.1.1.1 Trave di bordo n. 3.....	24
Calcolo range di tensioni utilizzato.....	24
Calcolo precompressione necessaria.....	24
Cadute di precompressione.....	25
Escursione totale tensioni ai lembi:	25
Indice utilizzo trave:	25
Indice utilizzo soletta:.....	25
3.1.1.1.2 Trave centrale n. 2	26
Calcolo range di tensioni utilizzato.....	26

Calcolo precompressione necessaria.....	26
Cadute di precompressione	27
Escursione totale tensioni ai lembi:	27
Indice utilizzo trave:	27
Indice utilizzo soletta:	27
3.1.1.2 Parametro 10 – quantità di acciaio da precompressione	27
3.1.1.4 Parametro 11 – quantità di acciaio lento nella trave prefabbricata	28
3.1.2 Effetto globale	28
3.2 Risultati della procedura	30
3.2.1 Formule teoriche	30
3.2.2 Effetto globale	30

Premessa

La funzione di predimensionamento impalcati (PREDIM) è inserita nel modulo SIGMAC di ENG.

La procedura fornisce alcuni parametri significativi del dimensionamento di un impalcato partendo dalla minima quantità di dati possibile e ponendo come default degli altri dati necessari dei valori medi rispetto alla casistica degli impalcati a travi prefabbricate in c.a.p.

La procedura è applicabile a impalcati stradali a campata singola, con pianta in retto.

I parametri caratteristici forniti dalla procedura sono:

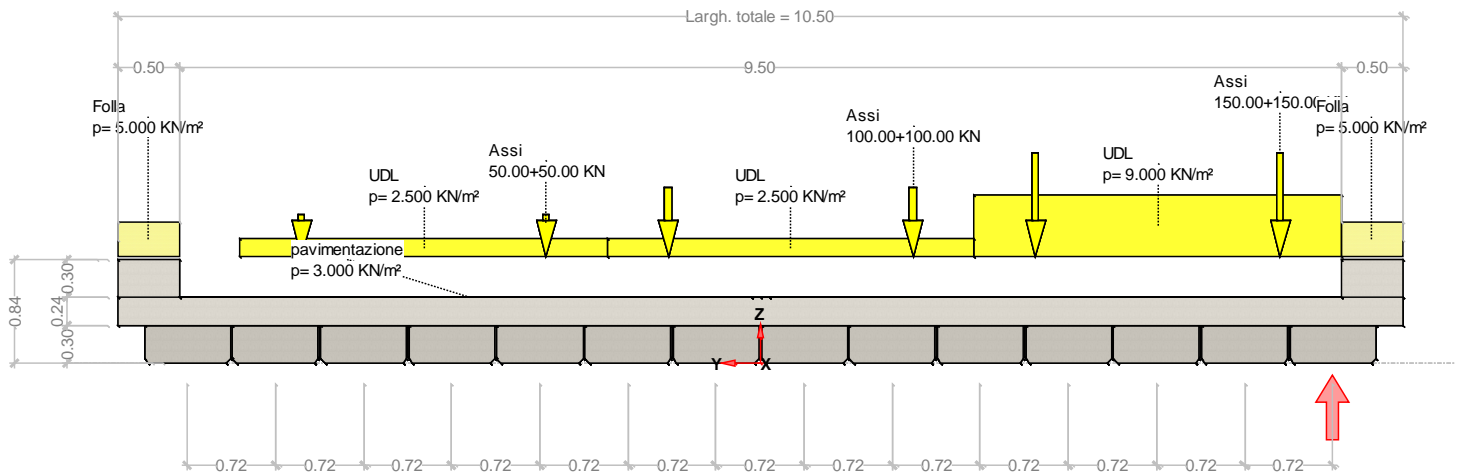
- 1) momento flettente in mezzeria della trave più sollecitata, situazione SLU P/T, conseguente a tutti i carichi di 1^a e 2^a fase applicati, compreso peso proprio struttura;
- 2) taglio massimo all'appoggio, situazione SLU P/T, conseguente a tutti i carichi di 1^a e 2^a fase applicati, compreso peso proprio struttura;
- 3) momento flettente di 1^a fase nella stessa trave di 1) e 2), situazione SLE rara, conseguente al peso proprio trave, carico aggiuntivo eventuale di 1^a fase, peso getto;
- 4) momento flettente di 2^a fase, situazione SLE rara, conseguente ai carichi aggiuntivi distribuiti di 2^a fase, alla pavimentazione, ai carichi lineari aggiuntivi, ai carichi da traffico;
- 5) freccia massima relativa al passaggio dei carichi da traffico (gruppo 1);
- 6) reazione minima verticale all'appoggio della stessa trave, data dalle combinazioni in situazione SLU P/T, o, se peggiore, data dalla combinazione sismica, effetto verticale negativo (verso l'alto);
- 7) reazione massima verticale all'appoggio stessa trave, data dalle combinazioni in situazione SLU P/T, o, se peggiore, data dalla combinazione sismica, effetto verticale positivo;
- 8) reazione massima longitudinale (frenatura) totale data dalle combinazioni in situazione SLU P/T, o, se peggiore, data dalla combinazione sismica, effetto longitudinale;
- 9) reazione massima trasversale (forza centrifuga + vento) totale su una spalla, data dalle combinazioni in situazione SLU P/T, o, se peggiore, data dalla combinazione sismica, effetto trasversale totale;
- 10) quantità, in kilogrammi al metro, di acciaio per c.a.p. nel prefabbricato;
- 11) quantità, in kilogrammi al metro, di acciaio per armatura lenta tipo B450C nel prefabbricato;
- 12) *Indice di utilizzo della trave* è un parametro calcolato facendo il rapporto dell'escursione totale di tensione longitudinale nelle fibre critiche nella vita del prefabbricato e dell'escursione massima compatibile con le tensioni limite nelle varie fasi. Quando questo indice vale 1.00 il profilo del prefabbricato è al suo utilizzo ottimale; valori minori di 1.00 indicano un sottoutilizzo, valori maggiori indicano che la soluzione può essere inadeguata;
- 13) *Indice di utilizzo della soletta* è dato dal rapporto tra la tensione longitudinale di compressione al lembo superiore in esercizio (situazione SLE rara) e la tensione limite del calcestruzzo.

I parametri 1-9 sono risultati diretti del calcolo del modulo SIGMAC, per cui si rimanda ai test cases di tale modulo per la verifica di correttezza.

Scopo di questo insieme di test è di verificare la correttezza dei parametri 12-13 e 10-11.

1 -TC PREDIM 1 - Ponte con travi H40/70 accostate

Luce tra gli appoggi in direzione X = 1000 [cm]
Lunghezza travi = 1060
Larghezza carreggiata = 1050 [cm]
Carichi di 1^a categoria stradale.
Trave prefabbricata cls C45/55
Getto in opera cls C28/35
Acciaio per c.a.p. $f_{pyk} = 1860$ [N/mm²]



1.1 Parametri di confronto

- C1. Correttezza applicazione formule teoriche
- C2. Atteso effetto globale

Il criterio di verifica C1 tende a garantire la correttezza dell'implementazione del percorso teorico di predimensionamento, mentre il criterio C2 dà una validazione del percorso teorico stesso e dimostra l'affidabilità della funzione del programma nell'attività di predimensionamento degli impalcati.

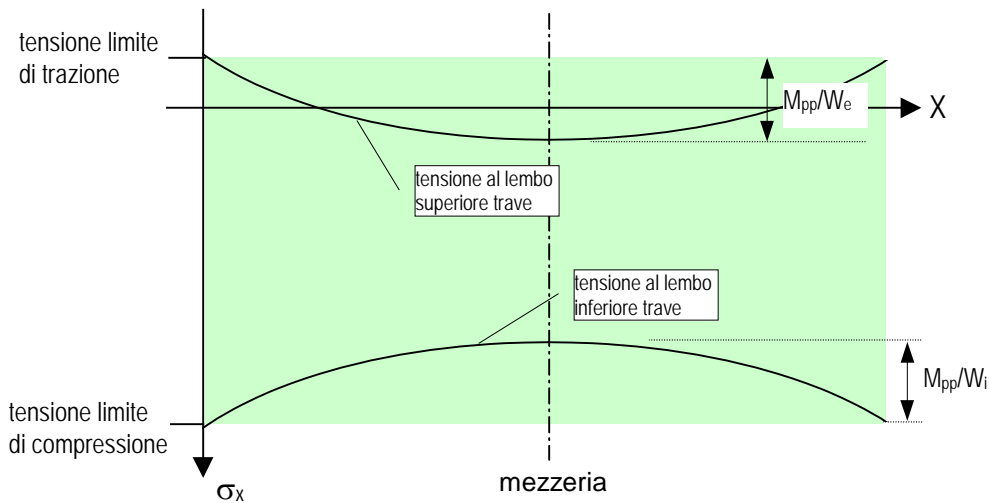
1.1.1 Formule teoriche

1.1.1.1 Parametri 12 e 13 - indici di utilizzo delle sezioni di calcestruzzo

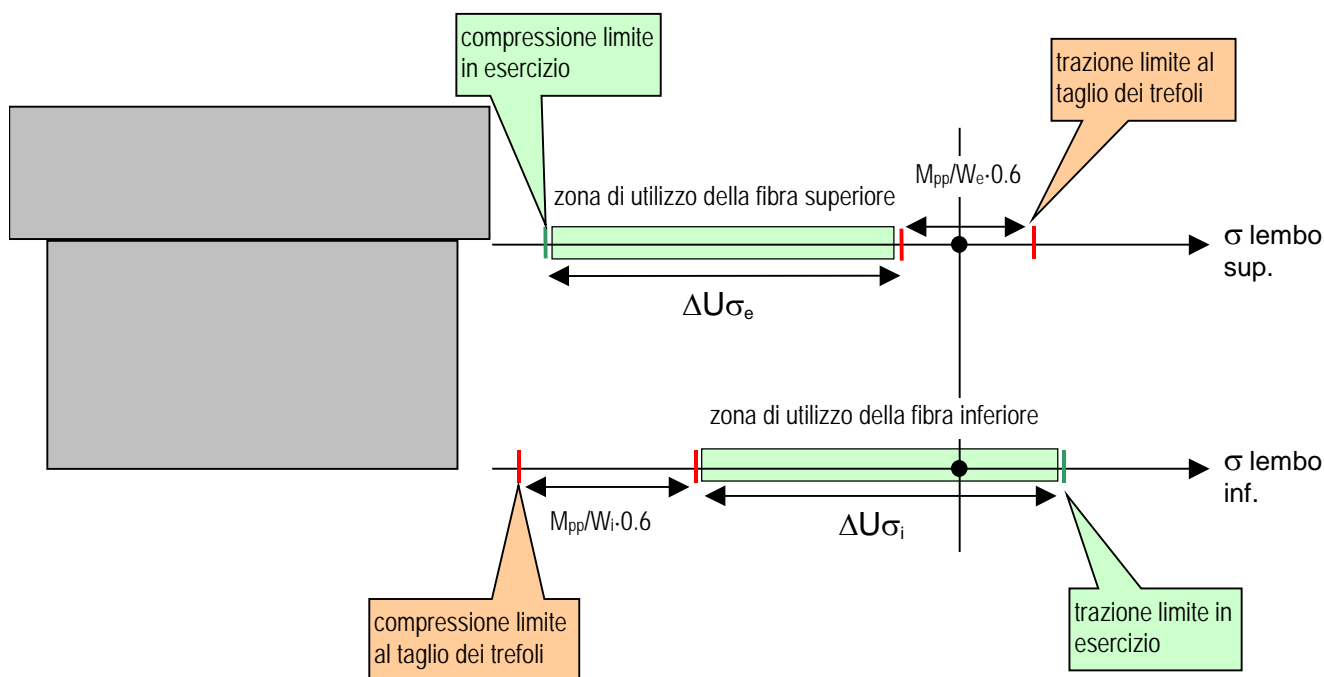
L'indice di utilizzo della trave è dato dal più alto rapporto tra l'escursione di tensione longitudinale massima che si verifica nella vita della struttura in situazione Rara nelle fibre delle sezioni e l'escursione massima consentita dalla normativa in termini di tensioni limite.

Il calcolo dell'indice più restrittivo fra tutti quelli individuabili nelle travi viene eseguito nella mezzeria della trave più sollecitata. Nel caso di travi prefabbricate a sezione per lo più costante sulla lunghezza e nel caso di precompressione a fili aderenti il raggiungimento delle tensioni limite nella sezione di mezzeria non rappresenta la situazione più restrittiva, come si può vedere dalla figura seguente, in cui M_{pp} rappresenta il momento flettente in mezzeria della trave dovuto al peso proprio:

**STATO TENSIONALE LIMITE
AL TAGLIO DEI TREFOLI**



Per limitare le tensioni alle testate della trave si ricorre usualmente all'inguinamento di alcuni trefoli vicino alle estremità, e quindi all'annullamento del loro effetto in quelle sezioni. Tenendo conto della situazione appena illustrata, le zone tensionali di utilizzo delle fibre della sezione di mezzeria vengono scelte come illustrato nella figura seguente



Parametri assunti per default:

R_{ckj} resistenza cls al taglio dei trefoli	$0.73 \cdot R_{ck28}$
tesatura iniziale acciaio da precompressione	14250 [daN/cm ²]
tensione di lavoro armatura lenta (parametro 11)	2600 [daN/cm ²]

Calcestruzzo trave prefabbricata

Resistenza caratteristica cilindrica a compressione:

a tempo infinito	f_{ck}	$= 0.83 \cdot R_{ck}$	$= 0.83 \cdot 550 = 456.50$	daN/cm ²
al taglio dei trefoli	f_{ckj}	$= 0.83 \cdot R_{ckj}$	$= 0.83 \cdot 401.5 = 333.24$	daN/cm ²

tensioni limite di compressione:

a tempo infinito	σ_c	$< 0.6 \cdot f_{ck}$ (NTC2008-4.1.2.2.5.1)	≤ 273.90	[daN/cm ²]	(per comb. caratteristica rara)
al taglio dei trefoli	σ_{cj}	$< 0.7 \cdot f_{ckj}$ (NTC2008-4.1.8.1.4)	≤ 233.27	[daN/cm ²]	

I valori indicati nei prospetti precedenti vanno presi con segno negativo, cioè di compressione.

tensioni limite di trazione (cfr. NTC2008-11.2.10.2):

a tempo infinito	$f_{ctm} = 1.2 \cdot \{(0.30 \cdot f_{ck}^{2/3}) \cdot 0.7\}$ [N/mm ²]	32.19 [daN/cm ²]
al taglio dei trefoli	$f_{ctmj} = 1.2 \cdot \{(0.30 \cdot f_{ckj}^{2/3}) \cdot 0.7\}$ [N/mm ²]	26.10 [daN/cm ²]

Il valore tra parentesi graffe rappresenta il frattile 5% della resistenza media a trazione assiale.

Il moltiplicatore 1.2 trasforma il valore precedente in resistenza a trazione per flessione.

Calcestruzzo del getto in opera

f_{ck}	$= 0.83 \cdot R_{ck}$	$= 0.83 \cdot 350 = 290.50$	daN/cm ²
----------	-----------------------	-----------------------------	---------------------

tensioni limite di compressione:

σ_c	$< 0.6 \cdot f_{ck}$ (NTC2008-4.1.2.2.5.1)	≤ 174.30	[daN/cm ²]	(per comb. caratteristica rara)
------------	--	---------------	------------------------	---------------------------------

Viene assunto un coefficiente di omogeneizzazione dei 2 calcestruzzi uguale a 1.0

Calcolo zone di utilizzo delle fibre

Per comodità di calcolo manuale la sezione della trave prefabbricata in prima fase viene considerata senza smussi agli spigoli inferiori, e quindi un rettangolo 70x30 cm.

I momenti positivi tendono le fibre inferiori della trave.

$$M_{pp} = 1/8 \cdot (70 \cdot 30 \cdot 0.00245) \cdot 1000^2 = 643125 \text{ [daN-cm]}$$

$$W_e = -10500 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_i = 10500$$

Zona tensionale di utilizzo della fibra superiore:

$$\sigma_{minima} = -273.90$$

$$\sigma_{massima} = 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = -10.65$$

$$\Delta U \sigma_e = 263.25 \text{ [daN/cm}^2\text{]}$$

Zona tensionale di utilizzo della fibra inferiore:

$$\sigma_{minima} = -233.27 + M_{pp} / W_i \cdot 0.6 = -196.52$$

$$\sigma_{massima} = 32.19$$

$$\Delta U \sigma_i = 228.71$$

Calcolo range di tensioni utilizzato

Momento di 1^a fase (escluso peso proprio):

$$M_1 = 1/8 \cdot (93 \cdot 24 \cdot 0.00245) \cdot 1000^2 = 683550 \text{ [daN-cm]}$$

Delta tensionale ai lembi sezione trave:

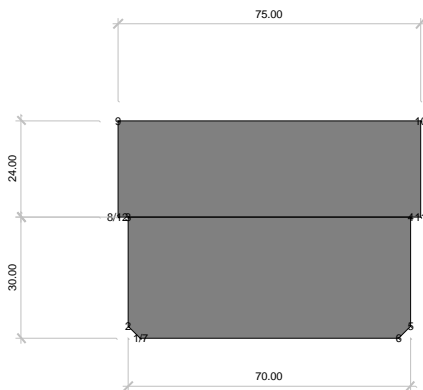
$$\Delta \sigma_{e,1} = M_1 / W_e = -65.10$$

$$\Delta \sigma_{i,1} = M_1 / W_i = 65.10$$

Momento di 2^a fase (permanenti + carichi da traffico):

$$M_2 = 3375166 \text{ [daN-cm]}$$

La procedura di predimensionamento valuta lo stato tensionale su una sezione trave+soletta "media", cioè ripartendo la soletta equamente tra le travi. Nel caso in esame la larghezza soletta collaborante è pari a 10.50/14 m.



Area= 3891.00

Coordinate baricentro: x= 0.00 y= 27.52

$J_{xx} = 944148.20$

$J_{yy} = 1690842.00$

lembo sup. soletta	$W_{s,2} = -35655$	$\Delta\sigma_{s,2} = M_2 / W_{s,2} = -94.66$
lembo sup. trave	$W_{e,2} = -380704$	$\Delta\sigma_{e,2} = M_2 / W_{e,2} = -8.87$
lembo inf. trave	$W_{i,2} = 34308$	$\Delta\sigma_{i,2} = M_2 / W_{i,2} = 98.38$

Calcolo precompressione necessaria

Il calcolo della precompressione minima necessaria è teso a cercare la minima armatura disposta con la massima eccentricità della risultante di precompressione, che comunque dovrà restare al di sopra di una certa distanza dal lembo inferiore della sezione.

tensione massima al taglio trefoli al lembo sup. :

$$\sigma_e = 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = -10.65$$

tensione massima al taglio trefoli al lembo inf. per arrivare alla decompressione in esercizio:

$$\sigma_i = 0 - 65.10 - 98.38 = -163.48$$

$$N_p = \frac{\sigma_i \cdot W_i - \sigma_e \cdot W_e}{W_i - W_e} \cdot A_{trave}$$

$$M_p = \frac{(\sigma_e - \sigma_i) \cdot W_e \cdot W_i}{W_i - W_e} - M_{pptrave}$$

da cui:

$$N_p = -87.06 \cdot (70 \cdot 30) = -182836 \text{ [daN]}$$

$$M_p = -802357 - 643125 = -1445482 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

La eccentricità della precompressione risulta:

$$e_p = M_p / N_p = -7.91 \text{ [cm]} \text{ dal baricentro sezione}$$

e la quota del cavo risultante è:

$$y_p = 15 - 7.91 = 7.09 \text{ [cm]} \text{ dal fondo sezione}$$

che è posizionato molto in basso, vicino al lembo inferiore della sezione. La procedura prevede in questo caso una correzione, imponendo un limite inferiore compatibile con il necessario copriferro delle armature, l'interfero dei trefoli di precompressione.

Si riposiziona la risultante di precompressione a 10 cm dal lembo inferiore della sezione:

$$N'_p = N_p \left\{ 1 + \frac{(y_{p \min} - y_p) \cdot A_{trave}}{W_i - (y_{p \min} - y_g) \cdot A_{trave}} \right\}$$

$$N'_p = -182836 \cdot [1 + (10 - 7.09) \cdot 2100 / \{10500 - (10 - 15) \cdot 2100\}] = -182836 \cdot 1.291 = -236041 \text{ [daN]}$$

$$M'_p = -236041 \cdot (15 - 10) = -1180206 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

valori che diventano perciò i nuovi N_p, M_p con $y_p = 10.0$ nuova posizione della risultante.

Cadute di precompressione

In questo calcolo di test si assume un valore globale delle cadute di tensione pari al 20% della tensione di tesatura iniziale, includendo in questo l'accorciamento elastico, rilassamento acciaio, ritiro e viscosità del calcestruzzo. Si assume inoltre che tali cadute avvengano tutte in prima fase, sulla sola trave.

In tale ipotesi si ha:

$$\Delta N_p = -N_p \cdot 0.2 = 47208 \text{ [daN]}$$

$$\Delta M_p = -M_p \cdot 0.2 = 236041 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

e le variazioni di tensione ai lembi valgono:

$$\Delta \sigma_e = \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_e = 0.00$$

$$\Delta \sigma_i = \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_i = 44.96$$

Escursione totale tensioni ai lembi:

$$\Delta \sigma_{s,tot} = -94.66$$

$$\Delta \sigma_{e,tot} = -65.10 - 8.87 - 0.00 = -73.97$$

$$\Delta \sigma_{i,tot} = 65.10 + 98.38 + 44.96 = 208.44$$

Indice utilizzo trave:

$$U_e = 73.97 / 263.25 = 0.281$$

$$U_i = 208.44 / 228.71 = 0.911 \text{ <---- valore T1 di confronto vedi par. 1.2.1}$$

Indice utilizzo soletta:

$$U_s = 94.66 / 174.30 = 0.543 \text{ <---- valore T2 di confronto vedi par. 1.2.1}$$

1.1.1.2 Parametro 10 – quantità di acciaio da precompressione

In base alle considerazioni del paragrafo precedente la quantità di acciaio da precompressione può essere valutata a partire dal valore di N_p ivi calcolato, dalla tensione di tesatura dell'acciaio assunta pari a 14250 [daN/cm²], e dalle cadute di tensione, valutate complessivamente pari al 20% di tale valore.

Con queste assunzioni, peraltro bene aderenti alle situazioni correnti, l'area necessaria è:

$$A_p = 236041 / (14250 \cdot 0.80) = 20.71 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ <---- valore T3a di confronto vedi par. 1.2.1}$$

$$y_p = 10.0 \text{ [cm]} \text{ dal fondo trave <---- valore T3b di confronto vedi par. 1.2.1}$$

e, in termini di peso di materiale:

$$P'_{sp} = 15.95 \text{ [kg/m]}$$

Per tenere conto di sfrido ed un margine di tolleranza (15% in totale) si ha:

$$P_{sp} = 18.34 \text{ [kg/m]} \text{ <---- valore T4 di confronto vedi par. 1.2.1}$$

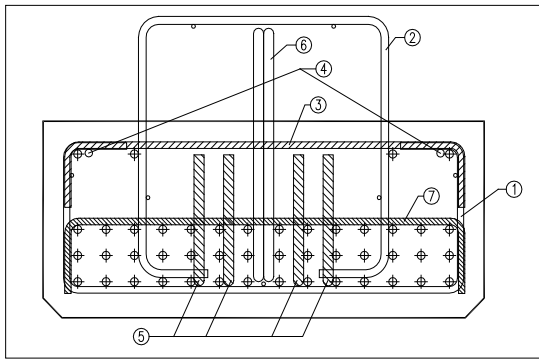
1.1.1.3 Parametro 11 – quantità di acciaio lento nella trave prefabbricata

Il programma non ha dati sufficienti per computare correttamente l'armatura lenta ed esegue perciò una valutazione approssimativa in base al valore massimo del taglio all'appoggio.

La disposizione delle armature a taglio, di frettaggio e lente in genere è molto variabile a seconda delle scelte e considerazioni di ogni singolo progettista. In questo caso vengono utilizzati i criteri ed i calcoli di un prefabbricatore. L'armatura lenta viene dimensionata per contenere gli sforzi di scorrimento all'interno della trave e tra trave e soletta tramite staffe verticali, armatura di frettaggio nelle testate, armatura longitudinale inferiore all'appoggio che consente di realizzare il meccanismo a traliccio in zona non precompressa, armatura di sollevamento.

Il dimensionamento delle staffe risulta il minimo da normativa in quanto la disposizione delle travi in accostamento l'un l'altra riduce molto la sollecitazione tagliante e torcente.

Nel seguito viene riportato un computo reale di armatura che include staffe secondarie, armatura longitudinale di confezione, ganci di sollevamento ecc.



DISTINTA ARMATURE								
posizione	tipo	diametro	sviluppo	QUANTITA'			passo	peso
				testata sx	testata dx	totale		
1	rete	8	1.30	-	-	42	10/30	21.6
	rete	6	10.60	-	-	3	-	7.1
2	rete	12	1.34 39	-	-	48	10/20	57.1
	rete	8	10.60	-	-	4	-	16.7
3	staffa	8	0.84	-	-	42	10/30	13.9
4	correnti	12	10.54	-	-	2	-	18.7
5	aggiuntiva	16	1.80	2	2	4	-	11.4
6	sollevamento	22	1.50	2	2	4	s=368	17.9
7	frettaggio	10	0.84	3	3	6	10	3.1
	sussidiaria	16	0.00	-	-	0	-	0.0
	staffa-agg.	12	1.34	0	0	0	-	0.0

La quantità totale di acciaio lento indicata nella tabella di computo è di 168 [kg] pari a 15.80 [kg/m] <----
valore T5 di confronto vedi par. 1.2.1.

1.1.2 Effetto globale

Per effetto globale si intende in questo ambito la verifica completa dell'impalcato, condotta con altri strumenti alternativi alla procedura PREDIM in esame, che deve portare a risultati congruenti con quelli della procedura stessa.

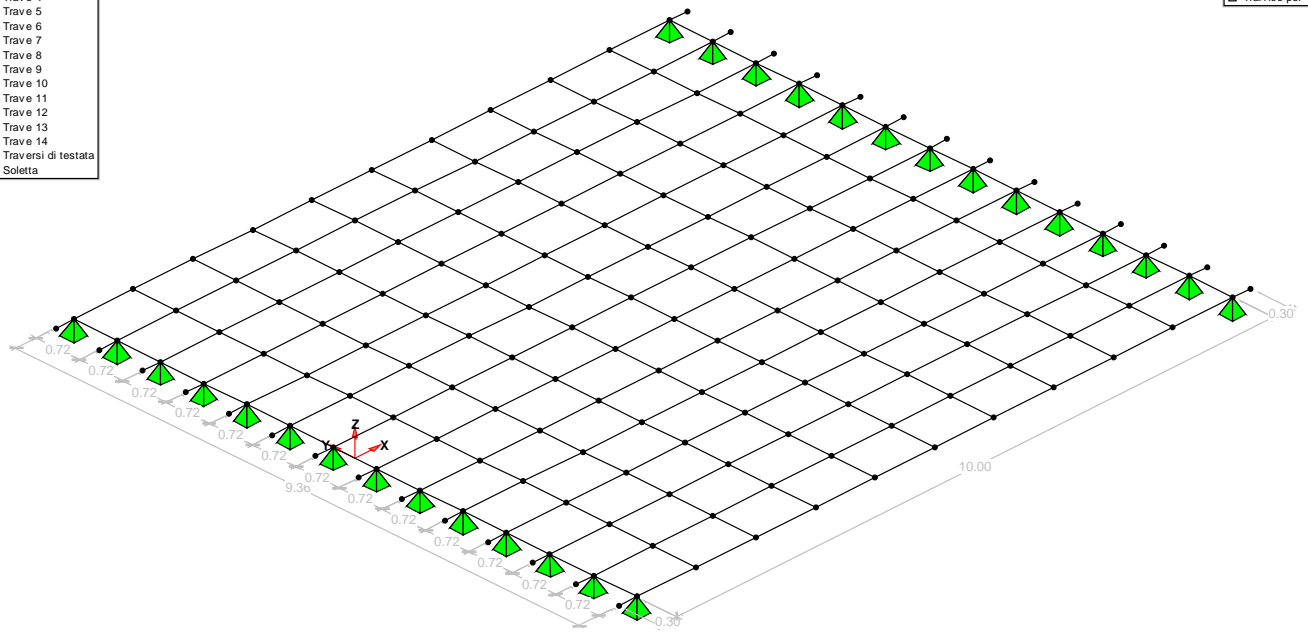
Poichè la procedura PREDIM utilizza la procedura SIGMAC70, cioè l'algoritmo di calcolo delle sollecitazioni sull'impalcato con il metodo di Massonnet del modulo SIGMAC, è necessario ricorrere ad un altro solutore per determinare le sollecitazioni. Viene scelto il modulo GRAT di ENG, ed il modulo TCAP per condurre la verifica tensionale.

Il modello di calcolo della struttura è costituito da un graticcio di aste sollecitate da carichi agenti in direzione verticale; le travi principali sono costituite da una sequenza di aste allineate disposte tra due appoggi, mentre la soletta che le lega insieme è stata discretizzata in aste che ne concentrano l'effetto di ripartizione ogni metro. Ne risulta un modello con 311 aste e 182 nodi.

La luce di calcolo è di 10 [m].

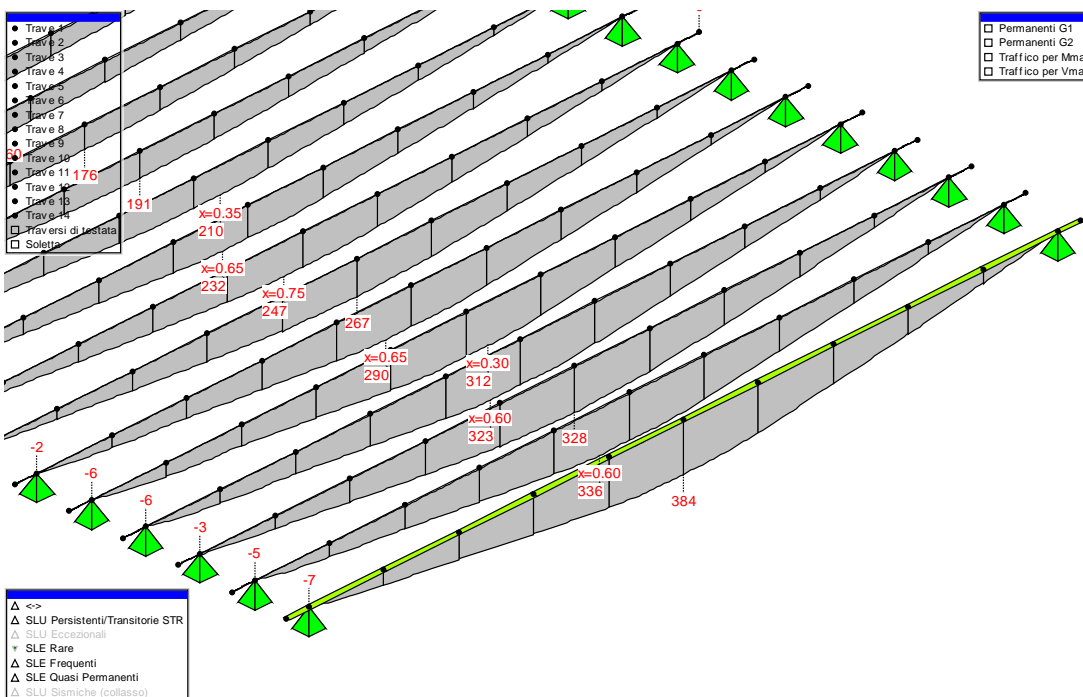
- Trave 1
- Trave 2
- Trave 3
- Trave 4
- Trave 5
- Trave 6
- Trave 7
- Trave 8
- Trave 9
- Trave 10
- Trave 11
- Trave 12
- Trave 13
- Trave 14
- Traversi di testata
- Soletta

- Permanenti G1
- Permanenti G2
- Traffico per Mmax
- Traffico per Vmax



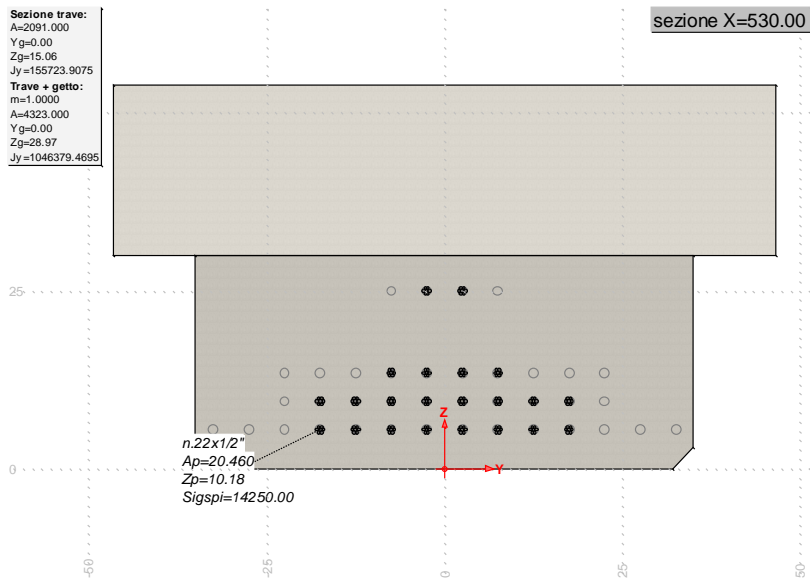
I carichi vengono applicati alle aste che rappresentano le travi principali, rispettandone la distanza dagli assi degli appoggi sulle spalle.

Il calcolo porta ad una ripartizione dei carichi permanenti e da traffico che evidenzia una maggiore sollecitazione sulla trave di bordo. Si noti che questo modello mette in conto la maggiore rigidezza flessionale della trave di bordo rispetto a quelle interne data dal fatto che la soletta collaborante presenta uno sbalzo. Questa configurazione fa sì che l'elemento più rigido venga più sollecitato a vantaggio delle travi più vicine.

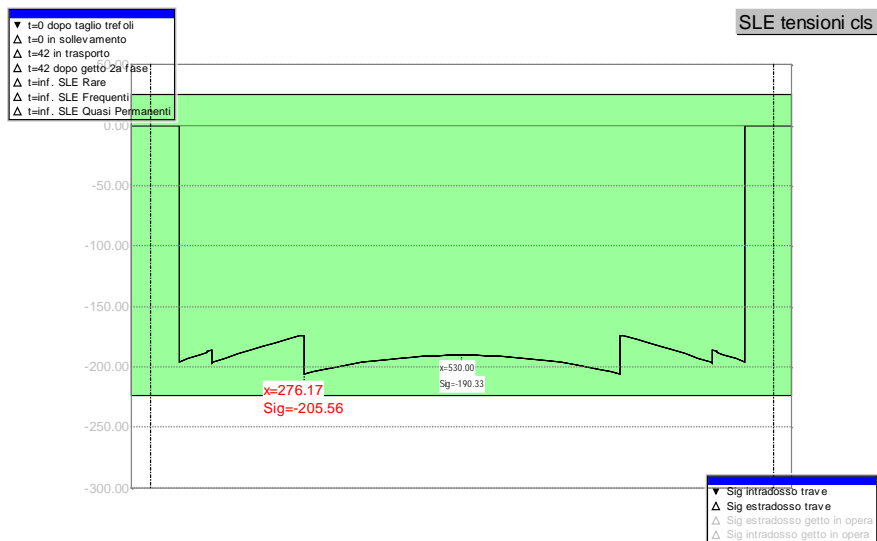
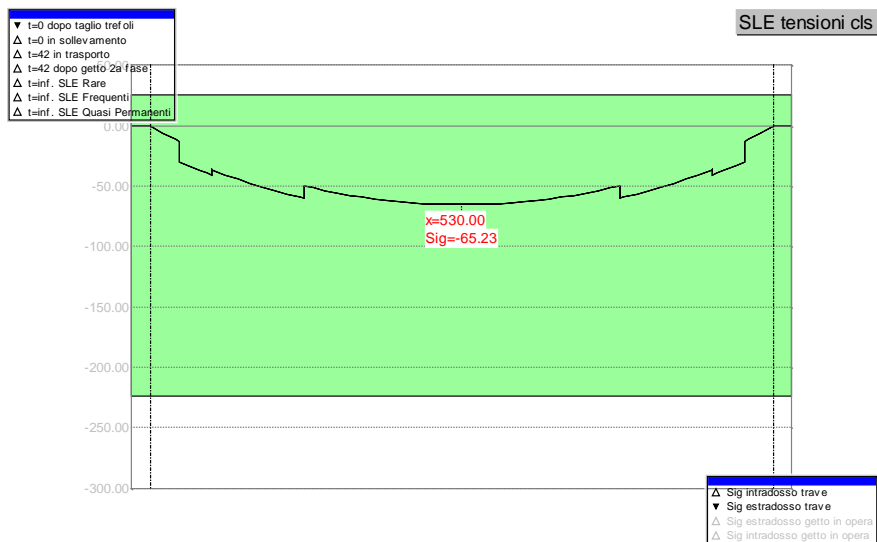


Dovendo eseguire un calcolo il cui fine è quello di valutare la complessiva ottimizzazione degli elementi ed operare la giusta scelta in fase di dimensionamento, si dovrà eseguire la verifica di resistenza della trave di bordo che è quella che impone la scelta più restrittiva.

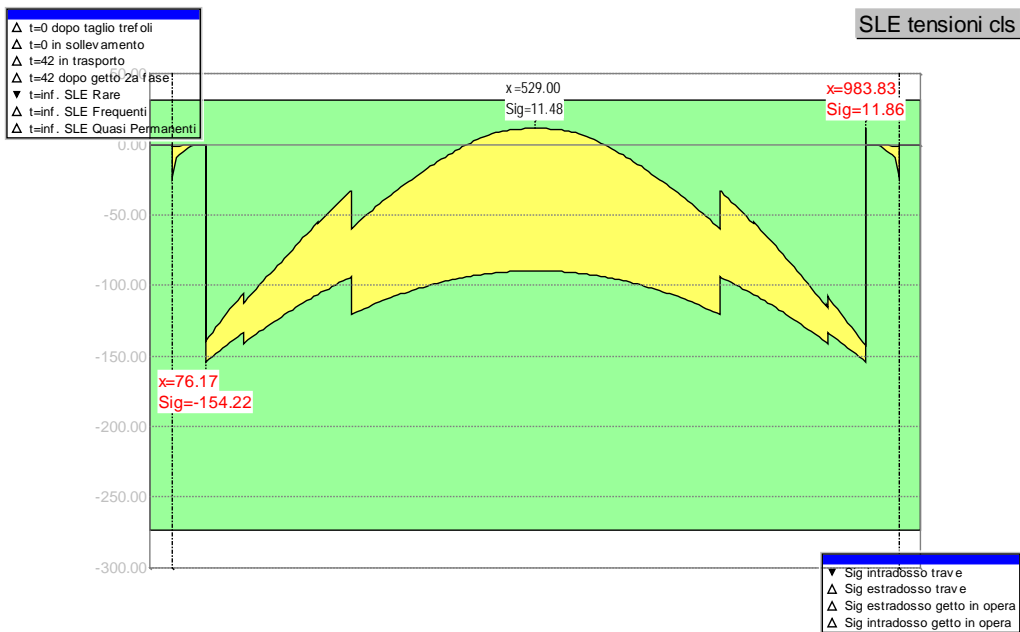
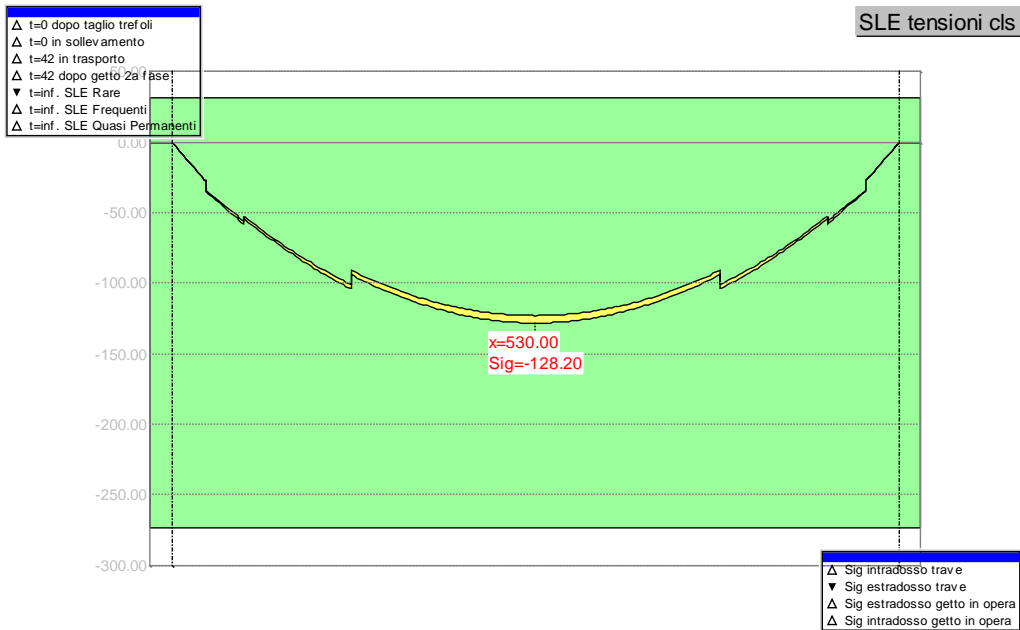
Viene disposta un'armatura di precompressione in modo da avere soddisfatta la verifica tensionale e a rottura delle sezioni.



Si inseriscono 22 trefoli da 1/2" con baricentro posizionato a 10.18 cm dal bordo inferiore della trave. La verifica viene riassunta nei grafici seguenti.



La neutralizzazione di alcuni trefoli in testata ha permesso di non superare la compressione limite del calcestruzzo nella zona delle testate della trave.



L'analisi alternativa qui esposta ha espresso un dimensionamento delle armature di precompressione che ha portato ad uno stato tensionale ottimale sia in fase di rilascio della precompressione che in fase di esercizio. Una serie di analisi condotte aumentando la luce ha portato a considerare 10.80 [m] la luce limite per questo tipo di struttura.

1.2 Risultati della procedura

1.2.1 Formule teoriche

La procedura di predimensionamento applicata all'impalcato rappresentato in 1.1.1 produce il seguente output:

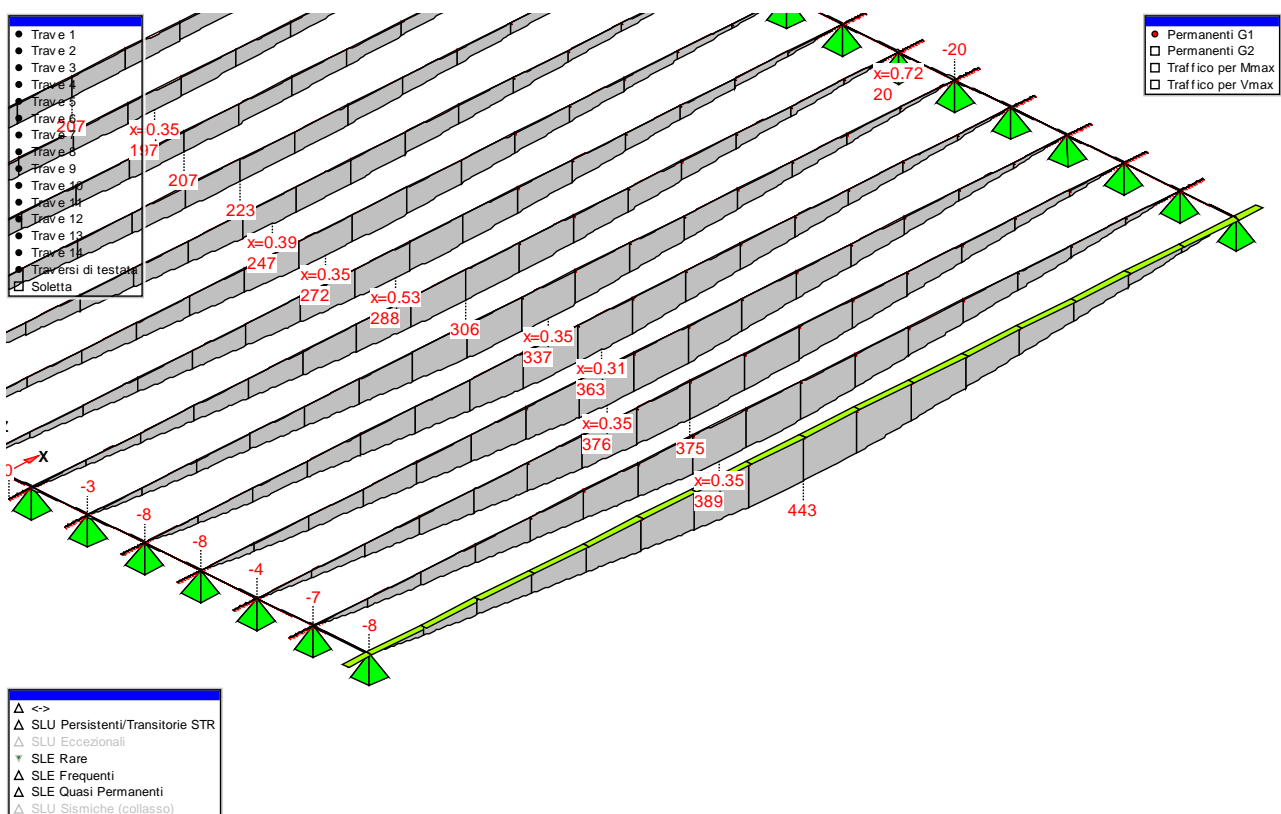
$M_{U,2,2}^a$ fase SLU	6373342.03	trave 1
$V_{x=0,2}^a$ fase SLU	26389.07	trave 1 ($T_{corr.}=127015.95$)

$M_{L/2,1}^a$ fase SLE rara	1325269.69	trave 1
$M_{L/2,2}^a$ fase SLE rara	3439539.56	trave 3
F_{max} (gruppo 1)	0.9114	(1/1097·L)
R_{min} verticale trave	8699.34	trave 8
R_{max} verticale trave	27216.64	trave 1
R_{max} long. totale	52245.00	
R_{max} trasv. spalla	0.00	
Acciaio per c.a.p.	18.38 [kg/m] <---- valore T4 di confronto vedi par. 1.1.1.2	$A_p=20.361$ $Y_p=10.00$ <----valori T3a,T3b
Acciaio B450C	13.69 [kg/m] <---- valore T5 di confronto vedi par. 1.1.1.3	
indice utilizzo trave	0.91 <---- valore T1 di confronto vedi par. 1.1.1.1	
indice utilizzo soletta	0.55 <---- valore T2 di confronto vedi par. 1.1.1.1	

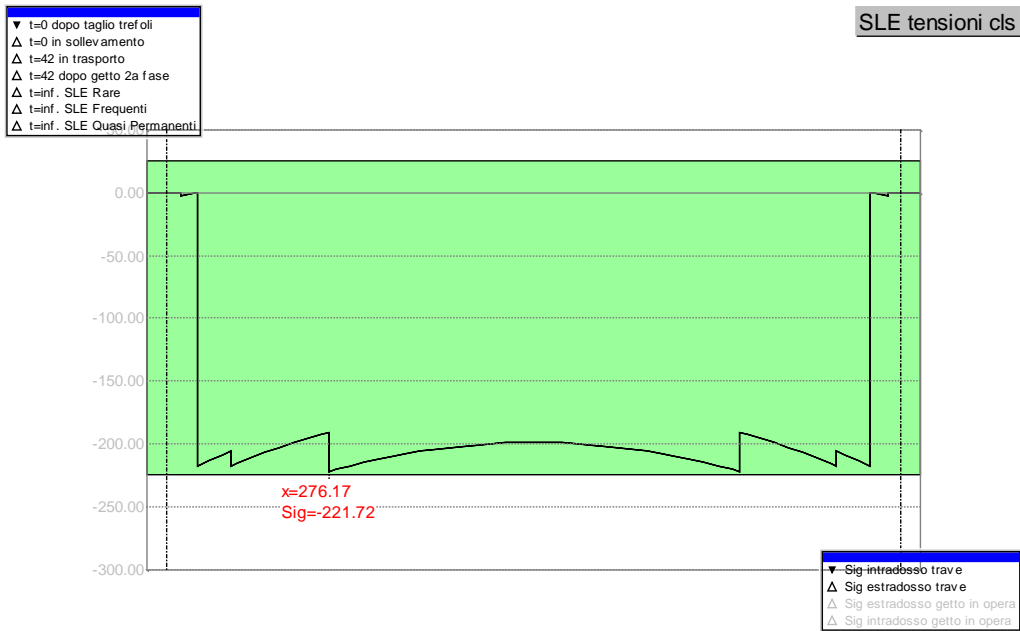
1.2.2 Effetto globale

Come riportato nel paragrafo precedente la procedura indica un indice utilizzo del prefabbricato pari a 0.91, valore abbastanza prossimo a 1.0, che rappresenta la soluzione ottima per il prefabbricato. Per valutare l'efficacia della procedura di predimensionamento è necessario individuare il punto di superamento del limite della soluzione adottata. A questo scopo viene condotto il calcolo alternativo esposto in 1.1.2 aumentando la luce di calcolo.

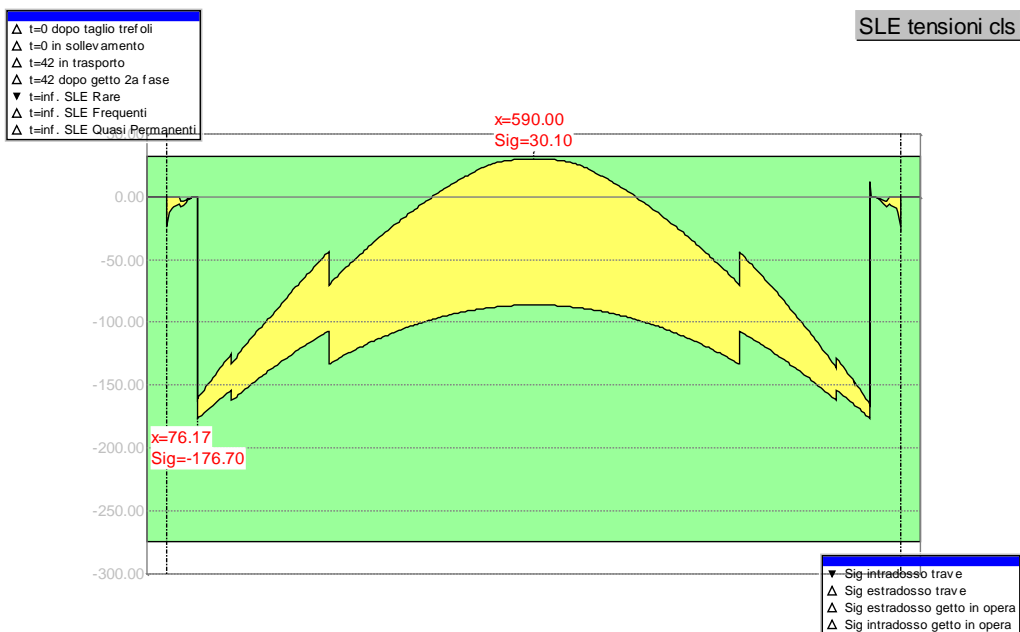
Eseguendo perciò il calcolo con una luce di 11.20 m si ottiene:



Conducendo l'analisi fino alla verifica delle sezioni si converge ad una disposizione di armatura da precompressione che è uguale per quantità di trefoli a quella con luce di calcolo di 10 m ma con risultante più bassa, quindi con maggiore eccentricità sulla sezione della trave. L'andamento delle tensioni longitudinali al lembo inferiore della trave al taglio dei trefoli risulta "al limite":



mentre l'andamento della tensione nella stessa fibra in esercizio è rappresentata dal diagramma seguente:



che pure rappresenta una situazione "al limite".

Si può concludere che la luce di calcolo di 11.20 m è una soluzione "al limite" per questa soluzione strutturale, almeno per ciò che riguarda lo stato tensionale dei prefabbricati. Peraltro c'è da notare che anche le deformazioni sotto l'azione dei carichi da traffico sono forse eccessive, risultando 1.26 cm (1/888 della luce).

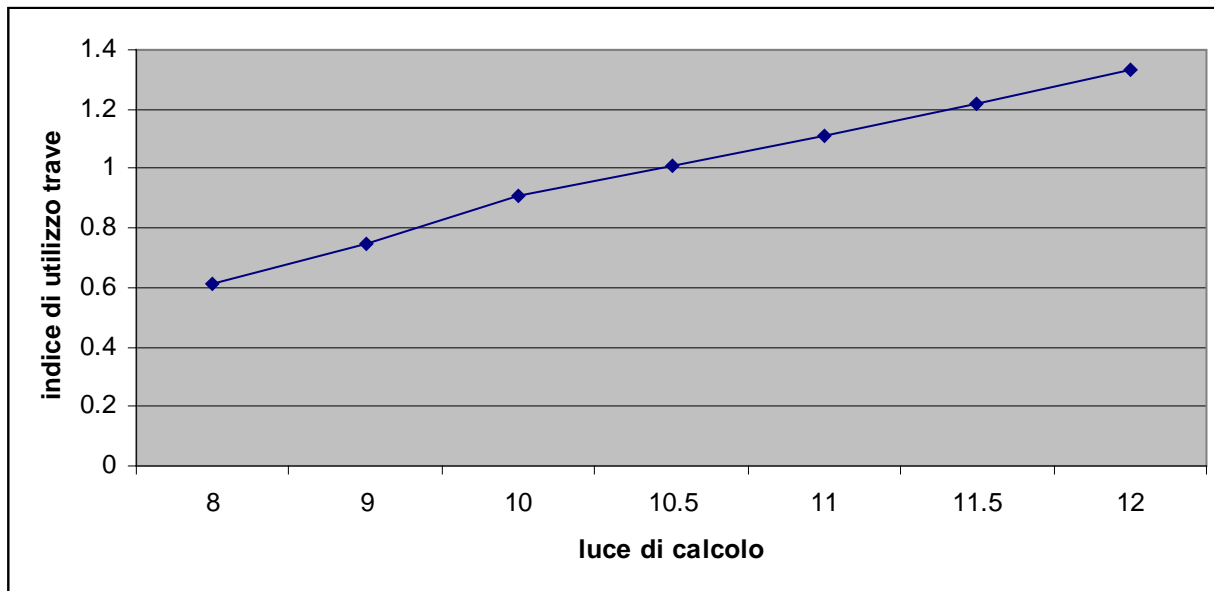
La procedura in esame, nel caso di luce di calcolo pari a 11.20 m, evidenzia i seguenti dati:

$M_{L/2,2}^a$ fase SLU	7637005.28	trave 1
$V_{x=0,2}^a$ fase SLU	28077.13	trave 1 ($T_{corr.}=124905.10$)
$M_{L/2,1}^a$ fase SLE rara	1662418.30	trave 1
$M_{L/2,2}^a$ fase SLE rara	4084451.12	trave 3
F_{max} (gruppo 1)	1.3419	(1/835-L)
R_{min} verticale trave	9655.38	trave 8
R_{max} verticale trave	28929.07	trave 1
R_{max} long. totale	52682.40	

R _{max} trasv. spalla	0.00	
Acciaio per c.a.p.	22.43 [kg/m]	Ap=24.846 Yp=10.00
Acciaio B450C	14.03 [kg/m]	
indice utilizzo trave	1.15	
indice utilizzo soletta	0.66	

(risultati in [daN,cm])

con un indice di utilizzo della trave pari a 1.15: trave eccessivamente sfruttata.
 Per avere un indice pari a 1.00 la luce deve essere portata a 10.45 m.



Il confronto tra il risultato ottenuto in 1.1.2 e quello ottenuto in questo paragrafo si ottiene un rapporto delle luci pari a:

$$1080/1045 = 1.033$$

ovvero la procedura PREDIM del modulo SIGMAC calcola un limite di utilizzo della struttura più cautelativamente (3%) del metodo alternativo.

2 -TC PREDIM 2 - impalcato con 7 travi a T - L=20m

Luce tra gli appoggi in direzione X = 2000 [cm]

Lunghezza travi = 2090 [cm]

Altezza travi prefabbricate = 120 [cm]

Larghezza carreggiata = 1150 [cm]

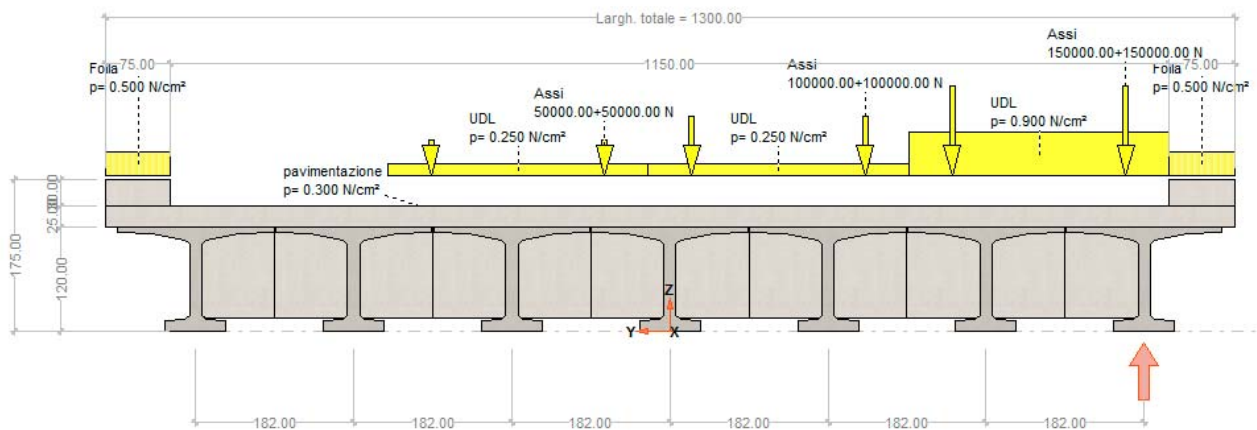
Carichi di 1^a categoria stradale.

Trave prefabbricata cls C45/55

Getto in opera cls C28/35

Acciaio per c.a.p. $f_{pyk} = 1860$ [N/mm²]

n. 1 traverso in mezzeria 25x105 [cm]



2.1 Parametri di confronto

C3. Correttezza applicazione formule teoriche

C4. Atteso effetto globale

Il criterio di verifica C1 tende a garantire la correttezza dell'implementazione del percorso teorico di predimensionamento, mentre il criterio C2 dà una validazione del percorso teorico stesso e dimostra l'affidabilità della funzione del programma nell'attività di predimensionamento degli impalcati.

2.1.1 Formule teoriche

2.1.1.1 Parametri 12 e 13 - indici di utilizzo

Tutti i dati dei materiali e le ipotesi fatte al paragrafo 1.1.1 del test precedente vengono mantenuti in questo test.

Calcolo zone di utilizzo delle fibre

dati trave prefabbricata - sezione in campata:

Xg	0.00	cm
Yg	71.84	cm
Area	4068.00	cm ²
Jx	8473239.51	cm ⁴
We	-175939	cm ³
Wi	117946	cm ³

I momenti positivi tendono le fibre inferiori della trave.

Si trascurano i tratti ringrossati in testata:

$$M_{pp} = 1/8 \cdot (4068 - 0.00245) \cdot 2000^2 = 4983300 \text{ [daN-cm]}$$

Zona tensionale di utilizzo della fibra superiore (pedice "e"):

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{minima}} &= -273.90 \\ \sigma_{\text{massima}} &= 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = 9.11 \\ \Delta U \sigma_e &= 283.00 \text{ [daN/cm}^2\text{]}\end{aligned}$$

Zona tensionale di utilizzo della fibra inferiore (pedice "i"):

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{minima}} &= -233.27 + M_{pp} / W_i \cdot 0.6 = -207.91 \\ \sigma_{\text{massima}} &= 32.19 \\ \Delta U \sigma_i &= 240.11\end{aligned}$$

Calcolo range di tensioni utilizzato

Momento di 1^a fase (soletta e traverso in campata, escluso peso proprio):

$$M_1 = 1/8 \cdot (195 \cdot 25 - 0.00245) \cdot 2000^2 + 927 \cdot 2000/4 = 6435375 \text{ [daN-cm]}$$

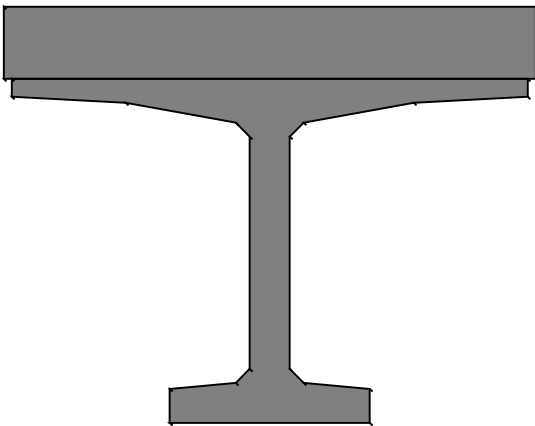
Delta tensionale ai lembi sezione trave:

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_{e,1} &= M_1 / W_e = -36.58 \\ \Delta \sigma_{i,1} &= M_1 / W_i = 54.56\end{aligned}$$

Momento di 2^a fase (permanenti + carichi da traffico):

$$M_2 = 23951083 \text{ [daN-cm]}$$

Ai fini della determinazione della sezione di verifica si assume, come fatto dalla procedura di predimensionamento, che la larghezza di soletta collaborante sia pari alla larghezza totale divisa per il numero delle travi $B = 1300/7 = 185.7 \text{ [cm]}$.



Unità di misura: [L]=cm [F]=N

Sezione di calcestruzzo:

$$\begin{aligned}\text{Area} &= 8710.50 \\ X \text{ baricentro} &= 0.00 \\ Y \text{ baricentro} &= 104.17 \\ J_{xx} &= 1.669196E7 \\ J_{yy} &= 1.742765E7\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{s,2} &= -408816 \text{ [cm}^3\text{]} \\ W_{e,2} &= -1054451 \text{ [cm}^3\text{]} \\ W_{i,2} &= 160238 \text{ [cm}^3\text{]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{lembo sup. soletta} & \quad \Delta \sigma_{s,2} = M_2 / W_{s,2} = -58.59 \\ \text{lembo sup. trave} & \quad \Delta \sigma_{e,2} = M_2 / W_{e,2} = -22.71 \\ \text{lembo inf. trave} & \quad \Delta \sigma_{i,2} = M_2 / W_{i,2} = 149.47\end{aligned}$$

Calcolo precompressione necessaria

Il calcolo della precompressione minima necessaria è teso a cercare la minima armatura disposta con la massima eccentricità della risultante di precompressione, che comunque dovrà restare al di sopra di una certa distanza dal lembo inferiore della sezione.

tensione massima (verso la trazione) al taglio trefoli al lembo sup. :

$$\sigma_e = 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = 9.11$$

tensione massima al taglio trefoli al lembo inf. per arrivare alla decompressione in esercizio:

$$\sigma_i = 0 - 54.56 - 149.47 = -204.03$$

$$N_p = \frac{\sigma_i \cdot W_i - \sigma_e \cdot W_e}{W_i - W_e} \cdot A_{trave} \qquad M_p = \frac{(\sigma_e - \sigma_i) \cdot W_e \cdot W_i}{W_i - W_e} - M_{pptrave}$$

da cui:

$$N_p = -76.43 \cdot 4068 = -310936 \text{ [daN]}$$

$$M_p = -15049878 - 4983300 = -20033178 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

La eccentricità della precompressione risulta:

$$e_p = M_p / N_p = 64.43 \text{ [cm]} \text{ dal baricentro sezione}$$

e la quota del cavo risultante è:

$$y_p = 71.84 - 64.43 = 7.41 \text{ [cm]} \text{ dal fondo sezione}$$

che è posizionato molto in basso, vicino al lembo inferiore della sezione. La procedura prevede in questo caso una correzione, imponendo un limite inferiore compatibile con il necessario copriferro delle armature, l'interfero dei trefoli di precompressione.

Si riposiziona la risultante di precompressione a 10 cm dal lembo inferiore della sezione:

$$N'_p = N_p \left\{ 1 + \frac{(y_{p\min} - y_p) \cdot A_{trave}}{W_i - (y_{p\min} - y_g) \cdot A_{trave}} \right\}$$

$$N'_p = -319797 \text{ [daN]}$$

$$M'_p = -319797 \cdot (71.84 - 10) = -19776252 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

valori che diventano perciò i nuovi N_p, M_p con $y_p = 10.0$ nuova posizione della risultante.

Cadute di precompressione

In questo calcolo di test si assume un valore globale delle cadute di tensione pari al 20% della tensione di tesatura iniziale, includendo in questo l'accorciamento elastico, rilassamento acciaio, ritiro e viscosità del calcestruzzo. Si assume inoltre che tali cadute avvengano tutte in prima fase, sulla sola trave.

In tale ipotesi si ha:

$$\Delta N_p = -N_p \cdot 0.2 = 63959 \text{ [daN]}$$

$$\Delta M_p = -M_p \cdot 0.2 = 3955250 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

e le variazioni di tensione ai lembi valgono:

$$\Delta \sigma_e = \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_e = -6.76$$

$$\Delta \sigma_i = \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_i = 49.26$$

Escursione totale tensioni ai lembi:

$$\Delta \sigma_{s,tot} = -58.59$$

$$\Delta \sigma_{e,tot} = -36.58 - 22.71 - 6.76 = -66.05$$

$$\Delta \sigma_{i,tot} = 54.56 + 149.47 + 49.26 = 253.29$$

Indice utilizzo trave:

$$U_e = 66.05 / 283.00 = 0.233$$

$$U_i = 253.29 / 240.11 = 1.055 \text{ <---- valore } T1 \text{ di confronto vedi par. 2.2.1}$$

Indice utilizzo soletta:

$$U_s = 58.59 / 174.30 = 0.336 \text{ <---- valore } T2 \text{ di confronto vedi par. 2.2.1}$$

2.1.1.2 Parametro 10 – quantità di acciaio da precompressione

In base alle considerazioni del paragrafo precedente la quantità di acciaio da precompressione può essere valutata a partire dal valore di N_p ivi calcolato, dalla tensione di tesatura dell'acciaio assunta pari a 14250 [daN/cm²], e dalle cadute di tensione, valutate complessivamente pari al 20% di tale valore. Con queste assunzioni, peraltro bene aderenti alle situazioni correnti, l'area necessaria è:

$$A_p = 319797 / (14250 \cdot 0.80) = 28.05 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{<---- valore T3a di confronto vedi par. 2.2.1}$$

$$y_p = 10.0 \text{ [cm]} \text{ dal fondo trave} \quad \text{<---- valore T3b di confronto vedi par. 2.2.1}$$

e, in termini di peso di materiale:

$$P'_{sp} = 21.60 \text{ [kg/m]}$$

Per tenere conto del fatto che l'area di acciaio da precompressione calcolata dovrà essere approssimata per eccesso in fase esecutiva rispettando simmetria di disposizione dei trefoli sulla sezione, per tenere conto di sfrido ed un margine di tolleranza (15% in totale) si ha:

$$P_{sp} = 24.84 \text{ [kg/m]} \quad \text{<---- valore T4 di confronto vedi par. 2.2.1}$$

2.1.1.3 Parametro 11 – quantità di acciaio lento

Qui di seguito è riportata una possibile distinta armature della trave in esame:

DISTINTA ARMATURE								
posizione	tipo	diametro	sviluppo	QUANTITA'			passo	peso
				testata sx	testata dx	totale		
	staffa ali sup.	8	3.80	-	-	76	10/30	114.1
	long.	6	20.90	-	-	6	-	27.8
	staffa bulbo	8	1.42			76		42.6
	long.	6	20.90			6		27.8
	staffa princ.	12	3.00 40	-	-	123	10/20	327.7
	long.	8	20.90	-	-	10	-	82.6
	staffa	8	0.00	-	-	76	10/30	0.0
	correnti	12	21.40	-	-	4	-	76.0
	aggiuntiva	16	2.40	4	4	8	-	30.3
	sollevamento	22	1.50	3	3	6	s=934	26.9
	frettaggio	10	1.60	6	6	12	10	11.8
	sussidiaria	16	0.00	-	-	0		0.0
	staffa-agg.	8	1.36	0	0	0	-	0.0

La quantità totale di acciaio lento è di 768 [kg], pari a 36.73 [kg/m] <---- valore T5 di confronto vedi par. 2.2.1.

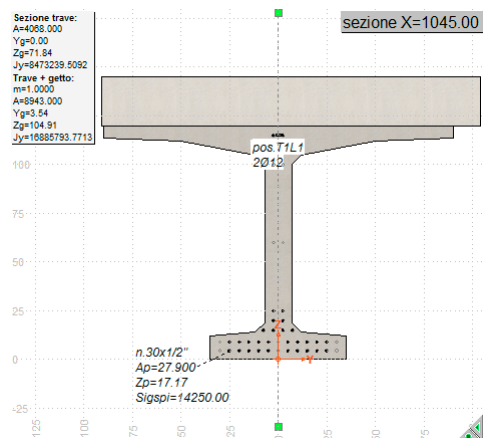
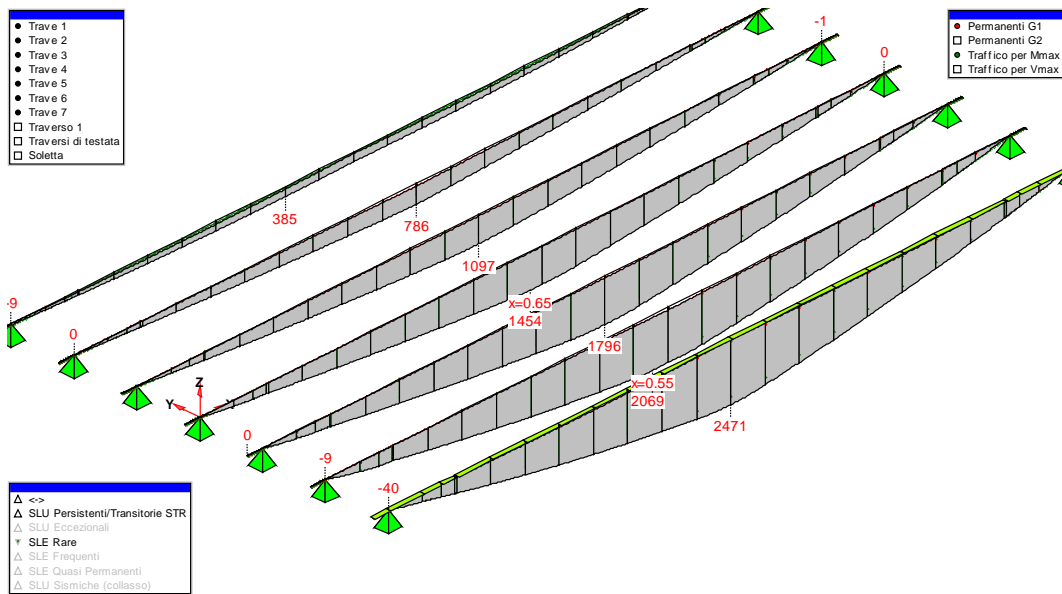
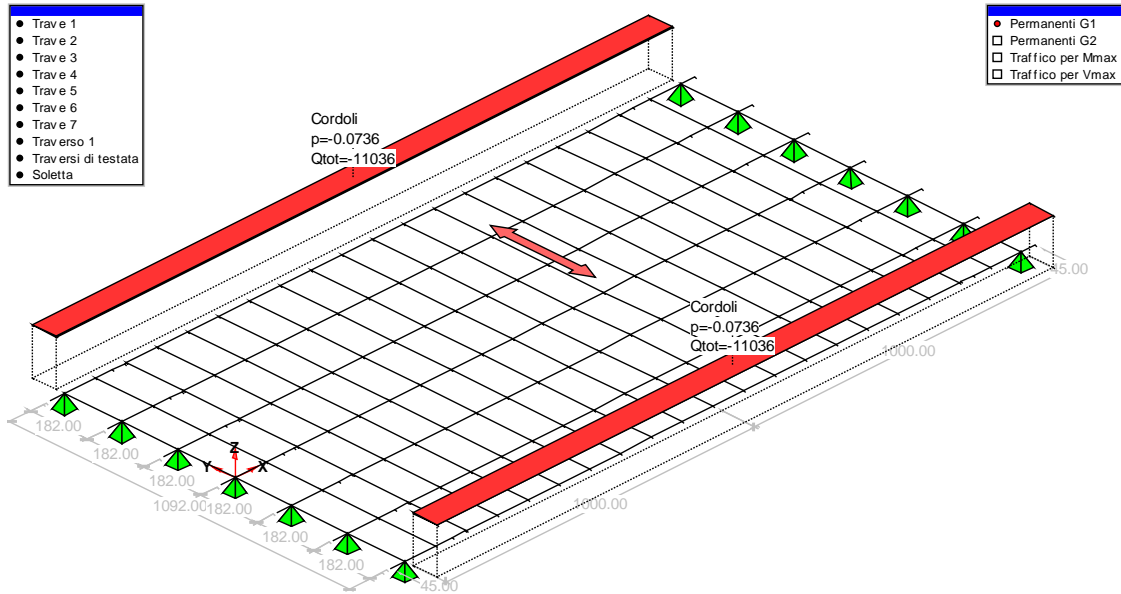
2.1.2 Effetto globale

La valutazione del grado di ottimizzazione del dimensionamento di questo impalcato che si ottiene utilizzando il profilo TH120 viene eseguita conducendo un'analisi completa tramite un modello a graticcio di travi e postprocessore per verifica elementi in c.a.p.

Vengono schematizzate le travi principali, i traversi di testata ed il traverso in campata. La soletta viene suddivisa in parti di 1 metro di lunghezza.

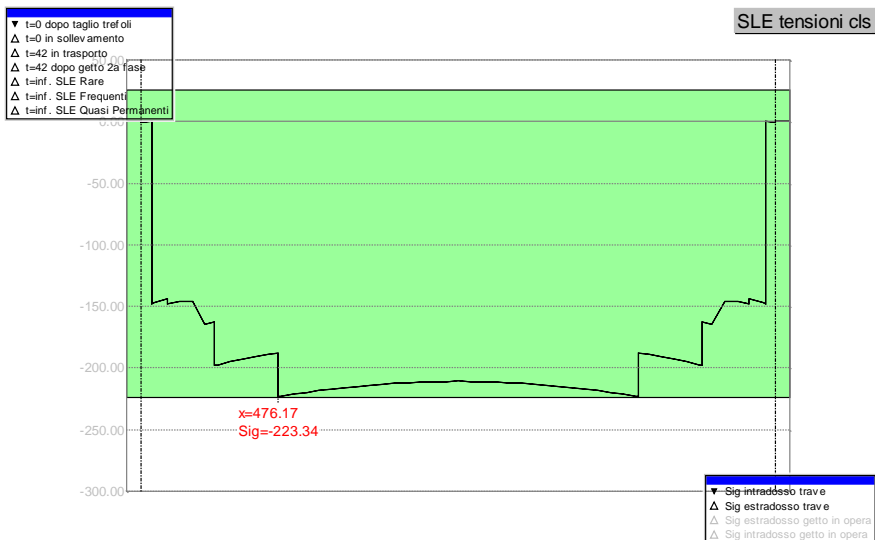
Alle aste che rappresentano le travi principali si è data una rigidità torsionale molto bassa: non è possibile infatti assegnare rigidità torsionale nulla poichè i carichi distribuiti che vengono assegnati automaticamente alle aste dal programma generano carichi distribuiti verticali e torsionali applicati alle aste. Questi ultimi portano a spostamenti infiniti se la rigidità torsionale risulta nulla.

I carichi da traffico vengono disposti in due modi: per cercare il momento massimo in mezzeria della trave di bordo o per cercare il massimo taglio all'appoggio sulla stessa trave.



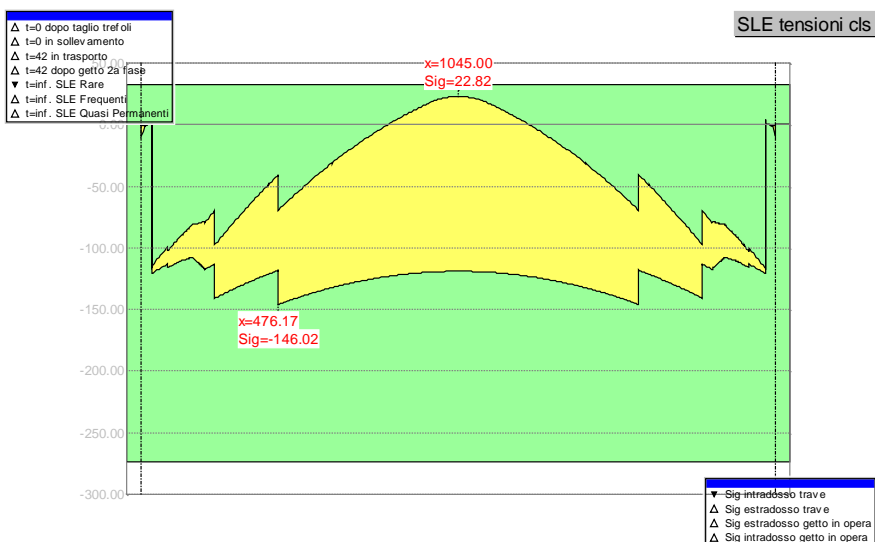
Avvalendosi del postprocessore TCAP si procede alla verifica della trave di bordo.

Vengono disposti nella sezione 30 trefoli da 1/2" con baricentro a 17.17 cm dal lembo inferiore. Questo corrisponde ad una precompressione che porta al seguente stato tensionale al taglio dei trefoli:

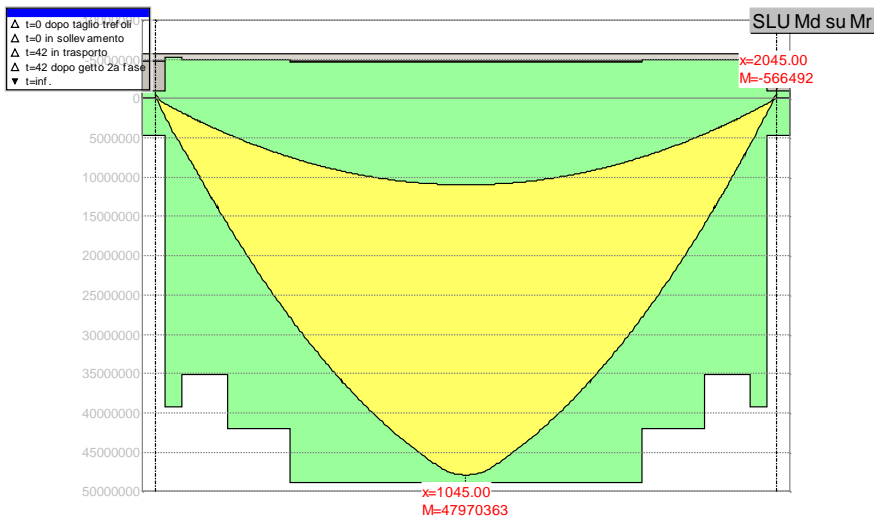


I grafici delle tensioni sul calcestruzzo ai lembi della sezione evidenziano una precompressione al limite, pur restando all'interno dei limiti consentiti dalla normativa. Non è possibile aumentare ulteriormente il grado di precompressione.

In esercizio, nella combinazione Rara più gravosa lo stato tensionale al lembo inferiore lungo la trave risulta:



e anche per quanto riguarda la verifica a rottura delle sezioni (combinazione SLU Persistente/Transitoria) il grafico relativo mostra una verifica soddisfatta ma con valore del coefficiente di sicurezza alla rottura molto prossimo a 1:



2.2 Risultati della procedura

2.2.1 Formule teoriche

La procedura di predimensionamento applicata all'impalcato rappresentato in 2.1.1 produce il seguente output:

$M_{U/2,2}^a$ fase SLU	48149103.75	trave 1
$V_{x=0,2}^a$ fase SLU	97321.21	trave 1 ($T_{corr.}=0.00$)
$M_{U/2,1}^a$ fase SLE rara	11464264.18	trave 1
$M_{U/2,2}^a$ fase SLE rara	23942854.15	trave 1
F_{max} (gruppo 1)	1.3332	(1/1500·L)
R_{min} verticale trave	41272.83	trave 4
R_{max} verticale trave	100688.33	trave 1
R_{max} long. totale	55890.00	
R_{max} trasv. spalla	0.00	
Acciaio per c.a.p.	25.16 [kg/m] <---- valore T4 di confronto vedi par. 2.1.1.2	$A_p=27.869$ $Y_p=10.00$ <---- valori T3a e T3b di confronto vedi par. 2.1.1.2
Acciaio B450C	43.53 [kg/m] <---- valore T5 di confronto vedi par. 2.1.1.3	
indice utilizzo trave	1.05 <---- valore T1 di confronto vedi par. 2.1.1.1	
indice utilizzo soletta	0.34 <---- valore T2 di confronto vedi par. 2.1.1.1	

I valori trovati per T1 e T2 dimostrano la correttezza dell'applicazione delle formule in questo caso, risultando identici a quelli calcolati "a mano" in 2.1.1.1

Il valore T4 si discosta del +1.3% dal valore calcolato con altra procedura in 2.1.1.2

Analogamente a T4 si riscontra il valore T3a. T3b evidenzia una risultante di precompressione più bassa nel calcolo relativo alla procedura in esame.

Il valore T5 si discosta del +18.5% dal valore calcolato con altra procedura in 2.1.1.3

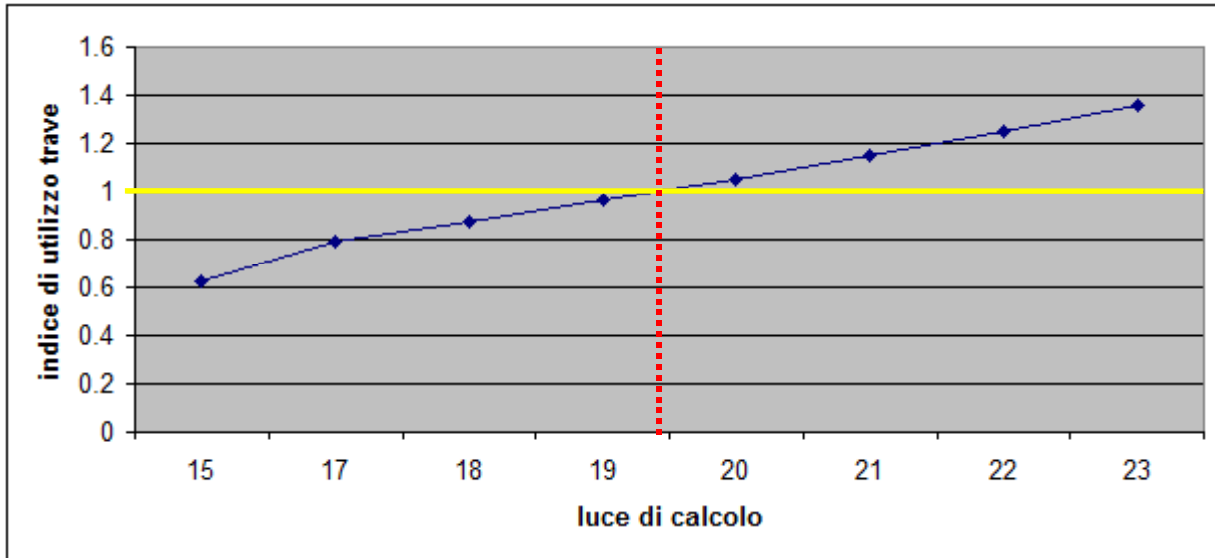
2.2.2 Effetto globale

Eseguito più analisi variando unicamente la luce di calcolo e il dimensionamento della precompressione è possibile indagare sulla luce di calcolo "limite" per questa struttura. Poichè il calcolo di verifica dipende da

molteplici parametri il limite cercato non è rappresentato da un punto ben preciso, ma può variare a seconda della sensibilità del progettista.

Nel caso in esame la luce di 19 m è stata individuata come il limite oltre al quale le tensioni entrano in un campo non accettabile.

Questa conclusione risulta in buon accordo con gli indici di utilizzo del profilo della trave, che rappresenta in questo caso il parametro più restrittivo, come mostrato dalla figura seguente:



Il confronto tra il risultato ottenuto in 2.1.2 e quello ottenuto in questo paragrafo si ottiene un rapporto delle luci pari a:

$$2000/1940 = 1.031$$

ovvero la procedura PREDIM del modulo SIGMAC calcola un limite di utilizzo della struttura più cautelativamente (3%) del metodo alternativo.

3 - TC PREDIM 3 - impalcato con 3 travi a V - L=30m

Luce tra gli appoggi in direzione X = 3000 [cm]

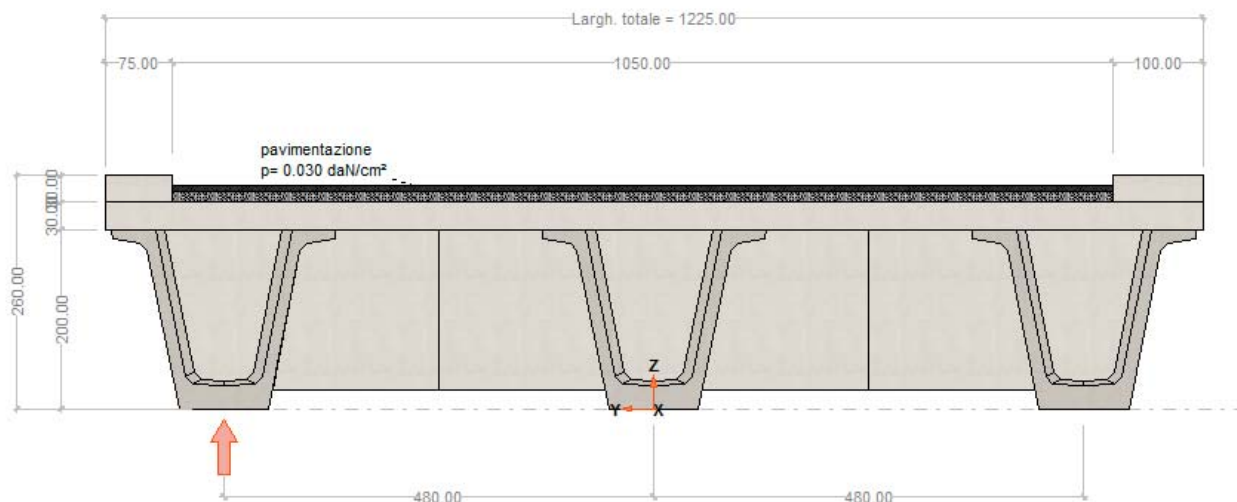
Spessore soletta 30 [cm]

Carichi di 1^a categoria stradale.

Calcestruzzo trave prefabbricata: C45/55

Calcestruzzo soletta: C28/35

Acciaio per c.a.p. $f_{pyk} = 1860$ [N/mm²]



3.1 Parametri di confronto

C5. Correttezza applicazione formule teoriche

C6. Atteso effetto globale

Il criterio di verifica C1 tende a garantire la correttezza dell'implementazione del percorso teorico di predimensionamento, mentre il criterio C2 dà una validazione del percorso teorico stesso e dimostra l'affidabilità della funzione del programma nell'attività di predimensionamento degli impalcati.

3.1.1 Formule teoriche

3.1.1.1 Parametri 12 e 13 - indici di utilizzo delle sezioni di calcestruzzo

Tutti i dati dei materiali e le ipotesi fatte al paragrafo 1.1.1 del test precedente vengono mantenuti in questo test.

Calcolo zone di utilizzo delle fibre

dati trave prefabbricata - sezione in campata:

Xg	0.00	cm
Yg	89.86	cm
Area	8797.00	cm ²
Jx	42251365.57	cm ⁴
We	-383615.08	cm ³
Wi	470191.03	cm ³

I momenti positivi tendono le fibre inferiori della trave.

Si trascurano i tratti ringrossati in testata:

$$M_{pp} = 1/8 \cdot (8797 - 0.00245) \cdot 3000^2 = 24246731 \text{ [daN-cm]}$$

Zona tensionale di utilizzo della fibra superiore (pedice "e"):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{minima}} &= -273.90 \\ \sigma_{\text{massima}} &= 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = -11.82 \\ \Delta U \sigma_e &= 262.08 \text{ [daN/cm}^2\text{]} \end{aligned}$$

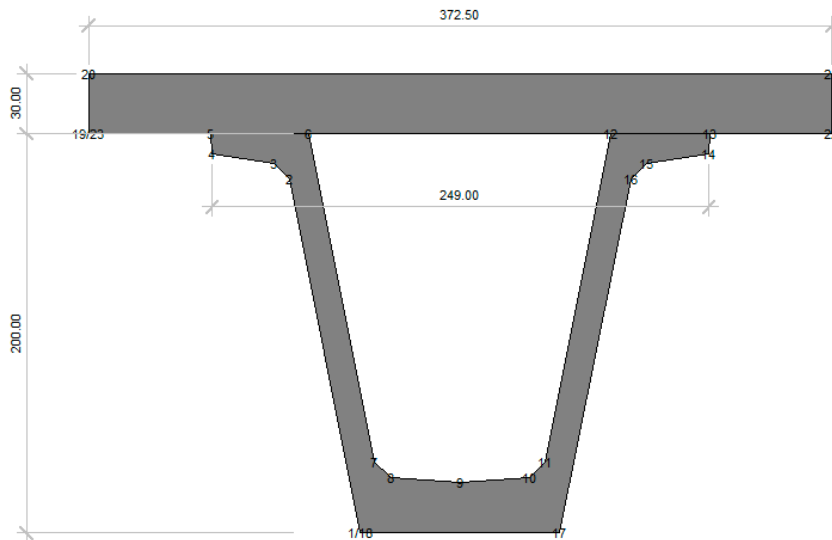
Zona tensionale di utilizzo della fibra inferiore (pedice "i"):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{minima}} &= -233.27 + M_{pp} / W_i \cdot 0.6 = -202.33 \\ \sigma_{\text{massima}} &= 32.19 \\ \Delta U \sigma_i &= 234.52 \end{aligned}$$

3.1.1.1.1 Trave di bordo n. 3

Calcolo range di tensioni utilizzato

Larghezza di soletta gravante sulla trave di bordo = 372.5 [cm].



Sezione di calcestruzzo :

Area= 19972.05

Coordinate baricentro:

x= 0.00

y= 159.88

$J_{xxx} = 1.201683E8$

$W_s = -1713752$

$W_e = -2995222$

$W_i = 751616$

Momento di 1^a fase (soletta, escluso peso trave):

$$M_1 = 1/8 \cdot (372.5 \cdot 30 - 0.00245) \cdot 3000^2 = 30801094 \text{ [daN-cm]}$$

Delta tensionale ai lembi sezione trave:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{e,1} &= M_1 / W_e = -80.29 \\ \Delta \sigma_{i,1} &= M_1 / W_i = 65.51 \end{aligned}$$

Momento di 2^a fase (permanenti + carichi da traffico):

$$M_2 = 72129732 \text{ [daN-cm]}$$

lembo sup. soletta $\Delta \sigma_{s,2} = M_2 / W_{s,2} = -42.09$

lembo sup. trave $\Delta \sigma_{e,2} = M_2 / W_{e,2} = -24.08$

lembo inf. trave $\Delta \sigma_{i,2} = M_2 / W_{i,2} = 95.97$

Calcolo precompressione necessaria

Il calcolo della precompressione minima necessaria è teso a cercare la minima armatura disposta con la massima eccentricità della risultante di precompressione, che comunque dovrà restare al di sopra di una certa distanza dal lembo inferiore della sezione.

tensione massima (verso la trazione) al taglio trefoli al lembo sup. :

$$\sigma_e = 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = -11.82$$

tensione massima al taglio trefoli al lembo inf. per arrivare alla decompressione in esercizio:

$$\sigma_i = 0 - 65.51 - 95.97 = -161.47$$

$$N_p = \frac{\sigma_i \cdot W_i - \sigma_e \cdot W_e}{W_i - W_e} \cdot A_{trave}$$

$$M_p = \frac{(\sigma_e - \sigma_i) \cdot W_e \cdot W_i}{W_i - W_e} - M_{pptrave}$$

da cui:

$$N_p = -828994 \text{ [daN]}$$

$$M_p = -55861387 \text{ [daN.cm]}$$

La eccentricità della precompressione risulta:

$$e_p = M_p / N_p = 67.38 \text{ [cm]} \text{ dal baricentro sezione}$$

e la quota del cavo risultante è:

$$y_p = 89.86 - 67.38 = 22.48 \text{ [cm]} \text{ dal fondo sezione}$$

Cadute di precompressione

In questo calcolo di test si assume un valore globale delle cadute di tensione pari al 20% della tensione di tesatura iniziale, includendo in questo l'accorciamento elastico, rilassamento acciaio, ritiro e viscosità del calcestruzzo. Si assume inoltre che tali cadute avvengano tutte in prima fase, sulla sola trave.

In tale ipotesi si ha:

$$\Delta N_p = -N_p \cdot 0.2 = 165799 \text{ [daN]}$$

$$\Delta M_p = -M_p \cdot 0.2 = 11172277 \text{ [daN.cm]}$$

e le variazioni di tensione ai lembi valgono:

$$\Delta \sigma_e = \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_e = -10.28$$

$$\Delta \sigma_i = \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_i = 42.61$$

Escursione totale tensioni ai lembi:

$$\Delta \sigma_{s,tot} = -42.09$$

$$\Delta \sigma_{e,tot} = -80.29 - 24.08 - 10.28 = -114.65$$

$$\Delta \sigma_{i,tot} = 65.51 + 95.97 + 42.61 = 204.08$$

Indice utilizzo trave:

$$U_e = 114.65 / 262.08 = 0.437$$

$$U_i = 204.08 / 234.52 = 0.870 \text{ <---- valore T1 di confronto vedi par. 3.2.1}$$

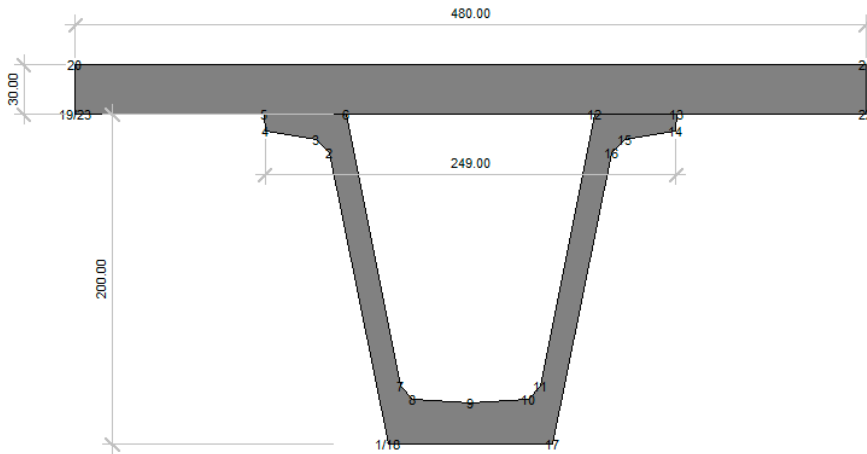
Indice utilizzo soletta:

$$U_s = 42.09 / 174.30 = 0.241 \text{ <---- valore T2 di confronto vedi par. 3.2.1}$$

3.1.1.1.2 Trave centrale n. 2

Calcolo range di tensioni utilizzato

Larghezza di soletta gravante sulla trave centrale =480 [cm].



Sezione di calcestruzzo :

Area= 23197.05

Coordinate baricentro:

x= 0.00 y= 167.54

$J_{xx} = 1.288458E8$

$W_s = -2062853$

$W_e = -3969372$

$W_i = 769045$

Momento di 1^a fase (soletta, escluso peso trave):

$$M_1 = 1/8 \cdot (480 \cdot 30 \cdot 0.00245) \cdot 3000^2 = 39690000 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

Delta tensionale ai lembi sezione trave:

$$\Delta\sigma_{e,1} = M_1 / W_e = -103.46$$

$$\Delta\sigma_{i,1} = M_1 / W_i = 84.41$$

Momento di 2^a fase (permanenti + carichi da traffico):

$$M_2 = 76571959 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

lembo sup. soletta $\Delta\sigma_{s,2} = M_2 / W_{s,2} = -37.12$

lembo sup. trave $\Delta\sigma_{e,2} = M_2 / W_{e,2} = -19.29$

lembo inf. trave $\Delta\sigma_{i,2} = M_2 / W_{i,2} = 99.57$

Calcolo precompressione necessaria

Il calcolo della precompressione minima necessaria è teso a cercare la minima armatura disposta con la massima eccentricità della risultante di precompressione, che comunque dovrà restare al di sopra di una certa distanza dal lembo inferiore della sezione.

tensione massima (verso la trazione) al taglio trefoli al lembo sup. :

$$\sigma_e = 26.10 + M_{pp} / W_e \cdot 0.6 = -11.82$$

tensione massima al taglio trefoli al lembo inf. per arrivare alla decompressione in esercizio:

$$\sigma_i = 0 - 84.41 - 99.57 = -183.98$$

$$N_p = \frac{\sigma_i \cdot W_i - \sigma_e \cdot W_e}{W_i - W_e} \cdot A_{trave}$$

$$M_p = \frac{(\sigma_e - \sigma_i) \cdot W_e \cdot W_i}{W_i - W_e} - M_{pptrave}$$

da cui:

$$N_p = -938025 \text{ [daN]}$$

$$M_p = -60615980 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}$$

La eccentricità della precompressione risulta:

$$e_p = M_p / N_p = 64.62 \text{ [cm]} \text{ dal baricentro sezione}$$

e la quota del cavo risultante è:

$$y_p = 89.86 - 64.62 = 25.24 \text{ [cm] dal fondo sezione}$$

Cadute di precompressione

In questo calcolo di test si assume un valore globale delle cadute di tensione pari al 20% della tensione di tesatura iniziale, includendo in questo l'accorciamento elastico, rilassamento acciaio, ritiro e viscosità del calcestruzzo. Si assume inoltre che tali cadute avvengano tutte in prima fase, sulla sola trave.

In tale ipotesi si ha:

$$\begin{aligned}\Delta N_p &= -N_p \cdot 0.2 = 187605 \text{ [daN]} \\ \Delta M_p &= -M_p \cdot 0.2 = 12123196 \text{ [daN}\cdot\text{cm]}\end{aligned}$$

e le variazioni di tensione ai lembi valgono:

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_e &= \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_e = -10.28 \\ \Delta \sigma_i &= \Delta N_p / A_{trave} + \Delta M_p / W_i = 47.11\end{aligned}$$

Escursione totale tensioni ai lembi:

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_{s,tot} &= -37.12 \\ \Delta \sigma_{e,tot} &= -103.46 - 19.29 - 10.28 = -133.03 \\ \Delta \sigma_{i,tot} &= 84.41 + 99.57 + 47.11 = 231.09\end{aligned}$$

Indice utilizzo trave:

$$\begin{aligned}U_e &= 133.03 / 262.08 = 0.508 \\ U_i &= 231.09 / 234.52 = 0.985 \text{ <---- valore T1 di confronto vedi par. 3.2.1}\end{aligned}$$

Indice utilizzo soletta:

$$U_s = 37.12 / 174.30 = 0.213 \text{ <---- valore T2 di confronto vedi par. 3.2.1}$$

3.1.1.2 Parametro 10 – quantità di acciaio da precompressione

In base alle considerazioni del paragrafo precedente la quantità di acciaio da precompressione può essere valutata a partire dal valore di N_p ivi calcolato, dalla tensione di tesatura dell'acciaio assunta pari a 14250 [daN/cm²], e dalle cadute di tensione, valutate complessivamente pari al 20% di tale valore.

Si prende il valore calcolato per la trave centrale, la più sollecitata.

Con queste assunzioni, peraltro bene aderenti alle situazioni correnti, l'area necessaria è:

$$\begin{aligned}A_p &= 938025 / (14250 \cdot 0.80) = 82.28 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ <---- valore T3a di confronto vedi par. 2.2.1} \\ y_p &= 25.24 \text{ [cm] dal fondo trave} \text{ <---- valore T3b di confronto vedi par. 2.2.1}\end{aligned}$$

e, in termini di peso di materiale:

$$P'_{sp} = 82.28 \cdot 0.0077 \cdot 100 = 63.36 \text{ [kg/m]}$$

Per tenere conto del fatto che l'area di acciaio da precompressione calcolata dovrà essere approssimata per eccesso in fase esecutiva rispettando simmetria di disposizione dei trefoli sulla sezione, per tenere conto di sfrido ed un margine di tolleranza (15% in totale) si ha:

$$P_{sp} = 72.86 \text{ [kg/m]} \text{ <---- valore T4 di confronto vedi par. 2.2.1}$$

3.1.1.4 Parametro 11 – quantità di acciaio lento nella trave prefabbricata

Per valutare la quantità di armatura lenta che il progetto richiede si ricorre ad un dimensionamento reale come viene impostato da un prefabbricatore.

DISTINTA ARMATURE									
posiz	tipo	diametro	SVILUPPO		QUANTITA'			passo	peso
			ala sx	ala dx	testata sx	testata dx	totale		
1	rete	12	7.12 31	224	-	-	171	10/20	1081.2
	rete	8	31.20	0.00	17	0	17	-	209.5
2	rete	12	2.47 42	2.47 42	-	-	171	10/20	750.1
	rete	8	31.20	0.00	14	0	14	-	172.5
3	staffa	10	1.20	0.00	-	-	166	20	122.9
4	aggiuntiva	16	2.00	0.00	2	2	4	-	12.6
5	aggiuntiva	24	2.50	0.00	2	2	4	-	35.5
6	sollevamento	16	1.50	0.00	4	4	8	s=1528	18.9
		16	1.00	1.00	4	4	8		25.2
		16	1.00	0.00	4	4	8	-	12.6
7	correnti	16	32.60	0.00	4	0	4	-	205.8
8	frettaggio	12	4.00	0.00	8	8	16	-	56.8
9	spezzoni	10	0.80	0.80	-	-	105	30	103.7
10	spezzoni	16	1.45		2	2	4	-	9.2
11	spezzoni	16	1.70		2	2	4	-	10.7
12	spezzoni	16	2.00		2	2	4	-	12.6
	staffa-ringr.	10	2.46	2.46	19	19	38	-	115.4
	spez.-ringr.	16	2.50		2	2	4	-	15.8
	sussidiaria	16	0.00		-	-	0	-	0.0
	sussidiaria	16	0.00		-	-	0	-	0.0
	spez.-trasp.	16	8.00		2	2	4	-	50.5
	staffe-agg.	10	3.20	3.20	0	0	0	-	0.0
	staffe-agg.	10	2.47	2.47	0	0	0	-	0.0
	staffa-sole	10	1.50	1.50	0	0	0	-	0.0

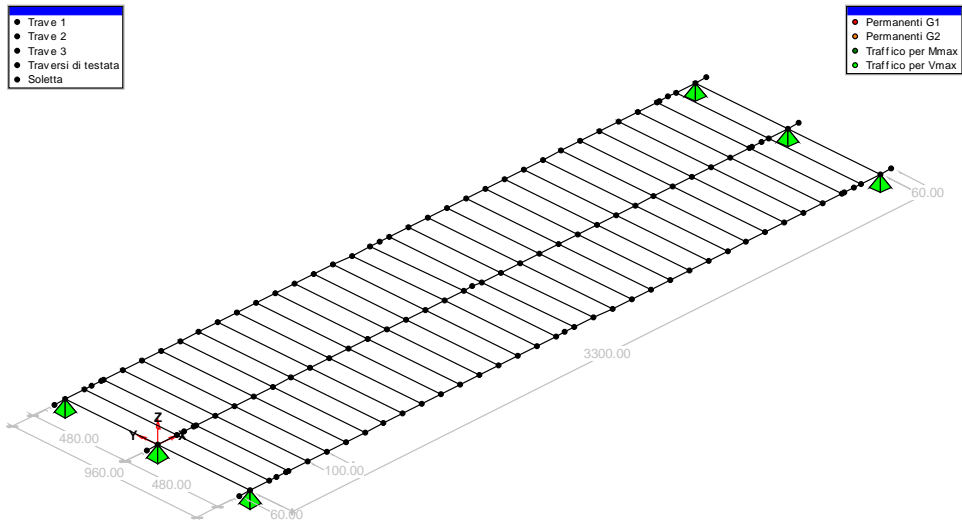
La quantità totale di acciaio lento è pari a 3022 [kg] corrispondenti a 96.85 [kg/m] <---- valore T5 di confronto vedi par. 3.2.1.

3.1.2 Effetto globale

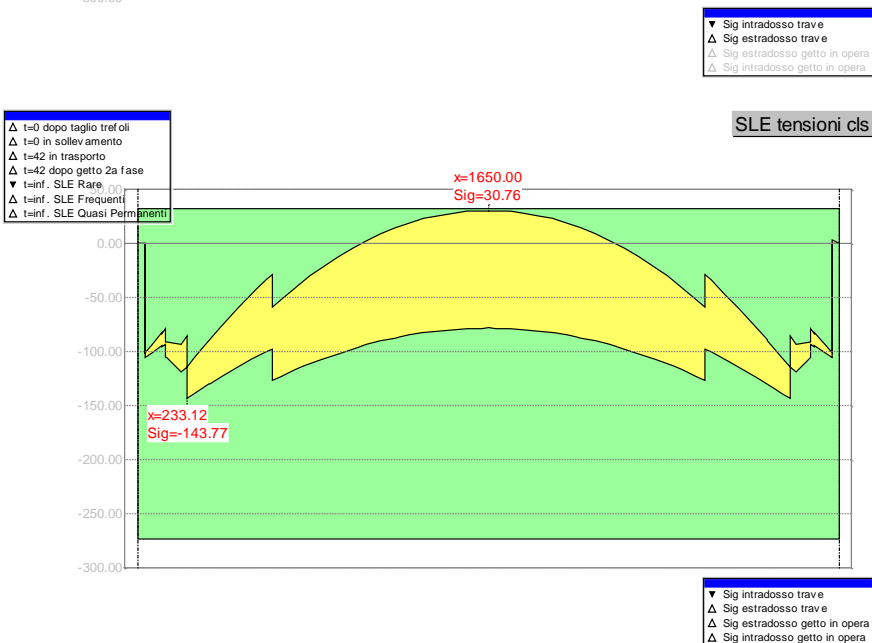
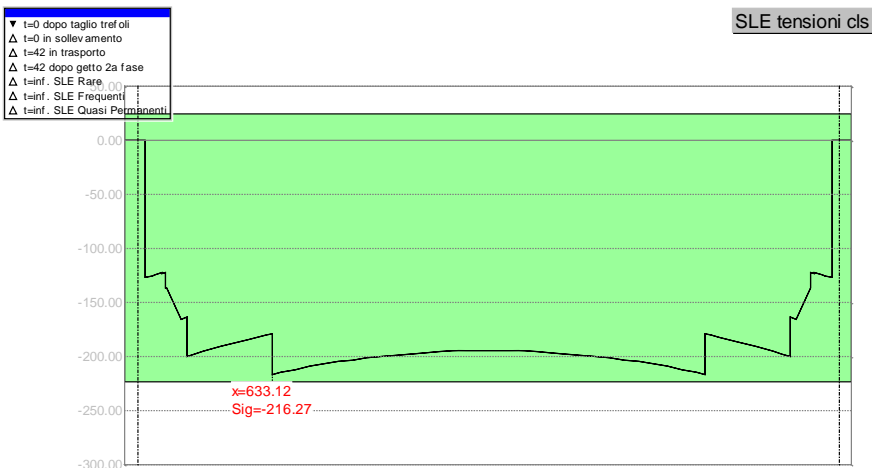
Come nei casi precedenti si procede all'individuazione del dimensionamento ottimale del prefabbricato ovvero si ricerca la luce limite dell'impalcato.

Per questi tipi di strutture la condizione limitante dovrebbe essere rappresentata dallo stato tensionale della trave, ma potrebbe anche essere un altro parametro, come ad esempio l'eccessiva deformazione. Un altro parametro limite per il dimensionamento della struttura potrebbe essere rappresentato dalla verifica alla flessione trasversale della soletta qualora, ad esempio, l'interasse delle travi fosse eccessivo.

Un calcolo completo condotto con una modellazione del tipo illustrata in figura seguente dimostra che, mantenendo invariata la sezione trasversale dell'impalcato e variando solo la luce di calcolo, questa struttura è in grado di risultare verificata fino ad una luce di calcolo di 33 m.



Questa sembra essere proprio la condizione limite, avendosi uno stato tensionale al lembo inferiore del prefabbricato che nasce con la massima compressione possibile e presenta in esercizio il massimo valore di trazione consentito dalle norme. Le situazioni sono illustrate nei grafici seguenti:



Il calcolo non evidenzia il superamento di altri limiti, ed in particolare:

- le deformazioni sono compatibili con l'utilizzo della struttura, presentandosi una freccia in mezzeria al passaggio dei carichi da traffico pari a 1.65 [cm] (1/1818 della luce)
- la soletta di 30 cm di spessore viene sollecitata, nel modello utilizzato, con un momento flettente pari a circa 3900 [kgm/m] in mezzeria e allo spiccato della trave a cassone, per cui la verifica è soddisfatta prevedendo una adeguata armatura a flessione
- la verifica flessionale a rottura risulta soddisfatta
- non vi sono problemi di taglio all'appoggio

3.2 Risultati della procedura

3.2.1 Formule teoriche

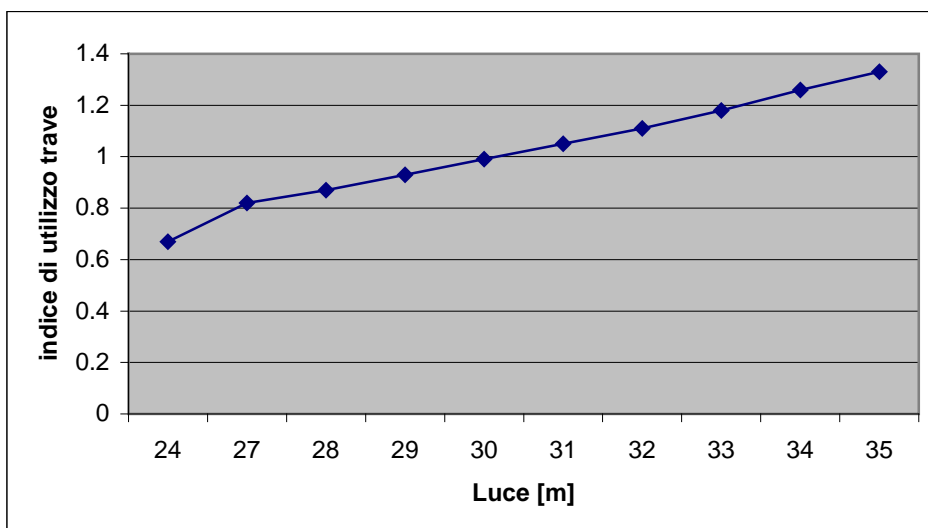
La procedura di predimensionamento applicata all'impalcato per una luce di 30 m produce il seguente output:

$M_{L/2,2^a \text{ fase}}$ SLU	191965629.89	trave 2
$V_{x=0,2^a \text{ fase}}$ SLU	259231.34	trave 2 ($T_{corr.}=-1177119.13$)
$M_{L/2,1^a \text{ fase}}$ SLE rara	64132619.92	trave 2
$M_{L/2,2^a \text{ fase}}$ SLE rara	77704058.38	trave 3
$F_{max}(\text{gruppo 1})$	1.2336	(1/2432·L)
R_{min} verticale trave	144130.49	trave 3
R_{max} verticale trave	272359.97	trave 2
R_{max} long. totale	59535.00	
R_{max} trasv. spalla	0.00	
Acciaio per c.a.p.	74.35 [kg/m] <---- valore T4 di confronto vedi par. 3.1.1.2	$A_p=82.362$ $Y_p=25.36$ <---- valori T3a e T3b di confronto vedi par. 3.1.1.2
Acciaio B450C	91.78 [kg/m] <---- valore T5 di confronto vedi par. 3.1.1.3	
indice utilizzo trave	0.99 <---- valore T1 di confronto vedi par. 3.1.1.1	
indice utilizzo soletta	0.24 <---- valore T2 di confronto vedi par. 3.1.1.1	

3.2.2 Effetto globale

In 3.1.2 è stata determinata la massima luce realizzabile con questo tipo di sezione trasversale, ed è stata identificata in 33 m.

Utilizzando la procedura PREDIM del modulo SIGMAC si ottengono i seguenti valori per l'indice di utilizzo della trave, che resta sempre il parametro dimensionante per la scelta strutturale:



Si nota un comportamento conservativo della procedura, che porta a considerare la luce massima per questa struttura a 30.50 [m].

Il confronto tra il risultato ottenuto in 3.1.2 e quello ottenuto in questo paragrafo si ottiene un rapporto delle luci pari a:

$$3300/3050 = 1.082$$

ovvero la procedura PREDIM del modulo SIGMAC calcola un limite di utilizzo della struttura più cautelativamente (8%) del metodo alternativo.