

Corso di tecnica delle costruzioni

- Progetto di una trave reticolare in acciaio -



Politecnico di Milano

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

Francesco Zangari

Esercitazione a cura di
ing. Luca Rancati e ing. Francesco Lomonte

prof. Marco Di Prisco

29 giugno 2025

Indice

Capitolo 1 - Descrizione del caso strutturale.....	2
Capitolo 2 - Analisi dei carichi e predimensionamento	3
Capitolo 3 - Analisi strutturale.....	7
Capitolo 4 - Progetto del Traverso	9
Capitolo 5 - Progetto corrente superiore compresso	12
Capitolo 6 - Progetto del corrente inferiore teso	15
Capitolo 7 - Progetto del montante compresso	16
Capitolo 8 - Progetto dell'asta diagonale tesa	19
Capitolo 9 - Progetto di un giunto bullonato	21
Capitolo 10 - Stati limite di deformazione e vibrazione	24
Capitolo 11 - Predimensionamento e progetto finale	27
Capitolo 12 - Punti salienti.....	28

Capitolo 1 - Descrizione del caso strutturale

L'acciaio scelto per la soluzione della trave reticolare è il tipo S275, con moduli longitudinali di uguale lunghezza e nodi imbullonati assimilabili a cerniere, con briglie superiore ed inferiore di eguale profilo e aste di parete con profilo diverso ma costante lungo l'intera campata. L'impalcato è costituito da lamiera grecata e getto in calcestruzzo. La lunghezza della passerella è pari a 5 m e per la lunghezza della passerella si considera:

$$L = 12 \left(1 + \frac{C}{8N}\right) \text{ m}$$

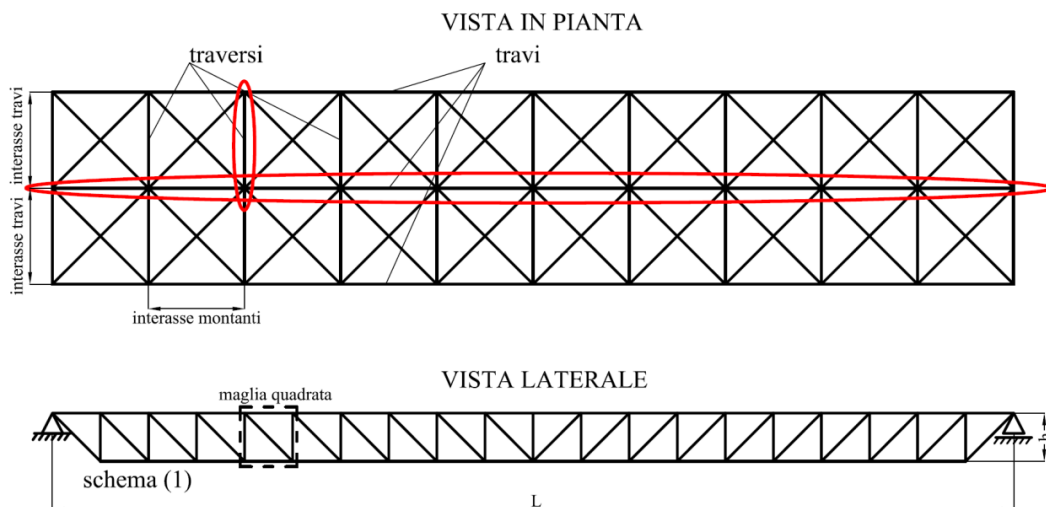
con N = numero associato all'iniziale del nome e C = numero associato all'iniziale del cognome. Poiché $N = 6$ e $C = 26$, la lunghezza della passerella è pari a 18,5 m.

Considerando tre travi reticolari disposte ad un interasse pari a 2,5 m, occorre calcolare l'altezza h delle travi affinché sia soddisfatto il limite $\frac{f}{L} < \frac{1}{n}$. Per il valore di N viene scelto 400 poiché $(C + N) = 32 > 30$. Occorre predimensionare l'altezza della trave reticolare, la distanza dei traversi, il profilo delle briglie, il profilo delle aste di parete e le connessioni bullonate che collegano le aste di parete alla briglia superiore e a quella inferiore. Successivamente, occorre verificare che le scelte effettuate, con riferimento agli elementi più critici, siano normate dal D.M. 2018.

Le travi sono sormontate da un solaio collaborante realizzato con un getto in calcestruzzo su una lamiera grecata opportunamente dimensionata per tenere conto sia della funzione di cassero a perdere nella fase di getto, sia della funzione strutturale dopo la presa del calcestruzzo.

La soletta in calcestruzzo armato ha la funzione di collegamento trasversale tra le travi, al fine di garantire un comportamento complessivo a piastra e di aumentare la rigidezza flessionale nel piano, nei confronti di azioni orizzontali quali il vento e/o oscillazioni laterali dovute ai pedoni. La soletta è sormontata da un massetto di finitura di 3 cm e dalla pavimentazione che costituisce il piano calpestabile.

Il progetto della trave reticolare e dei traversi è in accordo al decreto ministeriale del 14 gennaio 2008, conosciuto come Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC 2008), secondo il metodo di calcolo degli Stati Limite.



Capitolo 2 - Analisi dei carichi e predimensionamento

Per analizzare la situazione dei carichi, si parte da una veduta della sezione dell'impalcato per capire i carichi permanenti portati.

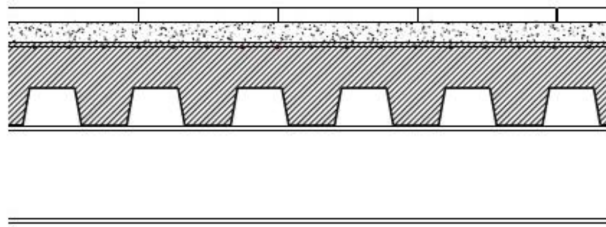
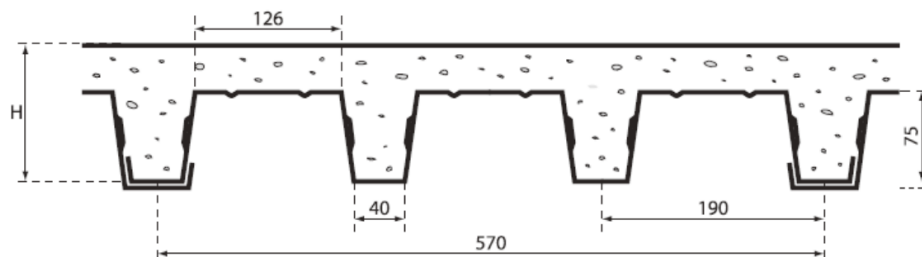


Figura 1: veduta della sezione dell'impalcato



Carichi permanentemente portati

Sono composti da:

G_P = carico della pavimentazione e del massetto

G_C = carico degli elementi secondari.

Per il valore della pavimentazione si considera $0,40 \text{ kN/m}^2$. Il massetto di finitura è spesso 3 cm:

$$\gamma_m \cdot s_m = 18 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,03 \text{ m} = 0,54 \text{ kN/m}^2.$$

Infine, per gli elementi di controventamento orizzontale si considera un valore forfettario uguale a $0,50 \text{ kN/m}^2$.

Carichi variabili Q

Si considera, dallo schema di carico 5 delle NTC 2008, un valore per la folla compatta pari a 5 kN/m^2 .

Carichi permanenti

I carichi permanenti sono composti da due contributi principali:

- G_T , il carico della trave (da definire successivamente).
- G_S , il carico dell'impalcato, costituito dal peso proprio del solaio collaborante: soletta + lamiera grecata.

Per definire i pesi propri strutturali è necessario partire dai sovraccarichi portati (carichi permanenti portati + carichi variabili), al fine di predimensionare gli elementi strutturali e valutarne il peso proprio.

Per quanto riguarda la soletta, il sovraccarico di esercizio è pari a:

$$5 + 0,40 + 0,54 = 5,94 \text{ kN/m}^2.$$

Sulla base di questo valore, si sceglie la tipologia di lamiera grecata e lo spessore della soletta collaborante attraverso le tabelle di portata fornite dal produttore (via semplificata). Si considera la soletta, per via cautelativa, lavorante come una trave appoggio-appoggio tra i montanti, con spessore della lamiera pari a 0,7 mm, luce massima 2,12 m e sovraccarico di esercizio 6 kN/m^2 .

CARATTERISTICHE STATICHE SEZIONE EFFICACE					DIAMETRI RETE A MAGLIA SALDATA				
Spessore	0,7	0,8	1	1,2	Spessore soletta cm	12	13	14	15
Peso Kg/m ²	9,64	11,02	13,77	16,53	Area cls sopra lamiera per metro cm ²	450	550	650	750
Peso Kg/m 1000	5,5	6,28	7,85	9,42	0,2% area armatura lenta per metro	0,90	1,10	1,30	1,50
J cm ⁴ /m	80,03	94,71	126,23	159,47	Maglia (cm x cm)	20x20	20x20	20x20	20x20
W _x cm ³ /m	18,98	22,96	31,79	39,68	Diametro minimo (mm)	5,00	6,00	6,00	8,00
W _y cm ³ /m	21,67	25,16	32,34	41,66					

Figura 2: Tabella relativa alle caratteristiche della lamiera grecata

Sempre dalla tabella di portata si legge che lo spessore della soletta è pari a 12 cm. Poiché le nervature hanno un'altezza di 7,5 cm, si considera lo spessore della soletta collaborante pari a 4,5 cm.

$$\text{Peso proprio del solaio} = \gamma_{cls} S_{\text{soletta collab.}} + \gamma_{cls} S_{\text{nerv.}} + \text{peso lamiera grecata.}$$

- Soletta (*c.a.* soletta):

$$\gamma_{cls} \cdot S_{\text{soletta collab.}} = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,045 \text{ m} = 1,125 \text{ kN/m}^2.$$

- Nervature (*c.a.* nervature):

$$\begin{aligned} \gamma_{cls} \cdot \frac{A_{\text{nerv}}}{\text{interasse nervature}} &= \gamma_{cls} \cdot S_{\text{nerv}} \\ &= 25 \text{ kN/m}^3 \cdot \frac{(0,064 + 0,040) \cdot 0,075/2}{0,19} \text{ m} = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,021 \text{ m} = 0,513 \text{ kN/m}^2. \end{aligned}$$

- Lamiera grecata (da tabella delle caratteristiche statiche):

$$0,0964 \text{ kN/m}^2.$$

In totale:

$$G_S = 1,125 + 0,513 + 0,0964 = 1,73 \text{ kN/m}^2.$$

I carichi permanenti portati risultano:

$$G_p = 0,94 \text{ kN/m}^2, \quad G_c = 0,50 \text{ kN/m}^2,$$

$$G = G_s + G_p + G_c = 1,73 + 0,94 + 0,50 = 3,17 \text{ kN/m}^2,$$

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

Predimensionamento.

Per semplificare, si considera la trave reticolare come una generica trave a sezione compatta con carico lineare $q = (\text{carico per unità di superficie}) \cdot (\text{interasse})$.

Allo Stato Limite di Esercizio (SLE):

$$q_{\text{SLE}} = (G + Q) \cdot 2,5 = (3,17 + 5,00) \cdot 2,5 = 20,45 \text{ kN/m}.$$

Allo Stato Limite Ultimo (SLU):

$$q_{\text{SLU}} = (1,3 \cdot G + 1,5 \cdot Q) \cdot 2,5 = (1,3 \cdot 3,17 + 1,5 \cdot 5) \cdot 2,5 = 29,0525 \text{ kN/m}.$$

Per via speditiva, il momento flettente in mezzeria (trave appoggiata agli estremi e carico distribuito) è:

$$M = q_{\text{SLU}} \frac{L^2}{8},$$

mentre la freccia in mezzeria per SLE è:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q_{\text{SLE}} L^4}{EI}.$$

H soletta cm	Spessore mm	sovraccarico di esercizio utile uniformemente distribuito kN/m ² (per trasformare i kN/m ² in kgf/m ² si deve moltiplicare per 102)																condizioni di appoggio	
		1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	7,00	8,00	10,00	12,00	15,00	20,00		
		LUCE MASSIMA IN METRI PER SOLAI																	
12	0,7	2,58	2,51	2,45	2,39	2,34	2,29	2,24	2,20	2,16	2,12	1,97	1,78	1,48	1,27	1,04	0,80	singola	▲▲
		2,69	2,63	2,57	2,51	2,46	2,41	2,37	2,33	2,29	2,25	2,18	2,12	1,85	1,58	1,30	1,01	multipla	▲▲▲▲▲
	0,8	2,86	2,78	2,71	2,64	2,58	2,52	2,47	2,42	2,37	2,27	2,01	1,81	1,51	1,29	1,06	0,82	singola	▲▲
		2,99	2,92	2,85	2,78	2,72	2,66	2,61	2,56	2,52	2,47	2,40	2,26	1,88	1,61	1,33	1,03	multipla	▲▲▲▲▲
	1,0	3,39	3,28	3,18	3,10	3,02	2,94	2,88	2,70	2,52	2,36	2,10	1,89	1,57	1,35	1,11	0,86	singola	▲▲
		3,56	3,46	3,36	3,28	3,20	3,13	3,06	3,00	2,94	2,89	2,63	2,36	1,97	1,69	1,39	1,07	multipla	▲▲▲▲▲
13	1,2	3,89	3,76	3,64	3,53	3,44	3,33	3,07	2,85	2,66	2,50	2,22	2,00	1,67	1,43	1,18	0,91	singola	▲▲
		4,10	3,98	3,86	3,76	3,66	3,58	3,50	3,42	3,33	3,12	2,78	2,50	2,08	1,78	1,47	1,14	multipla	▲▲▲▲▲
	0,7	2,61	2,54	2,48	2,43	2,38	2,33	2,28	2,24	2,20	2,17	2,09	1,88	1,57	1,35	1,11	0,86	singola	▲▲
		2,71	2,65	2,60	2,54	2,50	2,45	2,41	2,37	2,33	2,30	2,23	2,17	1,96	1,69	1,39	1,08	multipla	▲▲▲▲▲
	0,8	2,89	2,81	2,74	2,68	2,62	2,57	2,52	2,47	2,42	2,38	2,12	1,91	1,60	1,37	1,13	0,88	singola	▲▲
		3,02	2,95	2,88	2,82	2,76	2,71	2,66	2,61	2,57	2,53	2,45	2,38	2,00	1,72	1,42	1,10	multipla	▲▲▲▲▲
14	1,0	3,43	3,32	3,23	3,15	3,08	3,01	2,94	2,82	2,64	2,48	2,21	1,99	1,67	1,43	1,18	0,92	singola	▲▲
		3,60	3,50	3,41	3,33	3,26	3,19	3,13	3,07	3,01	2,96	2,76	2,49	2,08	1,79	1,48	1,14	multipla	▲▲▲▲▲
	1,2	3,79	3,79	3,70	3,60	3,51	3,43	3,19	2,97	2,77	2,61	2,32	2,10	1,75	1,51	1,24	0,96	singola	▲▲
		4,15	4,03	3,92	3,82	3,73	3,65	3,57	3,50	3,43	3,26	2,90	2,62	2,19	1,88	1,56	1,21	multipla	▲▲▲▲▲
	0,7	2,56	2,56	2,51	2,46	2,41	2,36	2,32	2,28	2,24	2,21	2,14	1,98	1,66	1,43	1,18	0,92	singola	▲▲
		2,73	2,67	2,62	2,57	2,53	2,48	2,44	2,41	2,37	2,34	2,27	2,21	2,07	1,79	1,48	1,15	multipla	▲▲▲▲▲
15	0,8	2,83	2,83	2,78	2,72	2,66	2,61	2,56	2,51	2,47	2,43	2,23	2,01	1,69	1,45	1,20	0,93	singola	▲▲
		3,04	2,97	2,91	2,85	2,80	2,75	2,70	2,66	2,62	2,58	2,50	2,43	2,11	1,82	1,50	1,17	multipla	▲▲▲▲▲
	1,0	3,34	3,34	3,28	3,20	3,13	3,06	3,00	2,93	2,74	2,58	2,31	2,09	1,75	1,51	1,25	0,97	singola	▲▲
		3,63	3,54	3,45	3,38	3,31	3,24	3,18	3,12	3,07	3,02	2,88	2,61	2,19	1,89	1,56	1,21	multipla	▲▲▲▲▲
	1,2	3,70	3,70	3,70	3,66	3,57	3,49	3,29	3,07	2,88	2,71	2,42	2,19	1,84	1,58	1,31	1,02	singola	▲▲
		4,12	4,08	3,97	3,88	3,79	3,71	3,64	3,57	3,51	3,38	3,03	2,74	2,30	1,98	1,64	1,27	multipla	▲▲▲▲▲
16	0,7	2,47	2,47	2,47	2,47	2,44	2,39	2,35	2,31	2,28	2,24	2,18	2,07	1,74	1,50	1,25	0,97	singola	▲▲
		2,74	2,69	2,64	2,60	2,55	2,51	2,47	2,44	2,40	2,37	2,31	2,25	2,15	1,88	1,56	1,22	multipla	▲▲▲▲▲
	0,8	2,73	2,73	2,73	2,73	2,69	2,64	2,60	2,55	2,51	2,47	2,32	2,10	1,77	1,53	1,27	0,99	singola	▲▲
		3,06	3,00	2,94	2,88	2,83	2,78	2,74	2,70	2,66	2,62	2,55	2,48	2,21	1,91	1,59	1,23	multipla	▲▲▲▲▲
	1,0	3,23	3,23	3,23	3,23	3,17	3,11	3,05	2,99	2,84	2,68	2,40	2,18	1,83	1,58	1,31	1,02	singola	▲▲
		3,58	3,57	3,49	3,42	3,35	3,29	3,23	3,18	3,12	3,07	2,98	2,72	2,29	1,98	1,64	1,28	multipla	▲▲▲▲▲
1,2	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,55	3,38	3,16	2,97	2,80	2,51	2,27	1,92	1,65	1,37	1,07	singola	▲▲	
	3,99	3,99	3,99	3,93	3,85	3,77	3,70	3,63	3,57	3,50	3,14	2,84	2,40	2,07	1,72	1,34	multipla	▲▲▲▲▲	

Figura 3: Tabella di portata relativa alla lamiera grecata

Si calcola in prima battuta un rapporto $\frac{L}{h}$ e si considerano l'azione assiale nel corrente compresso pari all'80% della sua resistenza ultima e la freccia in mezzzeria pari all'80% della freccia limite.

$$\frac{L}{h} = \frac{24 \cdot \gamma_{m0}}{5 n} \frac{q_{SLU}}{q_{SLE}} \frac{E}{f_{yk}}, \quad A_{corr} = \frac{q_{SLU} \cdot L}{6,4 \cdot f_{yk}} \gamma_{m0} \frac{L}{h}.$$

Assumendo $\gamma_{m0} = 1,05$, $E = 210000$ MPa, $f_{yk} = 275$ MPa e $n = 400$, si ricava $\frac{L}{h} = 13,686$ e $A_{corr} = 4388 \text{ mm}^2$.

Per semplicità progettuale, si riduce $\frac{L}{h}$ a 12, ottenendo $h = \frac{L}{12} = 1,5416 \text{ m}$, approssimato a 1,55 m. Calcolando la nuova luce, $L = 12 \cdot 1,55 \text{ m} = 18,6 \text{ m}$.

Si decide di far coincidere l'altezza h delle maglie quadrate laterali con l'interasse dei montanti e con l'interasse dei traversi in modo da avere maglie singole di lato 1,55 m. Tale valore è minore di 2,12 m (luce massima della lamiera grecata per lo spessore scelto). Poichè

$$A_{corr} = \frac{q_{SLU} \cdot L}{6,4 \cdot f_{yk}} \gamma_{m0} \frac{L}{h}. \quad A_{corr} = \frac{29,0525 \text{ (kN/m)} \cdot 18,6 \text{ (m)}}{6,4 \cdot 275 \text{ (MPa)}} \cdot 1,05 \cdot 12.$$

$$A_{corr} = 3868 \text{ mm}^2.$$

Per semplicità costruttiva, si approssima a

$$A_{corr} \approx 3900 \text{ mm}^2.$$

In prossimità dell'appoggio, per diagonale e montante, si ha $V = q_{SLU} \cdot \frac{L}{2} = 270,2 \text{ kN}$.

$$N_{diagonale} = \sqrt{2} V \approx 382 \text{ kN} \quad (\text{trazione}), \quad N_{montante} = V = 270,2 \text{ kN} \quad (\text{compressione}).$$

Si calcolano le aree minime:

$$A_{diagonale} = \frac{N_{diagonale} \gamma_{m0}}{0,8 f_{yk}} \approx 1818 \text{ mm}^2,$$

$$A_{montante} = \frac{N_{montante} \gamma_{m0}}{0,8 f_{yk}} \approx 1289 \text{ mm}^2.$$

Il coefficiente 0,8 tiene conto dei fenomeni di instabilità e/o riduzioni di sezione per fori di bullonatura. Con $L/h = 12$ si hanno 12 diagonali, 11 montanti; la lunghezza dei diagonali è $\sqrt{2} h \approx 2,20 \text{ m}$, quella dei montanti 1,55 m.

Valuto il peso complessivo della trave reticolare:

$$P_{trave} = \gamma_{acciaio} \cdot L \left(2 A_{corr} + \sqrt{2} A_{diagonale} + \left(1 - \frac{h}{L} \right) A_{montante} \right).$$

Posto $\gamma_{acciaio} = 78,50 \cdot 10^{-9} \text{ kN/mm}^3$ e sostituendo i dati numerici, si ottiene $P_{trave} \approx 16,94 \text{ kN}$. Aumentando del 15% per passare alle sezioni commerciali e agli elementi di collegamento:

$$P_{trave} \approx 19,48 \text{ kN},$$

$$g_{tr} = \frac{19,48 \text{ kN}}{18,6 \text{ m}} \approx 1,04 \text{ kN/m} \approx 1,1 \text{ kN/m},$$

$$G_{tr} = \frac{1,1 \text{ kN/m}}{2,5 \text{ m}} \approx 0,44 \text{ kN/m}^2.$$

Capitolo 3 - Analisi strutturale

Per la struttura isostatica in oggetto, l'azione interna è valutabile senza conoscere la sezione degli elementi, essendo sufficiente lo schema strutturale. La trave reticolare è costituita da bielle tra loro incernierate, sollecitate unicamente da carichi concentrati sui nodi superiori.

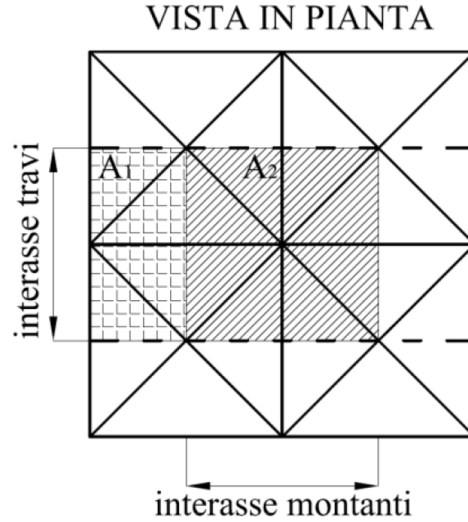


Figura 4: aree di influenza con vista planimetrica

Aree di influenza. Data la simmetria, esistono due aree di influenza: in corrispondenza degli appoggi esterni A_1 e degli appoggi intermedi A_2 .

$$A_1 = (\phi_x \cdot a)(\phi_y \cdot b), \quad A_2 = (\phi_x \cdot a)(\phi_y \cdot b).$$

con a = interasse montanti, b = interasse travi, $\phi_x = 0,5$ per gli appoggi esterni e 1 per gli appoggi intermedi, $\phi_y = 0,5$ per la travatura di estremità e 1 per la travatura di spina.

$$A_1 = (0,5 \cdot 1,55) (1 \cdot 2,5) = 1,937 \text{ m}^2, \quad A_2 = (1 \cdot 1,55) (1 \cdot 2,5) = 3,870 \text{ m}^2.$$

Carichi nodali. Stato limite di esercizio (SLE):

$$F_{0,\text{SLE}} = (G_{\text{tr}} + G + Q) \cdot A_1 = (0,44 + 3,17 + 5,00) \cdot 1,937 = 16,67 \text{ kN} \approx 16,7 \text{ kN}$$

$$F_{1,\text{SLE}} = (G_{\text{tr}} + G + Q) \cdot A_2 = (0,44 + 3,17 + 5,00) \cdot 3,870 = 33,3 \text{ kN} \approx 33 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{0,\text{SLU}} &= (\gamma_g G_{\text{tr}} + \gamma_g G + \gamma_q Q) \cdot A_1 \\ &= (1,3 \cdot 0,44 + 1,3 \cdot 3,17 + 1,5 \cdot 5,00) \cdot 1,937 = 23,61 \text{ kN} \approx 23,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{1,\text{SLU}} &= (\gamma_g G_{\text{tr}} + \gamma_g G + \gamma_q Q) \cdot A_2 \\ &= (1,3 \cdot 0,44 + 1,3 \cdot 3,17 + 1,5 \cdot 5,00) \cdot 3,870 = 47,18 \text{ kN} \approx 47,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Equilibrio della travatura reticolare. La risultante dei carichi concentrati allo SLU è

$$F_d = 2 F_{(0,\text{SLU})} + 11 F_{(1,\text{SLU})} = 2 \cdot 23,6 + 11 \cdot 47,2 = 566,4 \text{ kN},$$

$$V_A = V_B = \frac{F_d}{2} = 283,2 \text{ kN.}$$

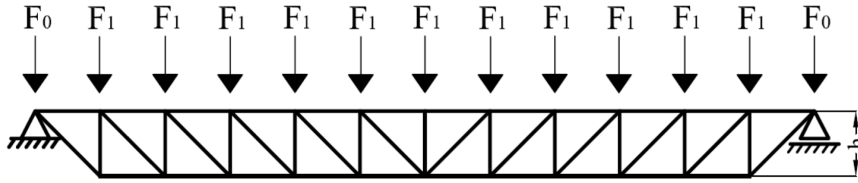


Figura 5: schema delle forze agenti

Imponendo l'equilibrio a metà luce (dove il taglio è nullo e il momento è massimo), si ottiene:

$$C - T = 0 \Rightarrow C = T.$$

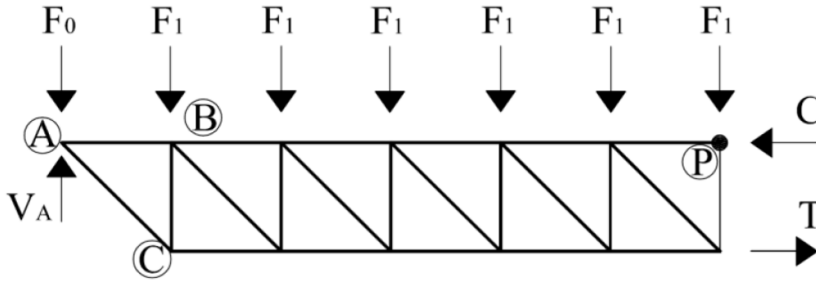


Figura 6: schema delle forze agenti su metà impalcato

Per il calcolo in mezzeria:

$$T \cdot h = (V_A - F_0) \cdot 6h - F_1 \cdot 5h - F_1 \cdot 4h - \dots - F_1 \cdot h = 849,6 \text{ kN.}$$

Da ciò si ricavano le massime azioni assiali sul corrente superiore compresso e su quello inferiore teso. I Valori agenti su diagonale e montante all'appoggio sono: Nel nodo d'appoggio, imponendo l'equilibrio verticale:

$$(V_A - F_0) - \frac{\sqrt{2}}{2} N_{AC} = 0 \Rightarrow N_{AC} = 367,13 \text{ kN, in trazione}$$

$$N_{BC} = (V_A - F_0) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 259,6 \text{ kN, in compressione}$$

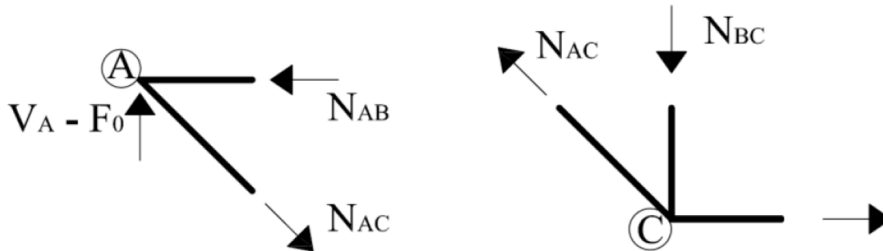


Figura 7: schema delle forze agenti sui nodi più critici

Quindi, l'azione di taglio viene assorbita dalle aste verticali (montanti) e diagonali.

Capitolo 4 - Progetto del Traverso

I traversi sono disposti trasversalmente alle travi reticolari con un passo regolare di 1,55 m, al fine di:

- Trasmettere i carichi distribuiti della soletta alle travature reticolari tramite azioni nodali;
- Collegare le travature reticolari stesse per conferire un comportamento d'insieme più rigido nei confronti delle azioni orizzontali.

I carichi di esercizio agenti sulla passerella pedonale sono:

$$G = 3,17 \text{ kN/m}^2 \quad \text{e} \quad Q = 5 \text{ kN/m}^2,$$

con il peso proprio della trave reticolare che **non** insiste sul traverso. Il peso proprio del traverso viene trascurato in questa fase.

I carichi agenti sul traverso risultano dunque:

$$q_{\text{SLE}} = (G + Q) \cdot 1,55 = (3,17 + 5,00) \cdot 1,55 = 12,66 \text{ kN/m},$$

$$q_{\text{SLU}} = (1,3 \cdot G + 1,5 \cdot Q) \cdot 1,55 = (1,3 \cdot 3,17 + 1,5 \cdot 5,00) \cdot 1,55 = 18,01 \text{ kN/m}.$$

Nell'ipotesi di trave appoggiata agli estremi, si valutano:

$$M_{Ed} = \frac{q_{\text{SLU}} l^2}{8} = \frac{18,01 \cdot (1,55)^2}{8} = 14,07 \text{ kNm},$$

$$V_{Ed} = \frac{q_{\text{SLU}} l}{2} = \frac{18,01 \cdot 1,55}{2} = 22,51 \text{ kN}.$$

Il valore del **momento resistente di progetto** di una sezione in acciaio, in base alle NTC2008, si calcola come:

$$M_{rd} = \frac{W_{pl} f_{yk}}{\gamma_{m0}}.$$

La **freccia** per lo schema di trave appoggiata agli estremi con carico uniformemente distribuito vale:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q_{\text{SLE}} l^4}{E I}.$$

Imponendo l'uguaglianza tra il momento resistente e il momento agente, nonché fra la freccia in mezzzeria e la freccia massima ammissibile ($f_{\text{max}} = \frac{L}{300}$), è possibile valutare i valori minimi di $W_{pl,\text{min}}$ e I_{min} :

$$W_{pl,\text{min}} = \frac{M_{Ed} \gamma_{m0}}{f_{yk}} = \frac{14,07 \cdot 10^6 \text{ N mm} \cdot 1,05}{275 \text{ MPa}} = 53721,81 \text{ mm}^3 = 53,72 \text{ cm}^3,$$

$$I_{\text{min}} = \frac{5}{384} \frac{q_{\text{SLE}} l^4}{E \left(\frac{l}{300}\right)} = \frac{1500}{384} \frac{12,66 \cdot (2500)^3}{210000} = 3679547 \text{ mm}^4 = 367,9 \text{ cm}^4.$$

Designazione nominale	Dati statici												Classificazione					
	I_y	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	i_y	A_{yz}	I_z	$W_{el,z}$	$W_{pl,z}$	i_z	s_s	I_t	$I_w \cdot 10^{-3}$	Flessione			Compressione		
	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	mm	cm ⁴	cm ⁶	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
HE 100 AA	236,5	51,96	58,36	3,89	6,15	92,06	18,41	28,44	2,43	29,26	251	1,68	1	3	-	1	3	-
HE 100 A	349,2	72,76	83,01	4,06	7,56	133,8	26,76	41,14	2,51	35,06	5,24	2,58	1	1	-	1	1	-
HE 100 B	449,5	89,91	104,20	4,16	9,04	167,3	33,45	51,42	2,53	40,06	9,25	3,38	1	1	-	1	1	-
HE 100 M	1 143	190,4	235,80	4,63	18,04	399,2	75,31	116,30	2,74	66,06	68,21	9,93	1	1	-	1	1	-
HE 120 AA	413,4	75,85	84,12	4,72	6,90	158,8	26,47	40,62	2,93	29,26	2,78	4,24	2	3	-	2	3	-
HE 120 A	606,2	106,3	119,5	4,89	8,46	230,9	38,48	58,85	3,02	35,06	5,99	6,47	1	1	-	1	1	-
HE 120 B	864,4	144,1	165,2	5,04	10,96	317,5	52,92	80,97	3,06	42,56	13,84	9,41	1	1	-	1	1	-
HE 120 M	2 018	288,2	350,6	5,51	21,15	702,8	111,6	171,60	3,25	68,56	91,66	24,79	1	1	-	1	1	-
HE 140 AA	719,5	112,4	123,8	5,59	7,92	274,8	39,26	59,93	3,45	30,36	3,54	10,21	3	3	-	3	3	-
HE 140 A	1 033	155,4	173,5	5,73	10,12	389,3	55,62	84,85	3,52	36,56	8,13	15,06	1	2	-	1	2	-
HE 140 B	1 509	215,6	245,4	5,93	13,08	549,7	78,52	119,80	3,58	45,06	20,06	22,48	1	1	-	1	1	-
HE 140 M	3 291	411,4	493,8	6,39	24,46	1 144	156,8	240,50	3,77	71,06	120,0	54,33	1	1	-	1	1	-
HE 160 AA	1 283	173,4	190,4	6,50	10,38	478,7	59,84	91,36	3,97	36,07	6,33	23,75	3	3	-	3	3	-
HE 160 A	1 673	220,1	245,1	6,57	13,21	615,6	76,95	117,6	3,98	41,57	12,19	31,41	1	2	-	1	2	-
HE 160 B	2 492	311,5	354,0	6,78	17,59	889,2	111,2	170,0	4,05	51,57	31,24	47,94	1	1	-	1	1	-
HE 160 M	5 098	566,5	674,6	7,25	30,81	1 759	211,9	325,5	4,26	77,57	162,4	108,1	1	1	-	1	1	-
HE 180 AA	1 967	235,6	258,2	7,34	12,16	730,0	81,1	123,6	4,47	37,57	8,33	46,36	3	3	-	3	3	-
HE 180 A	2 510	293,6	324,9	7,45	14,47	924,6	102,7	156,5	4,52	42,57	14,80	60,21	1	3	-	1	3	-
HE 180 B	3 831	425,7	481,4	7,66	20,24	1 363	151,4	231,0	4,57	54,07	42,16	93,75	1	1	-	1	1	-
HE 180 M	7 483	748,3	883,4	8,13	34,65	2 580	277,4	425,2	4,77	80,07	203,3	199,3	1	1	-	1	1	-

Figura 8: Profilario HEA per la sezione dei traversi

Dalle tabelle di profilari, si sceglie il profilo **HE120AA** (con $I_y = 413,4 \text{ cm}^4$, $w_{pl} = 84,12 \text{ cm}^3$, classe 1) con l'obiettivo di garantire la **verifica della freccia massima** sul traverso:

$$f_{\max} = \frac{L}{300} = \frac{2500}{300} = 8,33 \text{ mm}.$$

HEA-A, HEA, HEB, HEM, TRAVI EUROPEE AD ALI LARGHE - dati geometrici

Norme di riferimento:

Dimensioni: HE 100-1000 UNI 5397 (EU 53)
 HE 1100 fuori normalizzazione
 HEA-A 100-1000 fuori normalizzazione

Tolleranze: EN 10034

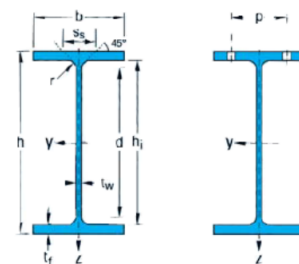


Figura 9: Sezione dei traversi normati

Il **momento resistente effettivo** è:

$$M_{rd} = \frac{W_{pl} f_{yk}}{\gamma_{m0}} = \frac{84,12 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,05} = 22031428 \text{ N mm} = 22,03 \text{ kNm}.$$

Si verifica dunque che:

$$M_{rd} = 22,03 \text{ kNm} > M_{Ed} = 14,07 \text{ kNm}.$$

Il coefficiente di sicurezza relativo è:

$$\frac{M_{rd}}{M_{Ed}} = \frac{22,03}{14,07} = 1,56.$$

Designazione nominale	Massa G kg/m	Dimensioni					Area A cm ²	Dimensioni di costruzione					Superficie da verniciare	
		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm		h _i mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
HE 100 AA	12,2	91	100	4,2	5,5	12	15,60	80	56	M10	54	58	0,553	45,17
HE 100 A	16,7	96	100	5,0	8,0	12	21,24	80	56	M10	54	58	0,561	33,68
HE 100 B	20,4	100	100	6,0	10,0	12	26,04	80	56	M10	56	58	0,567	27,76
HE 100 M	41,8	120	106	12,0	20,0	12	53,24	80	56	M10	62	64	0,619	14,82
HE 120 AA	14,6	109	120	4,2	5,5	12	18,55	98	74	M12	58	68	0,669	45,94
HE 120 A	19,9	114	120	5,0	8,0	12	25,34	98	74	M12	58	68	0,677	34,06
HE 120 B	26,7	120	120	6,5	11,0	12	34,01	98	74	M12	60	68	0,686	25,71
HE 120 M	52,1	140	126	12,5	21,0	12	66,41	98	74	M12	66	74	0,738	14,16
HE 140 AA	18,1	128	140	4,3	6,0	12	23,02	116	92	M16	64	76	0,787	43,53
HE 140 A	24,7	133	140	5,5	8,5	12	31,42	116	92	M16	64	76	0,794	32,21
HE 140 B	33,7	140	140	7,0	12,0	12	42,96	116	92	M16	66	76	0,805	23,88
HE 140 M	63,2	160	146	13,0	22,0	12	80,56	116	92	M16	72	82	0,857	13,56
HE 160 AA	23,8	148	160	4,5	7,0	15	30,36	134	104	M20	76	84	0,901	37,61
HE 160 A	30,4	152	160	6,0	9,0	15	38,77	134	104	M20	78	84	0,906	29,78
HE 160 B	42,6	160	160	8,0	13,0	15	54,25	134	104	M20	80	84	0,918	21,56
HE 160 M	76,2	180	166	14,0	23,0	15	97,05	134	104	M20	86	90	0,970	12,74
HE 180 AA	28,7	167	180	5,0	7,5	15	36,53	152	122	M24	84	92	1,018	35,51
HE 180 A	35,5	171	180	6,0	9,5	15	45,25	152	122	M24	86	92	1,024	28,83
HE 180 B	51,2	180	180	8,5	14,0	15	65,25	152	122	M24	88	92	1,037	20,25
HE 180 M	88,9	200	186	14,5	24,0	15	113,30	152	122	M24	94	98	1,089	12,25

Figura 10: Tabella del peso proprio dei profili

Il peso proprio, da tabella, per il profilo **HE120AA** è 14,6 kg/m.

Verifica a taglio

L'area resistente a taglio e la resistenza a taglio del profilo risultano:

$$A_v = 1,05 \cdot h \cdot t_w = 1,05 \cdot 109 \text{ mm} \cdot 4,2 \text{ mm} = 480,69 \text{ mm}^2,$$

$$V_{c,rd} = \frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3} \gamma_{m0}} = \frac{480,69 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1,05} = 72685 \text{ N} = 72,685 \text{ kN}.$$

Verifica di deformabilità (SLE)

Per la verifica allo Stato Limite di Esercizio, la freccia nello schema di trave appoggio-appoggio con carico distribuito è:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q_{SLE} l^4}{E I}.$$

Sostituendo i valori:

$$f = \frac{5}{384} \frac{12,66 \cdot (2500)^4}{210000 \cdot 413,4 \cdot 10^4} = 7,417 \text{ mm.}$$

Poiché

$$f_{\max} = \frac{l}{300} = \frac{2500}{300} = 8,33 \text{ mm,}$$

la verifica di deformabilità risulta **soddisfatta**, con coefficiente di sicurezza:

$$\frac{f_{\max}}{f} = \frac{8,33}{7,417} \approx 1,23.$$

Capitolo 5 - Progetto corrente superiore compresso

Trattandosi di **asta semplicemente compressa**, si devono effettuare due tipi di verifiche:

- **Verifica di resistenza**
- **Verifica di stabilità**

Dimensiono il profilo imponendo che l'azione assiale agente sia pari all'85% di quella resistente, per tener conto degli effetti legati all'instabilità:

$$N_{rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_{m0}}, \quad N_{ed} = 0,85 \cdot N_{rd}$$

$$N_{ed} = T = C \quad (\text{azioni assiali calcolate in mezzzeria}) = 849,6 \text{ kN.}$$

Valuto dunque l'area minima richiesta:

$$A = \frac{N_{rd} \cdot \gamma_{m0}}{f_{yk}} = \frac{N_{ed} \cdot \gamma_{m0}}{0,85 f_{yk}} = \frac{849,6 \cdot 10^3 \cdot 1,05}{0,85 \cdot 275} = 3816 \text{ mm}^2.$$

Si decide di realizzare il corrente superiore tramite un'**asta composta** costituita da **angolari a lati uguali** ($b = h$) accoppiati con imbottiture. Utilizzando due angolari uguali, l'area di ciascuno di essi deve risultare pari a circa

$$\frac{3816}{2} = 1908 \text{ mm}^2 \approx 19,08 \text{ cm}^2.$$

ANGOLARI A LATI UGUALI O DIVERSI - dati geometrici

Norme di riferimento:

Dimensioni: UNI EU 56

Tolleranze: EN 10256-2

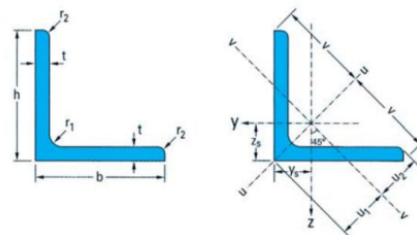


Figura 11: Sezione degli angolari superiore e inferiore

Per fare in modo che il profilo non risulti di **classe 4**, sulla base delle **NTC 2008** si ha:

$$\frac{b}{t} \leq 11,5 \varepsilon \quad \text{con} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}},$$

da cui

$$\frac{b}{t} \leq 10,63.$$

Designazione nominale	Massa	Dimensioni					Area	Dimensioni di costruzione				Posizione degli assi				Superfici da verniciare	
	G kg/m	h = b mm	t mm	r ₁ mm	r ₂ mm	A cm ²	Ø	e _{min} mm	e _{max} mm	A _{net} cm ²	z = y cm	v cm	u ₁ cm	u ₂ cm	A _L m ² /m	A _G m ² /t	
L 90 x 90 x 7	9,6	90	7	11	5,5	12,24	-	-	-	-	2,45	6,36	3,47	3,16	0,351	36,48	
L 90 x 90 x 8	10,9	90	8	11	5,5	13,89	-	-	-	-	2,50	6,36	3,53	3,17	0,351	32,15	
L 90 x 90 x 9	12,2	90	9	11	5,5	15,52	-	-	-	-	2,54	6,36	3,59	3,18	0,351	28,77	
L 100 x 100 x 8	12,2	100	8	12	6	15,51	M27	48	53	13,11	2,74	7,07	3,87	3,52	0,390	32,00	
L 100 x 100 x 10	15,0	100	10	12	6	19,20	M27	50	53	16,15	2,82	7,07	3,99	3,54	0,390	25,92	
L 100 x 100 x 12	17,8	100	12	12	6	22,71	M27	52	53	19,11	2,90	7,07	4,11	3,57	0,390	21,86	
L 110 x 110 x 10	16,6	110	10	13	6,5	21,18	M27	50	62	18,18	3,06	7,78	4,33	3,88	0,429	25,79	
L 110 x 110 x 12	19,7	110	12	13	6,5	25,14	M27	52	62	21,54	3,15	7,78	4,45	3,91	0,429	21,73	
L 120 x 120 x 10	18,2	120	10	13	6,5	23,18	M27	50	72	20,18	3,31	8,49	4,69	4,24	0,469	25,76	
L 120 x 120 x 11	19,9	120	11	13	6,5	25,37	M27	51	72	22,07	3,36	8,49	4,75	4,25	0,469	23,54	
L 120 x 120 x 12	21,6	120	12	13	6,5	27,54	M27	52	72	23,94	3,40	8,49	4,80	4,26	0,469	21,69	
L 120 x 120 x 13	23,3	120	13	13	6,5	29,69	M27	53	72	25,79	3,44	8,49	4,86	4,28	0,469	20,12	
L 120 x 120 x 15	26,6	120	15	13	6,5	33,93	M27	55	72	29,43	3,51	8,49	4,97	4,31	0,469	17,60	
L 130 x 130 x 12	23,5	130	12	14	7	30,00	M27	52	82	26,37	3,64	9,19	5,15	4,60	0,508	21,59	
L 140 x 140 x 10	21,4	140	10	15	7,5	27,24	M27	51	92	24,24	3,79	9,90	5,37	4,93	0,547	25,59	
L 140 x 140 x 13	27,4	140	13	15	7,5	34,95	M27	54	92	31,05	3,92	9,90	5,55	4,96	0,547	19,94	
L 150 x 150 x 10	23,0	150	10	16	8	29,27	M27	52	102	26,27	4,03	10,61	5,71	5,28	0,586	25,51	
L 150 x 150 x 12	27,3	150	12	16	8	34,83	M27	54	102	31,23	4,12	10,61	5,83	5,29	0,586	21,44	
L 150 x 150 x 14	31,6	150	14	16	8	40,31	M27	56	102	36,11	4,21	10,61	5,95	5,32	0,586	18,53	
L 150 x 150 x 15	33,8	150	15	16	8	43,02	M27	57	102	38,52	4,25	10,61	6,01	5,33	0,586	17,36	
L 150 x 150 x 18	40,1	150	18	16	8	51,03	M27	61	102	45,63	4,37	10,61	6,17	5,37	0,586	14,63	

Figura 12: Profilario degli angolari superiore e inferiore

Designazione nominale	Dati statici								Classificazione	
	Asse y-y		Asse z-z		Asse u-u		Asse v-v		Compressione pura	
	I _y = I _z cm ⁴	W _{el,y} = W _{el,z} cm ³	I _y = I _z cm ⁴	W _{el,y} = W _{el,z} cm ³	I _u cm ⁴	I _v cm ⁴	I _y cm ⁴	I _v cm ⁴	S235	S355
L 90 x 90 x 7	92,5	14,13	2,75	147,1	3,47	38,02	1,76	-54,53	4	4
L 90 x 90 x 8	104,4	16,05	2,74	165,9	3,46	42,87	1,76	-61,51	3	4
L 90 x 90 x 9	115,8	17,93	2,73	184,0	3,44	47,63	7,75	-68,20	1	4
L 100 x 100 x 8	144,8	19,94	3,06	230,2	3,85	59,47	1,96	-85,37	4	4
L 100 x 100 x 10	176,7	24,62	3,04	280,7	3,83	72,65	1,95	-104,0	1	4
L 100 x 100 x 12	206,7	29,12	3,02	328,0	3,80	85,42	1,94	-121,3	1	2
L 110 x 110 x 10	238,0	29,99	3,35	378,2	4,23	97,72	2,15	-140,3	2	4
L 110 x 110 x 12	279,1	35,54	3,33	443,3	4,20	115,0	2,14	-164,1	1	3
L 120 x 120 x 10	312,9	36,03	3,67	497,6	4,63	128,3	2,35	-184,6	4	4
L 120 x 120 x 11	340,6	39,41	3,66	541,5	4,62	139,8	2,35	-200,9	2	4
L 120 x 120 x 12	367,7	42,73	3,65	584,3	4,61	151,0	2,34	-216,6	1	4
L 120 x 120 x 13	394,0	46,01	3,64	625,9	4,59	162,2	2,34	-231,8	1	3
L 120 x 120 x 15	444,9	52,43	3,62	705,6	4,56	184,2	2,33	-260,7	1	1

Figura 13: Profilario degli angolari superiore e inferiore

Scegliendo un angolare $100 \times 100 \times 10$ si ha:

$$I_y = 1767000 \text{ mm}^4, \quad A = 1920 \text{ mm}^2, \quad \frac{b}{t} = 10 \leq 10,63.$$

Gli angolari possono avere una **massima distanza** tra loro di

$$3t = 3 \cdot 10 = 30 \text{ mm},$$

Lo spessore delle piastre per le imbottiture è:

$$15 \text{ mm}$$

Mentre il valore minimo per l'interasse tra le piastre è:

$$I_y = 15 \cdot 30,4 = 456 \text{ mm}$$

Si realizzano dunque le imbottiture con **piatti di spessore 15 mm** ad interasse 500 mm. Con tale interasse, è possibile studiare il corrente come **asta semplice** (trascurando la deformabilità a taglio del collegamento).

Data la simmetria della sezione composta, l'asse baricentrico verticale **coincide con l'asse di simmetria**. La posizione del baricentro della sezione composta rispetto all'estradosso degli angolari vale $z_g = 28,2 \text{ mm}$ (da tabella, colonna $z = y$).

Si calcolano dunque le proprietà del corrente:

$$I_{y,\text{corr}} = 2 \cdot I_y = 2 \cdot 1767000 \text{ mm}^4 = 3,534 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{z,\text{corr}} = 2 \cdot I_y + 2 \cdot A \cdot (z_g + r_2)^2 = 2 \cdot 1767000 + 2 \cdot 1920 \cdot (28,2 + 6)^2 = 8025417 \text{ mm}^4 \approx 8,025 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A = 2 \cdot 1920 = 3840 \text{ mm}^2$$

Il corrente compresso è vincolato all'impalcato in corrispondenza di ciascuna asta di parete. Assumendo **infinita la rigidità** dell'impalcato nel piano, è possibile considerare la lunghezza di libera inflessione del corrente

$$l_0 = 1 \text{ m}.$$

Calcolo del **carico critico** e della **snellezza adimensionalizzata** attorno all'asse debole:

$$N_{y,\text{cr}} = \frac{\pi^2 (E I_y)}{l_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot (210000 \text{ MPa} \cdot 3,534 \cdot 10^6 \text{ mm}^4)}{1000^2 \text{ mm}^2} = 7,324 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{y,\text{cr}}}} = \sqrt{\frac{3840 \cdot 275}{7,324 \cdot 10^6}} = 0,3797$$

Il coefficiente di imperfezione α è pari a 0.49 (da normativa NTC2008).

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,49 (0,3797 - 0,2) + 0,3797^2 \right] = 0,616$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,616 + \sqrt{0,616^2 - 0,3797^2}} = 0,9082$$

Calcolo finale della **capacità portante a compressione**, tenendo conto degli effetti del secondo ordine:

$$N_{rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{m0}} = 0,9082 \cdot 3840 \cdot \frac{275}{1,05} = 913389,71 \text{ N} \approx 913,38 \text{ kN}$$

Verifica:

$$N_{rd} = 913,38 \text{ kN} > N_{ed} = 849,6 \text{ kN}$$

Il coefficiente di sicurezza risulta:

$$\frac{N_{rd}}{N_{ed}} = \frac{913,38}{849,6} = 1,07.$$

La verifica è pertanto soddisfatta.

Capitolo 6 - Progetto del corrente inferiore teso

Per il **corrente inferiore teso**, al fine di ottenere omogeneità costruttiva con il corrente superiore compresso, si adotta lo stesso profilo composto da due angolari $100 \cdot 100 \cdot 10$ accoppiati con piatti di imbottitura di spessore 15 mm.

Poiché, per **equilibrio alla traslazione orizzontale** interno alla travatura reticolare, l'azione assiale sollecitante il corrente superiore compresso è **uguale** all'azione assiale sollecitante il corrente inferiore teso, si ha la stessa sollecitazione $N_{Ed} = 849,6 \text{ kN}$.

Verifica a trazione della sezione lorda

La **resistenza plastica** della sezione lorda si calcola come:

$$N_{pl,rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_{m0}},$$

dove A è l'area complessiva del profilo composto. Dalle scelte progettuali:

$$A = 3840 \text{ mm}^2, \quad f_{yk} = 275 \text{ MPa}, \quad \gamma_{m0} = 1,05.$$

Sostituendo i valori numerici:

$$N_{pl,rd} = \frac{3840 \cdot 275}{1,05} = 1,005,714 \text{ N} \approx 1005 \text{ kN}.$$

Essendo

$$N_{Ed} = 849,6 \text{ kN},$$

la verifica risulta soddisfatta con un coefficiente di sicurezza:

$$\frac{N_{pl,rd}}{N_{Ed}} = \frac{1005}{849,6} = 1,183.$$

Verifica a trazione della sezione netta

In presenza di **fori** per i collegamenti, la Normativa richiede di valutare la resistenza a rottura **della sezione netta**. Con bulloni M18, si hanno fori di diametro pari a 19 mm. L'area netta diventa:

$$A_{\text{net}} = 2 \cdot (A - \text{diam} \cdot \text{spessore}) = 2 \cdot (1920 - 19 \cdot 13) = 3460 \text{ mm}^2.$$

Assumendo $f_{tk} = 430 \text{ MPa}$ (acciaio S275) e $\gamma_{m2} = 1,25$, la **resistenza a rottura** della sezione netta si scrive:

$$N_{u,rd} = 0,9 \frac{A_{\text{net}} f_{tk}}{\gamma_{m2}} = 0,9 \cdot \frac{3460 \cdot 430}{1,25} \approx 1,071,000 \text{ N} = 1071 \text{ kN}.$$

Poiché

$$N_{u,rd} = 1071 \text{ kN} \quad \text{e} \quad N_{Ed} = 849,6 \text{ kN},$$

anche la **verifica a trazione della sezione netta** risulta soddisfatta.

Inoltre, è rispettata la **gerarchia delle resistenze** richiesta dalla Normativa:

$$N_{pl,rd} \leq N_{u,rd},$$

il che conferma la bontà della scelta progettuale per il corrente inferiore teso.

Capitolo 7 - Progetto del montante compresso

Trattandosi di **asta semplicemente compressa**, si devono effettuare due tipi di verifiche:

- **Verifica di resistenza**
- **Verifica di stabilità**

Per il predimensionamento, si impone che l'**azione assiale agente** sia pari all'85% di quella resistente (inclusendo gli effetti legati all'instabilità). Dalle **NTC 2008**, la resistenza plastica di una sezione in acciaio si calcola con:

$$N_{pl,rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_{m0}},$$

da cui

$$N_{ed} = 0,85 N_{rd} \quad \text{e} \quad N_{ed} = 259,6 \text{ kN}.$$

Si determina l'**area minima** richiesta per la sezione:

$$A_{\text{min}} = \frac{N_{ed} \gamma_{m0}}{0,85 f_{yk}} = \frac{259,6 \cdot 10^3 \cdot 1,05}{0,85 \cdot 275} = 1166,12 \text{ mm}^2.$$

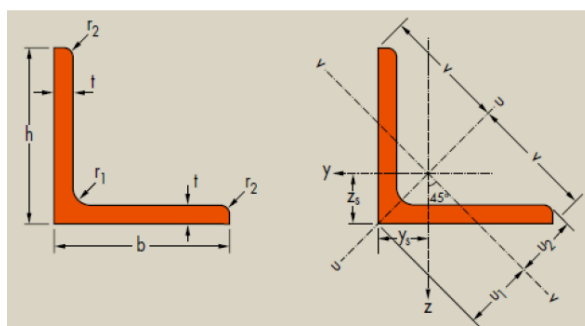


Figura 14: rappresentazione sezionale del montante compresso

Scelta del profilo

Si realizza l'asta di parete con **due angolari a lati uguali** accoppiati con imbottiture. Pertanto, ciascun angolare deve avere un'area pari a:

$$\frac{A_{\min}}{2} = \frac{1166,12}{2} = 583,06 \text{ mm}^2.$$

Per evitare che il profilo risulti di **Classe 4**, secondo NTC 2008 deve valere:

$$\frac{b}{t} \leq 11,5 \varepsilon \quad \text{con} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}},$$

da cui

$$\frac{b}{t} \leq 10,63.$$

Denominación Designation Designazione	Dimensiones Dimensions Dimensioni				A mm ² x10 ²	Posición de los ejes Position of axes Posizione degli assi				Superficie Surface Superficie	
G kg/m	h=b mm	t mm	r ₁ mm	r ₂ mm		z _y =y _s mm x10	v mm x10	u ₁ mm x10	u ₂ mm x10	A _L m ² /m	A _C m ² /t
L 50 x 50 x 4 ^{*/A}	3,06	50	4	7	3,89	1,36	3,54	1,92	1,75	0,194	63,49
L 50 x 50 x 5 ^{*/A}	3,77	50	5	7	4,80	1,40	3,54	1,99	1,76	0,194	51,46
L 50 x 50 x 6 ^{*/A}	4,47	50	6	7	5,69	1,45	3,54	2,04	1,77	0,194	43,41
L 50 x 50 x 7 ^{*/A}	5,15	50	7	7	6,56	1,49	3,54	2,10	1,78	0,194	37,66
L 55 x 55 x 5 ^{*/A}	4,18	55	5	8	5,32	1,52	3,89	2,15	1,93	0,213	51,05
L 55 x 55 x 6 ^{*/A}	4,95	55	6	8	6,31	1,56	3,89	2,21	1,94	0,213	43,04
L 60 x 60 x 4 ^{*/A}	3,70	60	4	8	4,71	1,60	4,24	2,26	2,10	0,233	63,07
L 60 x 60 x 5 ^{*/A}	4,57	60	5	8	5,82	1,64	4,24	2,32	2,11	0,233	51,04
L 60 x 60 x 6 ^{*/A}	5,42	60	6	8	6,91	1,69	4,24	2,39	2,11	0,233	42,99
L 60 x 60 x 8 ^{*/A}	7,09	60	8	8	9,03	1,77	4,24	2,50	2,14	0,233	32,89
L 65 x 65 x 6 ^{*/A}	5,91	65	6	9	7,53	1,80	4,60	2,55	2,28	0,252	42,70
L 65 x 65 x 7 ^{*/A}	6,83	65	7	9	8,70	1,85	4,60	2,61	2,29	0,252	36,95
L 65 x 65 x 8 ^{*/A}	7,73	65	8	9	9,85	1,89	4,60	2,67	2,31	0,252	32,64

Figura 15: tabella delle proprietà geometriche del profilo del montante

Scegliendo un angolare $60 \times 60 \times 6$ si ha:

$$I_y = 227,900 \text{ mm}^4, \quad A = 691 \text{ mm}^2, \quad \frac{b}{t} = 10,0 \leq 10,63.$$

Gli angolari possono avere una distanza massima di:

$$3t = 3 \cdot 6 = 18 \text{ mm},$$

mentre l'interasse massimo delle imbottiture è:

$$15 \cdot i_y = 15 \cdot 18,2 = 273,0 \text{ mm}.$$

Si realizzano dunque le imbottiture con piatti di spessore 15 mm ad interasse 250 mm.

Proprietà della sezione composta

Considerando la sezione costituita da **due angolari**, la simmetria fa sì che l'asse baricentrico verticale coincida con l'asse di simmetria. La posizione del baricentro rispetto all'estradosso degli angolari è $z_g = 16,9 \text{ mm}$.

$$I_{y,\text{corr}} = 2 \cdot I_y = 2 \cdot 227,900 = 455,800 \text{ mm}^4 = 4,558 \cdot 10^5 \text{ mm}^4,$$

$$I_{z,\text{corr}} = 2 \cdot I_y + 2 \cdot A (z_g + r_2)^2 = 2 \cdot 227,900 + 2 \cdot 691 \cdot (16,9 + 4)^2 = 1,059,471 \text{ mm}^4,$$

$$A = 2 \cdot 691 = 1382 \text{ mm}^2.$$

Denominación Designation Designazione	Propiedades del perfil / Section properties / Proprietà geometriche del profilo									Classification EN 1993-1-1: 2005		EN 10025-2: 2004	EN 10025-4: 2004	EN 10225:2001
	eje y-y / eje z-z axis y-y / axis z-z asse y-y / asse z-z			eje u-u axis u-u asse u-u		eje v-v axis v-v asse v-v				Pure compression				
	G kg/m	$I_y = I_z$ mm ⁴ x10 ⁴	$W_{el,y} = W_{el,z}$ mm ³ x10 ³	$i_y = i_z$ mm x10	I_u mm ⁴ x10 ⁴	i_u mm x10	I_v mm ⁴ x10 ⁴				i_v mm x10			
L 50 x 50 x 4	3,06	8,97	2,46	1,52	14,25	1,91	3,70	0,97	-5,28	2	3	✓		
L 50 x 50 x 5	3,77	10,96	3,05	1,51	17,41	1,90	4,52	0,97	-6,45	1	2	✓		
L 50 x 50 x 6	4,47	12,84	3,61	1,50	20,37	1,89	5,31	0,97	-7,53	1	1	✓		
L 50 x 50 x 7	5,15	14,61	4,16	1,49	23,14	1,88	6,09	0,96	-8,52	1	1	✓		
L 55 x 55 x 5	4,18	14,71	3,70	1,66	23,37	2,10	6,06	1,07	-8,66	1	3	✓		
L 55 x 55 x 6	4,95	17,29	4,39	1,66	27,44	2,09	7,13	1,06	-10,16	1	1	✓		
L 60 x 60 x 4	3,70	15,78	3,58	1,83	25,04	2,31	6,51	1,18	-9,26	3	3	✓		
L 60 x 60 x 5	4,57	19,37	4,45	1,82	30,77	2,30	7,97	1,17	-11,40	2	3	✓		
L 60 x 60 x 6	5,42	22,79	5,29	1,82	36,20	2,29	9,38	1,17	-13,41	1	2	✓		
L 60 x 60 x 8	7,09	29,15	6,89	1,80	46,19	2,26	12,11	1,16	-17,04	1	1	✓		
L 65 x 65 x 6	5,91	29,19	6,21	1,97	46,36	2,48	12,01	1,26	-17,17	1	3	✓		
L 65 x 65 x 7	6,83	33,43	7,18	1,96	53,08	2,47	13,78	1,26	-19,65	1	1	✓		
L 65 x 65 x 8	7,73	37,49	8,13	1,95	59,46	2,46	15,52	1,26	-21,97	1	1	✓		

Figura 16: tabella delle inerzie del profilo del montante

Assumendo come **lunghezza di libera inflessione** dell'elemento $l_0 = 1$ m, si calcola il carico critico e la snellezza **attorno all'asse debole**:

$$N_{y,cr} = \frac{\pi^2 (E \cdot I_{y,corr})}{l_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot (210000 \text{ MPa}) \cdot 4,558 \cdot 10^5 \text{ mm}^4}{1000^2 \text{ mm}^2} = 944,698 \text{ kN}.$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{1382 \cdot 275}{944698}} = 0,634.$$

Il coefficiente di imperfezione α (da NTC2008) è 0,49.

$$\Phi = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 [1 + 0,49 (0,634 - 0,2) + (0,634)^2] = 0,807.$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,807 + \sqrt{(0,807)^2 - (0,634)^2}} = 0,765.$$

Verifica finale a compressione

Tenendo conto degli effetti del **secondo ordine**, la capacità portante a compressione è:

$$N_{rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{m0}} = 0,765 \cdot 1382 \cdot \frac{275}{1,05} \approx 276893 \text{ N} = 276,893 \text{ kN}.$$

Essendo:

$$N_{ed} = 259,6 \text{ kN},$$

si ha

$$N_{rd} = 276,893 \text{ kN} > 259,6 \text{ kN}.$$

La verifica risulta quindi **soddisfatta**, con coefficiente di sicurezza:

$$\frac{N_{rd}}{N_{ed}} = \frac{276,893}{259,6} = 1,06.$$

Capitolo 8 - Progetto dell'asta diagonale tesa

Si esegue il **predimensionamento** dell'asta diagonale, imponendo che:

$$N_{rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{m0}},$$

e considerando

$$N_{ed} = N_{rd}.$$

Dall'equilibrio strutturale, l'**azione assiale** agente sull'elemento diagonale (denominata N_{ac}) è:

$$N_{ed} = 367,1298 \text{ kN}.$$

L'area minima richiesta risulta:

$$A = \frac{N_{rd} \gamma_{m0}}{f_{yk}} = \frac{(367,1298 \cdot 10^3) \cdot 1,05}{275} = 1401 \text{ mm}^2.$$

Si decide di realizzare l'asta di parete con due angolari a lati uguali accoppiati con imbottiture. Utilizzando due angolari uguali, ciascuno deve avere:

$$\frac{A}{2} = \frac{1401}{2} = 700,88 \text{ mm}^2.$$

Vengono scelti due angolari $75 \cdot 75 \cdot 5$ ($A = 734 \text{ mm}^2$), accoppiati con piatti di imbottitura di spessore 15 mm.

Verifica a trazione della sezione lorda

La resistenza plastica della sezione lorda ($A = 2 \cdot 734 = 1468 \text{ mm}^2$) è:

$$N_{pl,rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{m0}} = \frac{(2 \cdot 734) \cdot 275}{1,05} = 384476 \text{ N} = 384,476 \text{ kN}.$$

Essendo

$$N_{ed} = 367,1298 \text{ kN},$$

la verifica risulta soddisfatta con coefficiente di sicurezza:

$$\frac{N_{pl,rd}}{N_{ed}} = \frac{384,476}{367,1298} = 1,047.$$

Verifica a trazione della sezione netta

In presenza di fori per i collegamenti, la Normativa richiede la verifica della resistenza a rottura della sezione netta. Con bulloni M18, si hanno fori di diametro $\phi = 19 \text{ mm}$. Quindi:

$$A_{\text{net}} = 2 \cdot (A - \phi \cdot s) = 2 \cdot (734 - 19 \cdot 5) = 1278 \text{ mm}^2.$$

Per acciaio S275 si assume $f_{tk} = 430 \text{ MPa}$ e $\gamma_{m2} = 1,25$. La resistenza a rottura della sezione netta è:

$$N_{u,rd} = 0,9 \frac{A_{\text{net}} f_{tk}}{\gamma_{m2}} = 0,9 \cdot \frac{1278 \cdot 430}{1,25} \approx 395668 \text{ N} = 395,668 \text{ kN}.$$

Poiché

$$N_{u,rd} = 395,668 \text{ kN} \quad \text{e} \quad N_{ed} = 367,1298 \text{ kN},$$

la verifica a trazione della sezione netta risulta anch'essa soddisfatta.

Infine, risulta rispettata la gerarchia delle resistenze, come richiesto dalla Normativa:

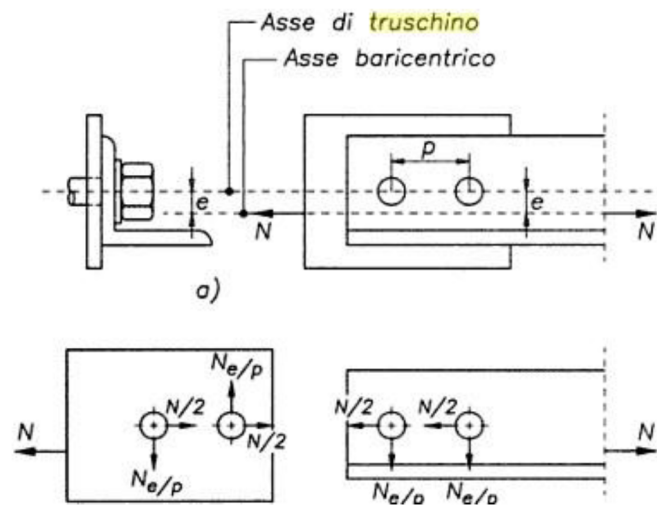
$$N_{pl,rd} \leq N_{u,rd},$$

a conferma della scelta progettuale per l'asta diagonale tesa.

Capitolo 9 - Progetto di un giunto bullonato

Si progetta ora uno dei giunti bullonati tra **corrente** e **diagonale tesa**, considerando i seguenti aspetti principali:

1. Occorre effettuare una tracciatura precisa del nodo, affinché le linee d'asse (assi baricentrici) si incontrino esattamente nella cerniera ipotizzata in sede di analisi strutturale, evitando la nascita di eccentricità indesiderate.
2. Non è praticamente mai possibile forare i profili in corrispondenza degli assi baricentrici, a causa della curvatura trasversale degli elementi. Per i profili angolari a L, si fora in corrispondenza dell'**asse di truschino**, che approssima la mezzzeria dell'ala.



L'**eccentricità** tra l'asse baricentrico e l'asse di truschino comporta la nascita di un **momento parassita**, e i bulloni risultano sottoposti a coppia torcente che genera un'azione tagliente supplementare. Il **collegamento** in esame è costituito da un **piatto di acciaio** (fazzoletto) di spessore opportuno, con fori realizzati per il passaggio di **bulloni M18**.

I passi di dimensionamento del giunto sono:

1. **Dimensionamento dei bulloni**
2. **Individuazione delle limitazioni geometriche** sulla posizione dei fori
3. **Calcolo del momento parassita** e verifica a tranciamento dei bulloni
4. **Verifica a rifollamento** del profilato
5. **Progetto del piatto in acciaio (fazzoletto) di unione**, con verifica a rifollamento

Giunto diagonale-corrente

La massima sollecitazione normale del diagonale teso è:

$$N_{ed} = 367,1298 \text{ kN}.$$

Secondo la Normativa, la **resistenza di calcolo a taglio** di un bullone 5.6 è:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{tb} A_{res}}{\gamma_{m2}} \quad \text{con} \quad f_{tb} = 500 \text{ MPa}.$$

Azioni sui bulloni

L'azione di taglio agente su ciascun bullone, dovuta alla **forza assiale** N_{ed} , è:

$$F_{v,Ed}^N = \frac{N_{ed}}{n_s n_b}$$

dove $n_s = 2$ (piani di taglio) e $n_b = 5$ (numero di bulloni). Dunque:

$$F_{v,Ed}^N = \frac{367,1298}{2 \cdot 5} = 36,71298 \text{ kN}.$$

Ponendo

$$F_{v,Rd} = F_{v,Ed}^N,$$

e invertendo la formula $F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{tb} A_{res}}{\gamma_{m2}}$, si ricava:

$$A_{res} = \frac{\gamma_{m2} F_{v,Rd}}{0,6 f_{tb}} = \frac{1,25 \cdot 36,71298 \cdot 10^3}{0,6 \cdot 500} = 152,97 \text{ mm}^2.$$

Adottando bulloni M18, l' A_{res} reale è 192 mm^2 . I fori hanno diametro

$$d_0 = d + 1 = 18 + 1 = 19 \text{ mm}.$$

Limitazioni geometriche

Dalla Normativa, i principali **vincoli** sulla posizione dei fori sono:

$$e_{1,\min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 19 = 22,8 \text{ mm} \quad (= e_{2,\min}),$$

$$e_{1,\max} = 4 t + 40 = 4 \cdot 5 + 40 = 62 \text{ mm} \quad (= e_{2,\max}),$$

$$p_{1,\min} = 2,2 d_0 = 2,2 \cdot 19 = 41,8 \text{ mm}, \quad p_{1,\max} = \min\{14 t; 200\} = \min\{14 \cdot 5; 200\} = 70 \text{ mm}.$$

In modo **cautelativo** si pongono:

$$e_1 = 2,5 d = 2,5 \cdot 18 = 45 \text{ mm}, \quad e_2 = 40 \text{ mm}, \quad p_1 = 3 d = 3 \cdot 18 = 54 \text{ mm}.$$

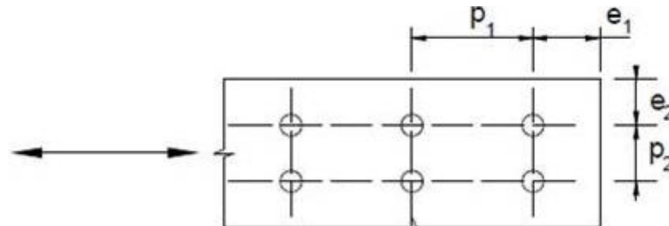


Figura 17: limitazioni posizionamento dei bulloni

Momento parassita

L'eccentricità tra l'asse di tracciatura adottato (e_2) e l'asse di truschino (y_g , profilo) genera un momento parassita:

$$e = e_2 - y_{g,\text{profilo}} = 40 \text{ mm} - 20,1 \text{ mm} = 19,9 \text{ mm}.$$

$$M_P = N \cdot e = 367,13 \text{ kN} \cdot 19,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 7,306 \text{ kNm}.$$

Verifica a taglio: azioni combinate

Il taglio dovuto sia alla **forza assiale** N sia al **momento parassita** M_P si scompone come:

$$F_{v,Ed}^N = \frac{N_{ed}}{n_s n_b} = \frac{367,1298}{2 \cdot 5} = 36,71298 \text{ kN}.$$

$$F_{v,Ed}^M = \frac{(6 M_P / n_s)}{p_1 n_b (n_b + 1)} = \frac{(6 \cdot 7,306 / 2)}{54 \cdot 5 \cdot (5 + 1)} = 13,52 \text{ kN}.$$

L'azione totale agente su ciascun bullone è:

$$F_{v,Ed,NM} = \sqrt{\left(F_{v,Ed}^N\right)^2 + \left(F_{v,Ed}^M\right)^2} = \sqrt{(36,71298)^2 + (13,52)^2} = 33,96 \text{ kN}.$$

Tale valore deve risultare minore della **resistenza a taglio**:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{tb} A_{\text{res}}}{\gamma_{m2}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 192}{1,25} = 46,08 \text{ kN}.$$

La condizione risulta **verificata** con coefficiente di sicurezza:

$$F_s = \frac{F_{v,Rd}}{F_{v,Ed,NM}} = \frac{46,08}{33,96} = 1,35.$$

Verifica a rifollamento

La forza di contatto $F_{b,Rd}$ si calcola come:

$$F_{b,Rd} = \frac{k \alpha f_{tk} d t}{\gamma_{m2}},$$

dove:

$$\alpha = \min\left\{\frac{e_1}{3 d_0}, \frac{f_{tb}}{f_{tk}}, 1\right\} = \min\left\{\frac{45}{3 \cdot 19}, \frac{500}{430}, 1\right\} = 0,79,$$

$$k = \min\left\{2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7, 2,5\right\} = \min\left\{2,8 \cdot \frac{40}{19} - 1,7, 2,5\right\} = 2,5.$$

La **compressione** esercitata dal bullone sul foro deve essere $\leq$ della resistenza di calcolo a rifollamento sia del **profilato** sia del **fazzoletto**.

Rifollamento del profilato

$$F_{b,Ed,profilato} = 33,96 \text{ kN},$$
$$F_{b,Rd} = \frac{k \alpha f_{tk} d t}{\gamma_{m2}} = \frac{2,5 \cdot 0,79 \cdot 430 \cdot 19 \cdot 5}{1,25} = 64,543 \text{ kN}.$$

Il coefficiente di sicurezza è:

$$\frac{F_{b,Rd}}{F_{b,Ed,profilato}} = \frac{64,543}{33,96} \approx 1,898.$$

Rifollamento del fazzoletto

Per il **fazzoletto**, l'azione agente (essendo un piatto unico per i due profili ad L) può risultare maggiore; *ad esempio*:

$$F_{b,Ed,fazzoletto} = 68,0 \text{ kN} \text{ (dato di progetto).}$$

La resistenza a rifollamento resta:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,79 \cdot 430 \cdot 19 \cdot 15}{1,25} = 193,629 \text{ kN}.$$

Il coefficiente di sicurezza è:

$$\frac{F_{b,Rd}}{F_{b,Ed,fazzoletto}} = \frac{193,629}{68,0} \approx 2,847.$$

Come si evince, i due profili ad L vengono **imbullonati** a un unico fazzoletto, e l'azione agente sul fazzoletto risulta **doppia** rispetto a quella sui singoli profili ad L. Il progetto e la verifica del **giunto bullonato** risultano pertanto **compiuti** e **conformi** alle Normative.

Capitolo 10 - Stati limite di deformazione e vibrazione

Cedimenti elastici

La **freccia in mezzzeria** per una trave appoggiata agli estremi, soggetta a carico distribuito e tenendo conto della **deformabilità a taglio**, può essere definita dalla seguente espressione generale:

$$f = \frac{5}{384} \frac{p l^4}{E I} + \frac{18 p l^2}{G A_v} = \frac{5}{384} \frac{p l^4}{E I} \left(1 + 9,6 \frac{E I}{G A_v l^2} \right).$$

Nel caso di **trave reticolare**, è necessario definire un *momento d'inerzia equivalente* e una *rigidezza a taglio equivalente* $G A_v$. Se i **correnti** superiore ed inferiore sono uguali, il momento d'inerzia si calcola come:

$$I = 2 I_{\text{corrente}} + 2 A_{\text{corrente}} \left(\frac{h}{2} \right)^2.$$

Con $A_{\text{corrente}} = 3840 \text{ mm}^2$, $I_{\text{corrente}} = 3,534 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ e $h = 1550 \text{ mm}$, si ottiene:

$$I = 2 \cdot 3,534 \cdot 10^6 + 2 \cdot 3840 \left(\frac{1550}{2} \right)^2 = 4,619 \cdot 10^9 \text{ mm}^4.$$

Per quanto riguarda $G A_v$, si effettua un'analogia tra la maglia della trave reticolare e un concio di trave compatta, *ric conducendo* il contributo di diagonali e montanti a una **rigidezza a taglio globale**.

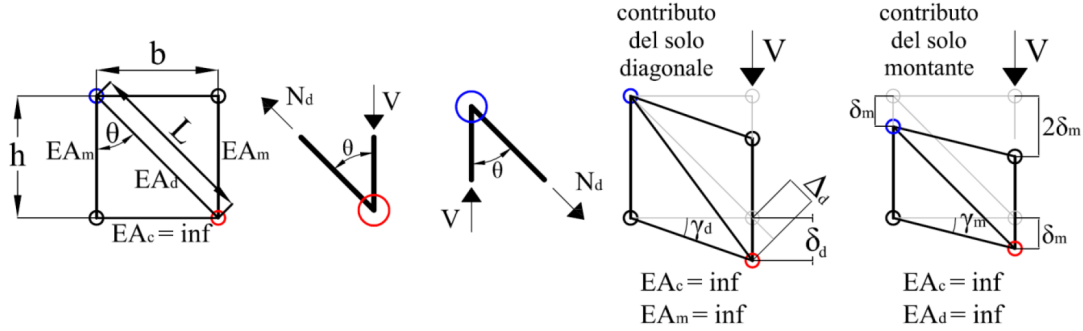


Figura 18: rappresentazione delle deformazioni delle maglie

Allungamento diagonale.

$$\Delta d = \frac{N_d L}{E A_d}, \quad \delta_d = \frac{\Delta d}{\cos \theta}, \quad N_d = \frac{V}{\cos \theta}.$$

Allungamento montante.

$$\delta_m = \frac{N_m h}{E A_m}, \quad N_m = V.$$

Lo **spostamento verticale** complessivo in una maglia risulta:

$$\delta = \delta_d + \delta_m = \frac{V L}{E A_d} \frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{V h}{E A_m}.$$

La **deformazione angolare** (rotazione del corrente) è:

$$\gamma = \frac{\delta_d}{b} + \frac{\delta_m}{b} = \frac{V L}{b E A_d} \frac{1}{\cos^2 \theta} + \frac{V h}{b E A_m}.$$

Sfruttando il legame geometrico $\cos \theta = \frac{h}{L}$ e osservando che $h = b = \frac{L}{\sqrt{2}}$ (*reticolare con diagonali a 45°*), si ottiene:

$$\gamma = \frac{V L^3}{b h^2 E A_d} + \frac{V h}{b E A_m} = \frac{V L^3}{b h^2 E A_d} \left(1 + \frac{h^3 E A_d}{L^3 A_m} \right).$$

La **freccia in mezzzeria** della trave reticolare, tenendo conto anche di questo contributo di taglio (di diagonali e montanti), assume la forma:

$$f = \frac{5 p l^4}{384 E I} \left(1 + 9,6 \frac{E I}{G A_v l^2} \right) = \frac{5 p l^4}{384 E I} \left[1 + 19,2 \sqrt{2} \frac{I}{A_d l^2} \left(1 + \frac{A_d}{2 \sqrt{2} A_m} \right) \right].$$

Dati numerici:

$$A_d = 2 A_{\text{diag}} = 2 \cdot 734 = 1468 \text{ mm}^2, \quad A_m = 2 A_{\text{mont}} = 2 \cdot 691 = 1382 \text{ mm}^2,$$

$$L = 18600 \text{ mm}, \quad p = (G_{\text{tr}} + G + Q) \cdot h = (0,44 + 3,17 + 5) \text{ kN/m}^2 \cdot 1,55 \text{ m} = 13,3455 \text{ kN/m}.$$

Sostituendo i dati numerici, si ottiene (in forma semplificata):

$$f = \frac{5 \cdot 13,3455 \cdot (18600)^4}{384 \cdot 210000 \cdot (4,619 \cdot 10^9)} \left[1 + 19,2 \sqrt{2} \dots \right] = 28,725 \text{ mm}.$$

Essendo la **massima freccia ammissibile** pari a

$$f_{\text{max}} = \frac{L}{300} = \frac{18600}{300} = 62 \text{ mm} > 28,725 \text{ mm},$$

la verifica a deformabilità è soddisfatta, con un coefficiente di sicurezza $\frac{62}{28,725} \approx 2,158$.

Considerando i **solli carichi variabili** $q = Q \cdot 2 \text{ m} = 10 \text{ kN/m}^2$, la freccia risulta

$$f = 19,46 \text{ mm}.$$

Cedimenti anelastici

Sia d_0 il diametro del foro e d il diametro del bullone. L'*incremento* del gioco tra foro e bullone è:

$$\Delta_d = 2 (d_0 - d), \quad \delta_m = 2 (d_0 - d).$$

In ciascuna **maglia** si ottiene un abbassamento complessivo:

$$\delta = \delta_d + \delta_m = 2 \left[\frac{(d_0 - d)}{\cos \theta} + (d_0 - d) \right].$$

La **freccia in mezzzeria** dovuta al “gioco” foro-bullone (cedimento anelastico) è:

$$f_{\text{foro-bullone}} = \frac{1}{2} \delta \frac{L}{b} = \left[\frac{(d_0 - d)}{\cos \theta} + (d_0 - d) \right] \frac{L}{b}.$$

Poiché $\cos \theta = \frac{h}{L}$ e, nel caso in oggetto, $h = b = \frac{L}{\sqrt{2}}$, si ricava:

$$f_{\text{foro-bullone}} = (\sqrt{2} + 1) (d_0 - d) \frac{L}{b} = (\sqrt{2} + 1) \cdot 1 \text{ mm} \cdot 12 = 28,97 \text{ mm}.$$

Vibrazioni

Le vibrazioni possono creare problemi per l'utilizzo dell'opera. L'approccio di verifica allo *stato limite di vibrazione* consiste nel calcolare la **frequenza naturale** di vibrazione f_0 dell'elemento strutturale e controllare che sia superiore a un valore minimo (legato all'utilizzo), evitando fenomeni di risonanza.

Per una trave di sezione A , densità ρ , luce L e rigidezza flessionale $E I$, la frequenza naturale vale:

$$f_0 = \frac{\pi^2}{2 L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho A}}.$$

Se si lega f_0 alla **freccia in mezzzeria** δ_p dovuta ai **pesi propri e permanenti** ($g_{tr} + g = p = \rho A g$), usando:

$$\delta_p = \frac{5}{384} \frac{\rho A g L^4}{E I}, \quad f_0 = \frac{\pi^2}{2 L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho A}},$$

si ricava la **relazione approssimata**:

$$f_0 = \frac{17,75}{\sqrt{\delta_p}} \quad (\delta_p \text{ in mm}).$$

Per strutture regolarmente **caricate da persone**, la frequenza naturale più bassa non deve essere minore di 3 Hz. Nel caso in esame, si ha:

$$\delta_p = \frac{5}{384} \frac{13,455 \cdot (18600)^4}{210000 \cdot (4,619 \cdot 10^9)} = 21,44 \text{ mm},$$
$$f_0 = \frac{17,75}{\sqrt{21,44}} = 3,83 \text{ Hz} \geq 3 \text{ Hz}.$$

Quindi, anche la **verifica di vibrazione** risulta soddisfatta.

Capitolo 11 - Predimensionamento e progetto finale

In **Tabella** si riporta il confronto tra la fase di **predimensionamento** e il **progetto finale** in termini di aree sezionali (corrente, montante e diagonale) e di peso totale della trave.

	Area Corrente [mm ²]	Area Montante [mm ²]	Area Diagonale [mm ²]	Peso Trave [kN]
Predimensionamento	6500	1300	1850	19,64
Valore finale	3840	1382	1468	18,50
Variazione [%]	-1,5%	+6,3%	-20,64%	-5,8%

Tabella 1: Confronto tra predimensionamento e progetto finale

Per il **calcolo del peso finale** della trave reticolare in acciaio, tenendo conto delle **aree finali** di diagonale, montante e corrente, si utilizza la seguente espressione:

$$P_{\text{trave}} = \gamma_{\text{acciaio}} \cdot L \left(2 A_{\text{corr}} + \sqrt{2} A_{\text{diagonale}} + \left(1 - \frac{h}{L} \right) A_{\text{montante}} \right) = 16,09 \text{ kN/mm}^3.$$

Dove:

$$A_{\text{corr}} = 3840 \text{ mm}^2, \quad A_{\text{diagonale}} = 1468 \text{ mm}^2, \quad A_{\text{montante}} = 1382 \text{ mm}^2,$$

rappresentano rispettivamente le **aree finali** del *corrente*, della *diagonale* e del *montante*. Il termine γ_{acciaio} è il peso specifico dell'acciaio (espresso in kN/mm^3), L è la lunghezza totale della trave e h è la sua altezza. Nel computo complessivo, il **peso della trave** andrà **maggiorato** del **10% – 15%** per tenere conto del peso *della bullonatura e delle piastre di aggancio*, incrementando così la stima complessiva rispetto al valore restituito dalla formula.

$$P_{\text{trave}} = 16,09 + 15\% P_{\text{trave}} = 18,50 \text{ kN/mm}^3.$$

Dalla tabella si osserva come, rispetto ai valori iniziali di predimensionamento, alcune aree sezionali siano inferiori (corrente e diagonale), mentre il *peso totale* della trave risulti diminuito del 6%.

Capitolo 12 - Punti salienti

Si riportano nel seguito i 10 punti principali affrontati nel presente documento:

1. Ruolo del rapporto luce/altezza (L/h) nella progettazione delle travi.
2. Incidenza del peso proprio strutturale di una trave reticolare in acciaio sui carichi complessivi.
3. Analisi delle azioni interne: analogia tra trave a sezione compatta e trave reticolare.
4. Orientamento della lamiera grecata e scorrimento lamiera-calcestruzzo.
5. Confronto tra schema a diagonali tese e schema a diagonali compresse.
6. Classificazione dei profili in acciaio.
7. Verifica a trazione e a flessione dei profili in acciaio.
8. Definizione della luce di libera inflessione e verifica di instabilità in elementi compressi.
9. Azioni parassite nei giunti bullonati.
10. Deformabilità di una trave reticolare (contributo della distorsione tangenziale).