

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



PROGETTO DI UNA TRAVE RETICOLARE IN ACCIAIO

Esercitazione a cura di Ing. Luca Rancati e Ing. Francesco Lo Monte

Corso di Tecnica delle Costruzioni

Prof. Marco di Prisco

INDICE

<i>CAPITOLO 1</i>	<i>Descrizione del caso strutturale.....</i>	<i>3</i>
<i>CAPITOLO 2</i>	<i>Analisi dei carichi e predimensionamento.....</i>	<i>4</i>
<i>CAPITOLO 2</i>	<i>Analisi strutturale</i>	<i>9</i>
<i>CAPITOLO 4</i>	<i>Progetto del traverso</i>	<i>12</i>
<i>CAPITOLO 5</i>	<i>Progetto del corrente superiore compresso.....</i>	<i>15</i>
<i>CAPITOLO 6</i>	<i>Progetto del corrente inferiore teso.....</i>	<i>18</i>
<i>CAPITOLO 7</i>	<i>Progetto del montante compresso.....</i>	<i>19</i>
<i>CAPITOLO 8</i>	<i>Progetto dell’asta diagonale tesa.....</i>	<i>23</i>
<i>CAPITOLO 9</i>	<i>Progetto di un giunto bullonato</i>	<i>24</i>
<i>CAPITOLO 10</i>	<i>Verifica di deformabilità.....</i>	<i>28</i>
<i>CAPITOLO 11</i>	<i>Predimensionamento e progetto finale</i>	<i>32</i>
<i>CAPITOLO 12</i>	<i>Punti salienti</i>	<i>33</i>

CAPITOLO 1 Descrizione del caso strutturale

Una passerella pedonale che consente di attraversare un corso d'acqua è costituita da un impalcato di luce $L = 20$ m supportato da 3 travi reticolari longitudinali disposte con un interasse di 2 m e collegate da traversi in acciaio a passo costante. Le travi sono sormontate da un solaio collaborante realizzato con un getto in calcestruzzo su una lamiera grecata opportunamente dimensionata per tener conto sia della funzione di cassero a perdere nella fase di getto che della funzione strutturale dopo la presa del calcestruzzo. Tale secondo aspetto dipende dalla qualità dell'aderenza tra il calcestruzzo e la lamiera stessa. La massima collaborazione strutturale, e quindi la massima portanza flessionale, si ha nel caso di assenza di scorrimento tra lamiera e calcestruzzo.

La soletta in c.a. ha la funzione di collegamento trasversale tra le travi al fine di garantire un comportamento complessivo a piastra e di aumentare la rigidità 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 per gli utenti.

Si effettua il progetto della trave reticolare e dei traversi in accordo al DM 14/01/2008 “Norme Tecniche delle Costruzioni” (NTC 2008) secondo il metodo di calcolo degli Stati Limite.

Proprietà dei materiali

I materiali utilizzati per la progettazione della passerella pedonale sono :

- Acciaio S235 per profilati strutturali
- Acciaio S250 GD (EN10147) per lamiera grecata
- Bulloni 5.6 per giunti bullonati

CAPITOLO 2 Analisi dei carichi e predimensionamento

Analisi dei carichi

Carichi permanenti portati G_p (pavimentazione e massetto) + G_c (elementi secondari):

Pavimentazione : 0.40 kN/m^2

Massetto di finitura (3 cm) : $\gamma_m \times s_m = 18 \text{ kN/m}^3 \times 0.03 \text{ m} = 0.54 \text{ kN/m}^2$

Elementi di controventamento orizzontale (valore forfettario): 0.50 kN/m^2

Carichi variabili Q:

Si considera lo schema di carico 5 delle NTC 2008 (folla compatta) = 5 kN/m^2

Carichi permanenti, G_t (trave) + G_s (impalcato):

Peso proprio della trave (da definire successivamente),

Peso proprio del solaio collaborante (soletta + lamiera grecata)

Per definire i pesi propri strutturali è necessario partire dai sovraccarichi portati (permanentemente portati + 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 $5 + 0.40 + 0.54 = 5.94 \text{ kN/m}^2$.

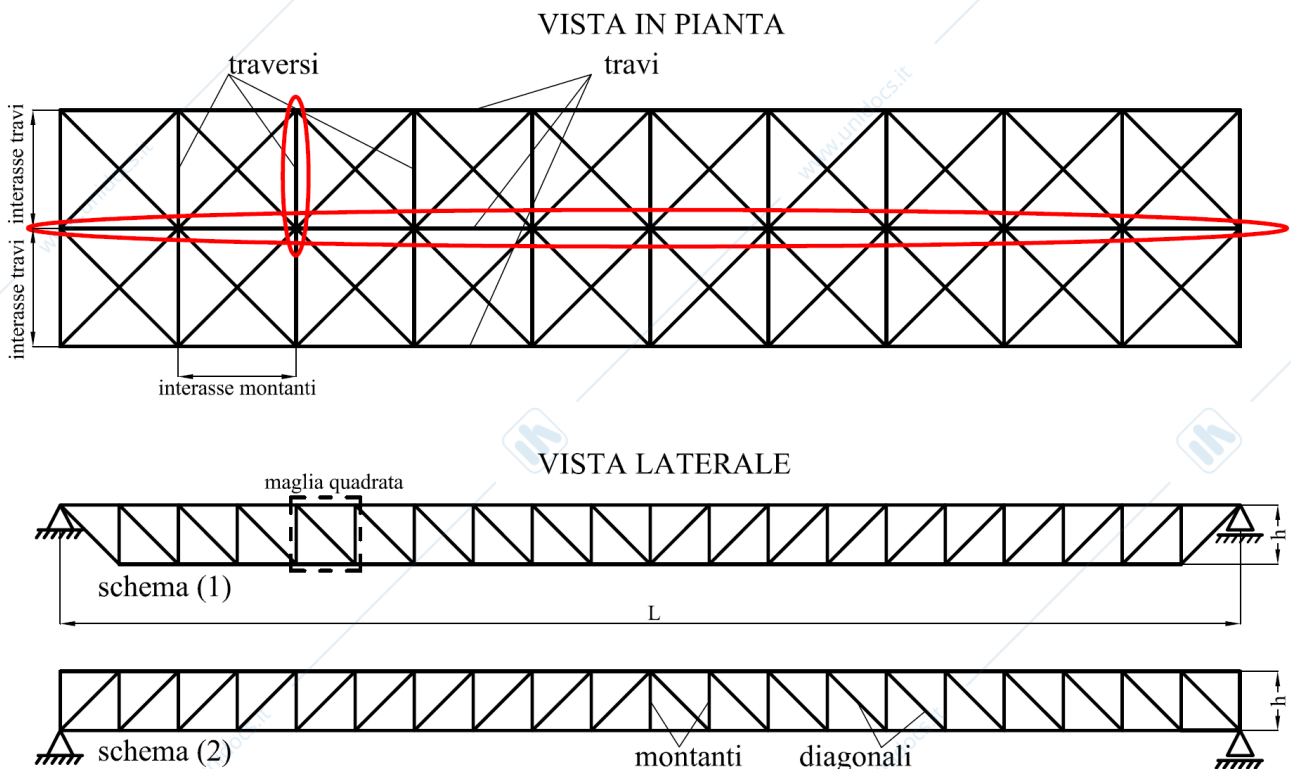


Figura 1. Vista in pianta e laterale della passerella pedonale.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Sulla base di tale valore si sceglie la tipologia di lamiera grecata e lo spessore della soletta collaborante in c.a.. Tale scelta può essere effettuata per via semplificata tramite le *tabelle di portata* fornite dai produttori (esempio in Tabella 1).

Si sottolinea che la lamiera grecata lavora “a trave” nel senso della sua orditura (ovvero nella direzione delle nervature). Nel caso in esame le nervature vengono disposte parallelamente alle travi reticolari in modo tale che la soletta scarichi sui traversi, e poi quest’ultimi trasferiscano i carichi alle travi reticolari come forze concentrate. (In alternativa, l’orditura può essere ortogonale alle travi reticolari in modo che l’impalcato scarichi direttamente su quest’ultime senza l’ausilio dei montanti).

Scegliendo in via cautelativa per la soletta un comportamento appoggio-appoggio tra i montanti, dalla tabella di portata si osserva che la lamiera di spessore 0.7 mm garantisce una luce massima di 2.12 m con 6 kN/m^2 di sovraccarico di esercizio. Disponendo i montanti con un passo inferiore ai 2 m tale condizione risulta soddisfatta. La tabella di portata fornisce anche lo spessore complessivo della soletta, pari a 12 cm. Poiché le nervature hanno un'altezza di 7.5 cm, lo spessore della soletta collaborante è pari a 4.5 cm.

Il peso proprio del solaio per unità di superficie è dunque pari a:

$$\text{c.a. soletta: } \gamma_{\text{cls}} \cdot s_s = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.045 \text{ m} = 1.125 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{c.a. nervatura: } \gamma_{\text{cls}} \cdot A_{\text{nervatura}} / \text{interasse nervature} = \gamma_{\text{cls}} \cdot s_{\text{nerv,equiv}} =$$

$$= 25 \text{ kN/m}^3 \cdot [(0.064+0.040) \cdot 0.075/2] / 0.19 \text{ m} = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.021 \text{ m} = 0.513 \text{ kN/m}^2$$

lamiera grecata (da tabella di portata): 0.0964 kN/m^2

In conclusione si ha $G_s = 1.125 + 0.513 + 0.0964 = 1.73 \text{ kN/m}^2$

Riepilogando dunque :

$$G_s = \text{peso proprio del solaio} = 1.73 \text{ kN/m}^2$$

$$G_p = \text{carichi permanenti portati} = 0.94 \text{ kN/m}^2$$

$$G_c = \text{peso degli elementi secondari} = 0.50 \text{ kN/m}^2$$

$$G = G_s + G_p + G_c = 3.17 \text{ kN/m}^2$$

$$Q = \text{carico variabile da folla} = 5.00 \text{ kN/m}^2$$

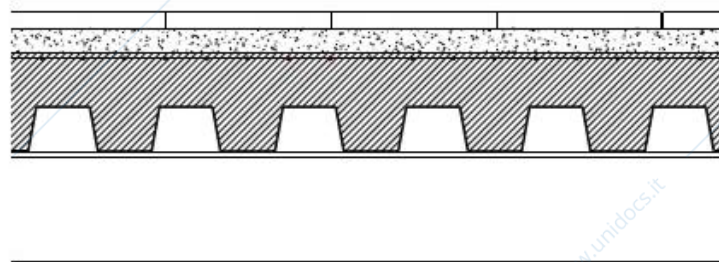
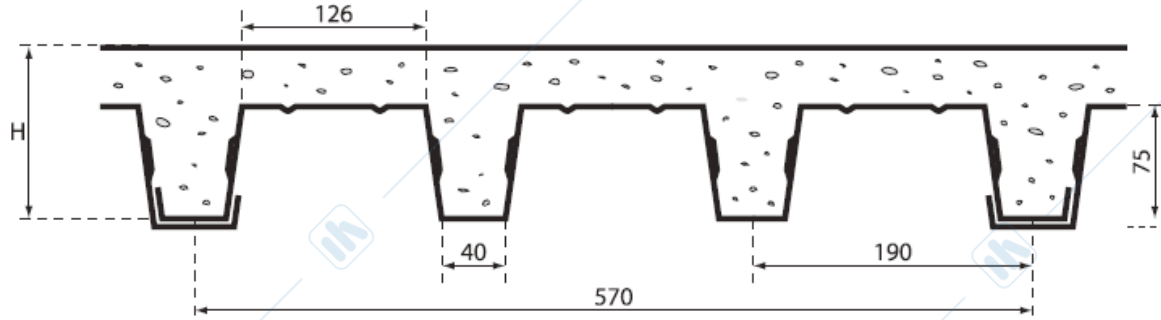


Figura 2. Sezione impalcato.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio



CARATTERISTICHE STATICHE SEZIONE EFFICACE

Spessore	0,7	0,8	1	1,2
Peso Kg/m ²	9,64	11,02	13,77	16,53
Peso Kg/m 1000	5,5	6,28	7,85	9,42
J cm ⁴ /m	80,03	94,71	126,23	159,47
W _x cm ³ /m	18,98	22,96	31,79	39,68
W _y cm ³ /m	21,67	25,16	32,34	41,66

DIAMETRI RETE A MAGLIA SALDATA

Spessore soletta cm	12	13	14	15
Area cls sopra lamiera per metro cm ²	450	550	650	750
0,2% area armatura lenta per metro	0,90	1,10	1,30	1,50
Maglia (cm x cm)	20x20	20x20	20x20	20x20
Diametro minimo (mm)	5,00	6,00	6,00	8,00

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	▲▲▲▲	
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	▲▲▲▲	
13	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	▲▲▲▲
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	▲▲▲▲	
14	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	▲▲▲▲
	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	▲▲▲▲	
15	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	▲▲▲▲	

Tabella 1: Tabella di portata per solai in lamiera grecata.

Predimensionamento

In fase di predimensionamento lo schema strutturale non è ancora noto, dunque si fanno delle ipotesi esemplificative sia per la definizione delle azioni interne negli elementi principali che per la stima della deformabilità.

Si consideri la trave reticolare come una trave generica a sezione compatta. Il carico per unità di lunghezza agente sulla trave di spina (trave centrale evidenziata in Fig.1) è pari al carico per unità di superficie moltiplicato per l'interasse tra le travi ($i_{trave} = 2 \text{ m}$):

$$SLE: \quad q_{SLE} = (G + Q) \cdot 2 \text{ m} = 16.3 \text{ kN/m}$$

$$SLU: \quad q_{SLU} = (1.3 \cdot G + 1.5 \cdot Q) \cdot 2 \text{ m} = 23.2 \text{ kN/m}$$

Il momento flettente in mezzera si valuta facilmente con l'espressione $M = q_{SLU} \cdot L^2/8 = 1160 \text{ kN m}$. Come si osserva in Fig.5, l'azione di compressione sul corrente superiore C e di trazione sul corrente inferiore T, valgono $C = T = M/h$, dove h è la distanza tra gli assi baricentrici dei correnti superiore e inferiore (altezza nominale della sezione della trave reticolare).

La freccia in mezzera della trave può invece essere valutata nell'ipotesi di trave a sezione compatta, appoggiata agli estremi e soggetta a carico distribuito ($f = \frac{5}{384} \frac{q_{SLE} L^4}{EI}$). Si osservi che nel calcolo della freccia così effettuato si trascura la deformabilità a taglio della trave, il cui contributo è invece significativo nel caso di travi reticolari in acciaio (come dimostrato nel Capitolo 10).

Ipotizzando per semplicità i due correnti uguali, il momento d'inerzia I si calcola facilmente come $I = 2 \cdot I_{corrente} + 2 \cdot A_{corrente} \cdot (h/2)^2 \approx 2 \cdot A_{corrente} \cdot (h/2)^2$.

Imponendo che l'azione assiale nel corrente compresso sia pari all'80% (per tener conto implicitamente del peso proprio e dei fenomeni di instabilità) della sua resistenza ultima e che la freccia in mezzera sia pari all'80% (per tener conto implicitamente del peso proprio e della deformabilità a taglio) della freccia limite, si ha:

$$\begin{cases} C = \frac{q_{SLU} L^2}{8h} = 0.8 \frac{A_{corr} f_{yk}}{\gamma_{m0}} \\ f = \frac{5}{384} \frac{q_{SLE} L^4}{EI} = 0.8 \frac{L}{n} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} A_{corr} = \frac{q_{SLU} L}{6.4 f_{yk}} \gamma_{m0} \frac{L}{h} \\ \frac{L}{h} = \frac{24 \gamma_{m0} q_{SLE} E}{5n q_{SLE} f_{yk}} \end{cases}$$

Assumendo $\gamma_{m0} = 1.05$ (NTC2008), $E = 210000 \text{ MPa}$, $f_{yk} = 235 \text{ MPa}$ e $n = 300$ si deriva:

$$\begin{cases} A_{corr} = 6922 \text{ mm}^2 \\ \frac{L}{h} = 21.37 \end{cases}$$

Si osservi che per travi reticolari di copertura si usa generalmente un rapporto luce/altezza intorno a 20, mentre il rapporto è prossimo a 10 in altri casi (ad esempio ponti).

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Per la struttura in oggetto, adottare un rapporto luce/altezza pari a 20 comporta un'area dei correnti $A_{\text{corrente}} (= 6479 \text{ mm}^2)$ non particolarmente elevata grazie ai carichi relativamente limitati. La trave reticolare viene quindi progettata con un rapporto $L/h = 20$ ($h = 1 \text{ m}$ e $A_{\text{corrente}} \approx 6500 \text{ mm}^2$) e interasse tra i montanti pari a $2 h (= 2 \text{ m})$, assumendo maglie quadrate.

Nella vista laterale della trave di Fig.1 vengono proposti due possibili schemi – (1) e (2) – in cui i diagonali sono disposti secondo due diverse configurazioni. Nello schema (1) i diagonali risultano tesi mentre le aste verticali (montanti) risultano compresse, mentre nello schema (2) la situazione è opposta. Lo schema (1) risulta vantaggioso in quanto le aste diagonali sono sottoposte ad un valore di azione assiale maggiore rispetto ai montanti e, inoltre, hanno una maggiore lunghezza. Diagonali compresse sono, dunque, più sensibili ai problemi di instabilità rispetto ai montanti.

La massima azione su diagonale e montante si ha in prossimità dell'appoggio, dove il taglio sulla trave reticolare è massimo e vale $V = q_{\text{SLU}} \cdot L/2 = 232 \text{ kN}$. Per maglia quadrata (ovvero diagonale inclinato a 45°), le azioni assiali sulle aste di parete valgono approssimativamente:

$$\text{diagonale, } N_{\text{diagonale}} = \sqrt{2} \cdot V = 328 \text{ kN (trazione)}$$

$$\text{montante, } N_{\text{montante}} = V = 232 \text{ kN (compressione)}$$

Si possono dunque valutare le aree minime per i due elementi:

$$\text{diagonale, } A_{\text{diagonale}} = \gamma_{m0} \cdot N_{\text{diagonale}} / (0.8 \cdot f_{yk}) = 1.05 \cdot 328000 \text{ N} / (0.8 \cdot 235 \text{ MPa}) = 1832 \text{ mm}^2 \approx 1850 \text{ mm}^2$$

$$\text{montante, } A_{\text{montante}} = \gamma_{m0} \cdot N_{\text{montante}} / (0.8 \cdot f_{yk}) = 1.05 \cdot 232000 \text{ N} / (0.8 \cdot 235 \text{ MPa}) = 1296 \text{ mm}^2 \approx 1300 \text{ mm}^2$$

La capacità portante di montante e diagonale è stata ridotta all'80% per tener conto implicitamente dei fenomeni di instabilità per il primo e della riduzione della sezione per la presenza dei fori nel secondo caso. Tale riduzione permette inoltre di considerare implicitamente il peso proprio della trave reticolare.

Nell'ipotesi di maglie quadrate, il numero di maglie è pari a L/h . Si deduce che il numero di diagonali è pari a L/h , mentre quello dei montanti, per lo schema (1), è pari a $L/h - 1$. La lunghezza di un singolo diagonale è $\sqrt{2} \cdot h$, mentre per il montante è h . Si conclude che lo sviluppo complessivo dei singoli diagonali e montanti è $\sqrt{2} \cdot L$ e $L - h$, rispettivamente. È dunque possibile valutare il peso complessivo della trave reticolare:

$$\begin{aligned} P_{\text{trave}} &= \gamma_{\text{acciaio}} \cdot V_{\text{trave}} = \gamma_{\text{acciaio}} \cdot L \cdot (2 \cdot A_{\text{corrente}} + \sqrt{2} \cdot A_{\text{diagonale}} + (1 - h/L) \cdot A_{\text{montante}}) = \\ &= 78.50 \cdot 10^9 \text{ kN/mm}^3 \cdot 20000 \text{ mm} \cdot (2 \cdot 6500 + \sqrt{2} \cdot 1850 + 0.95 \cdot 1300) \text{ mm}^2 = 26.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

Si incrementa tale carico del 10-15% per tener conto del passaggio dalle aree minime a quelle dei profili commerciali e del contributo di elementi di collegamento, ottenendo così circa 30 kN. Dividendo tale valore per la luce, si ottiene il carico distribuito lineare equivalente al peso proprio, $g_{\text{tr}} = 30 \text{ kN} / 20 \text{ m} = 1.5 \text{ kN/m}$, e dividendolo ulteriormente per l'interasse tra le travi si ottiene il carico distribuito superficiale $G_{\text{tr}} = 1.5 \text{ kN/m} / 2 \text{ m} = 0.75 \text{ kN/m}^2$. L'incidenza del peso proprio è dunque: $G_{\text{tr}} = 0.24 \cdot G$ e $G_{\text{tr}} = 0.09 \cdot (G + Q)$.

CAPITOLO 2 Analisi strutturale

In fase di progettazione le sezioni strutturali non sono ancora note, dunque in strutture iperstatiche si ipotizzano schemi strutturali semplificati per la valutazione delle azioni interne. Per strutture isostatiche come quella in oggetto, invece, le azioni interne possono essere valutate senza conoscere le sezioni degli elementi: è sufficiente che sia noto lo schema strutturale, ovvero i vincoli e la posizione degli assi baricentrici. La trave reticolare è costituita da bielle tra loro incernierate ed è sollecitata unicamente da carichi concentrati ai nodi superiori (Fig.4).

Per determinare il valore di tali carichi concentrati occorre individuare le aree di influenza dei carichi. Data la simmetria della travatura si hanno due aree di influenza (Fig.3): (1) in corrispondenza degli appoggi esterni e (2) in corrispondenza degli appoggi intermedi.

Per il calcolo delle aree di influenza si utilizza l'espressione generale $A = (\Phi_x \cdot a) \cdot (\Phi_y \cdot b)$, dove:

a = interasse montanti	b = interasse travi
$\Phi_x = 0.5$ per appoggi esterni	$\Phi_x = 1$ per appoggi intermedi
$\Phi_y = 0.5$ per la travatura di estremità	$\Phi_y = 1$ per la travatura di spina

Si ottiene dunque:

$$A_1 = (0.5 \times 2) \times (1 \times 2) = 2 \text{ m}^2$$

$$A_2 = (1 \times 2) \times (1 \times 2) = 4 \text{ m}^2$$

Determinate le aree di influenza, si procede al calcolo dei carichi espressi come forze concentrate sui nodi, allo SLE e allo SLU:

$$F_{0,sle} = (G_{tr} + G + Q) \cdot A_1 = (0.75 + 3.17 + 5.00) \cdot 2 \approx 17.8 \text{ kN}$$

$$F_{1,sle} = (G_{tr} + G + Q) \cdot A_2 = (0.75 + 3.17 + 5.00) \cdot 4 \approx 35.7 \text{ kN}$$

$$F_{0,slu} = (\gamma_g G_{tr} + \gamma_g G + \gamma_q Q) \cdot A_1 = (1.3 \times 0.75 + 1.3 \times 3.17 + 1.5 \times 5.00) \cdot 2 \approx 25.2 \text{ kN}$$

$$F_{1,slu} = (\gamma_g G_{tr} + \gamma_g G + \gamma_q Q) \cdot A_2 = (1.3 \times 0.75 + 1.3 \times 3.17 + 1.5 \times 5.00) \cdot 4 \approx 50.4 \text{ kN}$$

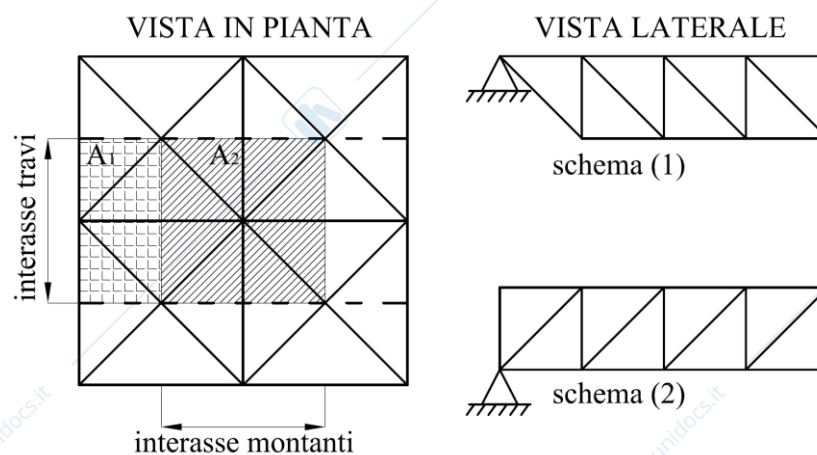


Figura 3. Aree di influenza.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Si risolve la travatura reticolare in modo da stabilire la massima azione assiale nel corrente superiore compresso e nel corrente inferiore teso. Si isola un conchio di trave “tagliando” la struttura dove il momento flettente è massimo e l’azione tagliante è nulla. In virtù della simmetria di geometria e carichi tale punto si trova in mezzeria (ascissa $x = 10$ m partendo da uno dei due estremi della trave).

La risultante dei carichi concentrati allo stato limite ultimo e le due reazioni vincolari valgono:

$$F_d = 2 \times F_{0,slu} + 9 \times F_{1,slu} = 2 \times 25.2 \text{ kN} + 9 \times 50.4 \text{ kN} = 504 \text{ kN}$$

$$V_A = V_B = F_d / 2 = 252 \text{ kN}$$

Si impone ora l’equilibrio alla traslazione orizzontale e alla rotazione attorno al polo P:

$$\begin{cases} C - T = 0 \\ T \times h - V_A \cdot \frac{L}{2} + F_0 \cdot \frac{L}{2} + F_1 \cdot \Sigma x_i = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C = T \\ T = (V_A - F_0) \cdot \frac{L}{2h} - F_1 \cdot \frac{\Sigma x_i}{h} = (V_A - F_0) \cdot \frac{L}{2h} - F_1 \cdot \frac{\Sigma x_i}{h} = 2268 \text{ kN} - 1008 \text{ kN} = 1260 \text{ kN} \end{cases}$$

Si osservi che la differenza tra il momento appena calcolato e quello approssimato valutato nel capitolo precedente nell’ipotesi di trave doppiamente appoggiata sottoposta a carico distribuito ($M = q_{SLU} \cdot L^2 / 8 = 1160 \text{ kN m}$) dipende solo dal fatto che si è introdotto il peso proprio della trave.

Si valutano ora le azioni assiali sulle aste di parete più vicine all’appoggio in quanto più sollecitate. Si impongono gli equilibri alla traslazione verticale dei nodi A e C:

$$N_{AC} / \sqrt{2} = V_A - F_0 \rightarrow N_{BD} = (252 - 25.2) \sqrt{2} = + 320.7 \text{ kN (trazione)}$$

$$N_{BC} = N_{AC} \sqrt{2} = V_A - F_0 \rightarrow N_{CD} = + 226.8 \text{ kN (compressione)}.$$

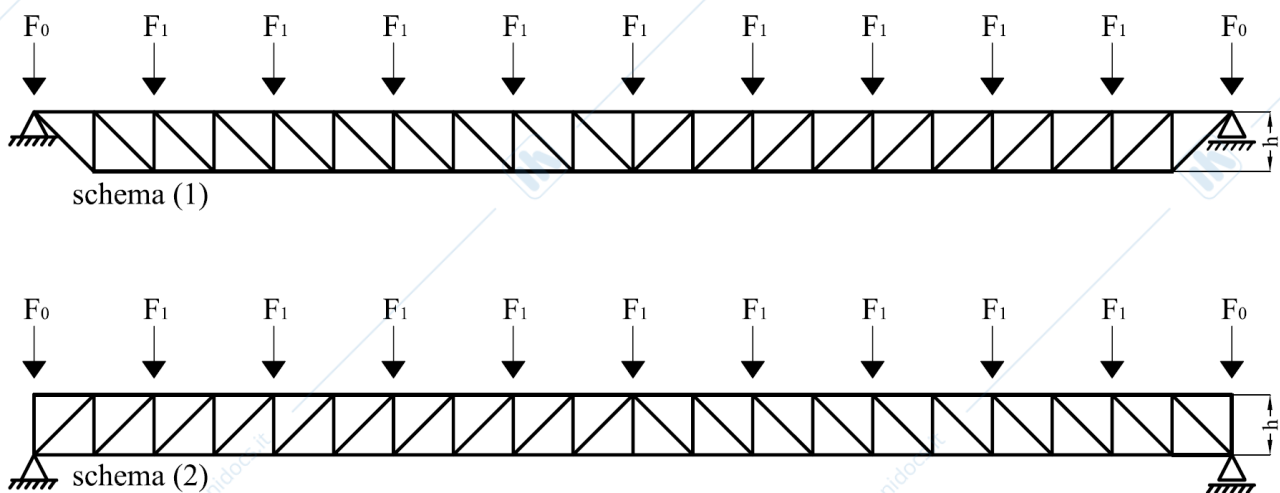


Figura 4. Schema dei carichi

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

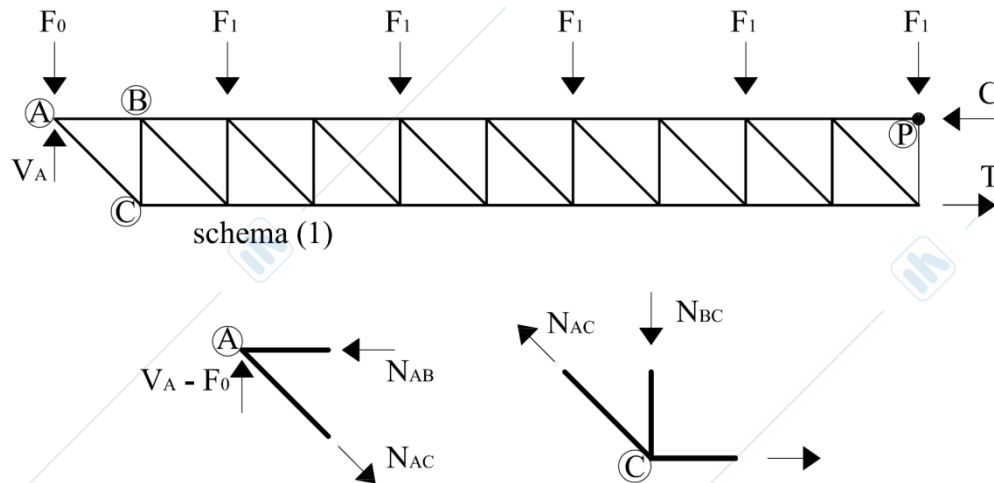


Figura 5. Calcolo delle azioni interne.

L'analogia con la trave a sezione compatta, ovviamente, vale anche per il taglio. Come si nota, l'azione tagliante viene interamente assorbita dalle aste di parete (diagonali e montanti). In particolare, per ciascuna maglia quadrata, il montante e il diagonale hanno un'azione assiale pari rispettivamente a $V_{\text{maglia,max}}$ e $V_{\text{maglia,max}} \cdot \sqrt{2}$, dove $V_{\text{maglia,max}}$ è il massimo taglio agente sul tratto di trave corrispondente alla maglia in esame.

In Fig.6 si riportano i risultati qualitativi ottenuti tramite un codice ad elementi finiti. Si sottolinea che per la risoluzione tramite un codice ad elementi finiti è fondamentale l'introduzione corretta dei vincoli esterni ed interni. Poiché i vincoli a terra non sono imposti in corrispondenza dell'asse baricentrico, l'imposizione di due cerniere agli estremi introdurrebbe un'azione assiale sulla trave reticolare, aumentando così la trazione nel corrente inferiore e diminuendo la compressione nel corrente superiore per lo schema (1) e viceversa per lo schema (2). Ciò obbliga all'introduzione di una cerniera ed un carrello che lasci libere le traslazioni orizzontali.

Per quanto riguarda gli elementi asta, invece, è fondamentale che essi si comportino come *bielle*. Per fare questo è necessario svincolare i momenti di trave M_{22} e M_{33} ai due estremi di ciascuna asta (ovvero imporre vincoli di cerniera tra le aste). Sotto queste ipotesi, i risultati ottenuti con i calcoli a mano devono coincidere con quelli ottenuti tramite il codice ad elementi finiti!

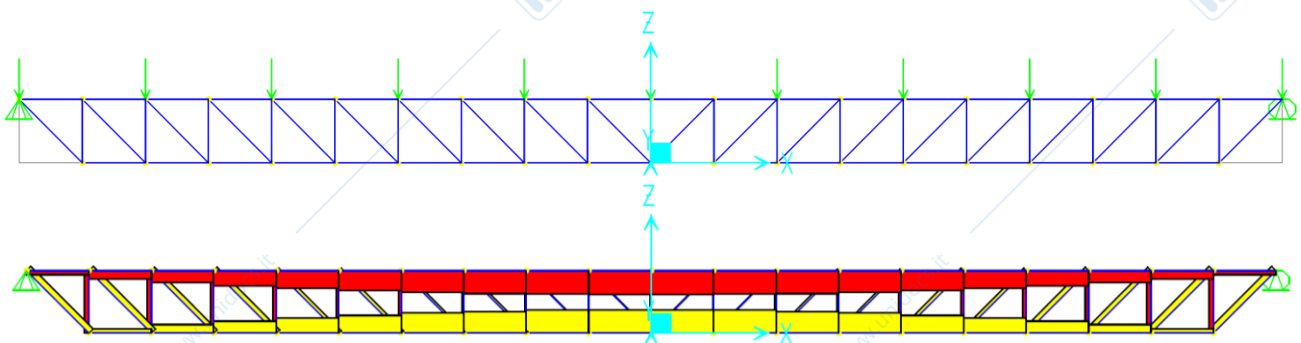


Figura 6. Risoluzione con un codice ad elementi finiti.

CAPITOLO 4 Progetto del traverso

I traversi sono disposti trasversalmente alle travi reticolari con un passo regolare di 2 m con lo scopo di (a) trasmettere i carichi distribuiti della soletta alle travature reticolari tramite azioni nodali e (b) 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 $G = 3.17 \text{ kN/m}^2$ (il peso proprio della trave reticolare non insiste sul traverso) e $Q = 5 \text{ kN/m}^2$, mentre il peso proprio del traverso viene trascurato in questa fase. I carichi agenti sul traverso sono dunque:

$$\text{SLE (Comb. Rara): } q_{\text{SLE}} = (3.17 \text{ kN/m}^2 + 5 \text{ kN/m}^2) \cdot 2 \text{ m} = 16.3 \text{ kN/m}$$

$$\text{SLU: } q_{\text{SLU}} = (1.3 \cdot 3.17 \text{ kN/m}^2 + 1.5 \cdot 5 \text{ kN/m}^2) \cdot 2 \text{ m} = 23.2 \text{ kN/m}$$

Nell'ipotesi di trave appoggiata agli estremi è possibile calcolare i valori di momento flettente in mezzzeria e taglio agli estremi allo SLU:

$$M_{\text{Ed}} = q_{\text{SLU}} l^2 / 8 = 23.2 \cdot 4/8 = 11.6 \text{ kN m}$$

$$V_{\text{Ed}} = q_{\text{SLU}} l / 2 = 23.2 \cdot 2/2 = 23.2 \text{ kN}$$

Il valore del momento resistente di progetto di una sezione in acciaio si valuta tramite la relazione fornita da NTC2008:

$$M_{\text{rd}} = W_{\text{pl}} \cdot f_{\text{yk}} / \gamma_{\text{mo}}$$

La freccia per lo schema di trave appoggio-appoggio con carico distribuito vale:

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

Imponendo l'uguaglianza tra momento resistente e momento agente, e tra freccia in mezzzeria e freccia massima ammissibile ($f_{\text{max}} = L/300$), è possibile valutare $W_{\text{pl,min}}$ e I_{min} :

$$W_{\text{pl,min}} = M_{\text{Ed}} \cdot \gamma_{\text{mo}} / f_{\text{yk}} = 11.6 \cdot 10^6 \text{ N mm} \cdot 1.05/235 \text{ MPa} = 51830 \text{ mm}^3 = 51.8 \text{ cm}^3$$

$$I_{\text{min}} = \frac{5}{384} \frac{q_{\text{SLE}} l^4}{E f_{\text{max}}} = \frac{5}{384} \frac{q_{\text{SLE}} l^4}{E l/300} = \frac{5 \cdot 300}{384} \frac{p l^3}{E} = \frac{1500}{384} \frac{16.3 \text{ N/mm} \cdot (2000 \text{ mm})^3}{210000 \text{ N/mm}^2} = 2425595 \text{ mm}^4 = 242.6 \text{ cm}^4$$

Utilizzando un profilario si sceglie il profilo HEA 100 A avente un modulo di resistenza plastico $W_{\text{pl}} = 83.0 \text{ cm}^3$ e un momento d'inerzia $I_y = 349.2 \text{ cm}^4$. Il profilo risulta essere in classe 1 per la flessione per acciaio del tipo S235, pertanto si utilizza il modulo di resistenza plastico.

Il momento resistente effettivo del profilo è pari a:

$$M_{\text{rd}} = W_{\text{pl}} \cdot f_{\text{yk}} / \gamma_{\text{mo}} = 83010 \cdot 235 / 1.05 = 18578428 \text{ N mm} = 18.6 \text{ kN m} > M_{\text{Ed}} = 11.6 \text{ kN m}$$

(Coefficiente di sicurezza pari a $18.6/11.6 = 1.60$).

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

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

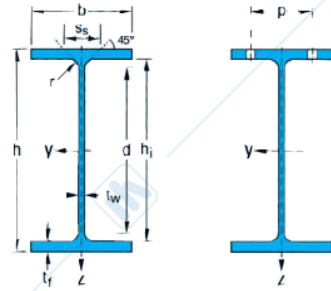
Norme di riferimento:

Dimensioni: HE 100-1000
HE 1100
HEA-A 100-1000

UNI 5397 (EU 53)
fuori normalizzazione
fuori normalizzazione

Tolleranze:

EN 10034



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	37,81
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	26,83
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

Designazione nominale	Dati statici											Classificazione						
	I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{pl,y} cm ³	i _y cm	A _{yz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{pl,z} cm ³	i _z cm	s _s mm	I _t cm ⁴	I _w × 10 ⁻³ cm ⁶	Flessione		Compressione			
													S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
HE 100 AA	236,5	51,98	58,36	3,89	6,15	92,06	18,41	28,44	2,43	29,26	2,51	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	-

Tabella 2: Profilario HEA.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Si osservi che il profilo ha un peso proprio di $16.7 \text{ kg/m} = 0.167 \text{ kN/m}$ pari al solo 1% dei carichi agenti e quindi trascurabile. L'area resistente a taglio e la resistenza a taglio del profilo sono pari a:

$$A_V = 1.05 \cdot h \cdot t_w = 1.05 \cdot 96 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} = 504 \text{ mm}^2$$

$$V_{c,rd} = (A_V \cdot f_{yk}) / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{mo}) = (401 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}) / (\sqrt{3} \cdot 1.05) = 65125 \text{ N} = 65.1 \text{ kN}$$

Se il taglio di calcolo V_{Ed} è inferiore a metà della resistenza di calcolo a taglio $V_{c,Rd}$, allora si può trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione, eccetto nei casi in cui si possano innescare fenomeni di instabilità locale dell'anima. Nel caso in esame si verifica che non vi è interazione tra taglio e flessione.

Si omette la verifica di instabilità flessio-torsionale prescritta dalle NTC2008 in quanto esiste un vincolo all'instabilità laterale dato dall'impalcato al quale i traversi saranno vincolati tramite connettori a taglio.

Si effettua, invece, la verifica di deformabilità allo Stato Limite di Esercizio.:

$$f = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EJ} = \frac{5}{384} \frac{16.3 \text{ N/mm} \cdot (2000 \text{ mm})^4}{210000 \text{ MPa} \cdot 3492000 \text{ mm}^4} = 4.6 \text{ mm}$$

$$f_{max} = \frac{L}{300} = \frac{2000 \text{ mm}}{300} = 6.7 \text{ mm}$$

La verifica a deformabilità è ampiamente soddisfatta (coefficiente di sicurezza pari a $6.7/4.6 = 1.46$).

CAPITOLO 5 Progetto del corrente superiore compresso

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

- Verifica di resistenza
- Verifica di stabilità.

Si dimensiona il profilo imponendo che l'azione assiale agente sia pari all'85% di quella resistente (per tener conto degli effetti legati all'instabilità, mentre il peso proprio è stato già considerato):

$$N_{rd} = A f_{yk} / \gamma_{mo}, N_{Ed} = 0.85 \cdot N_{Rd} \text{ e } N_{Ed} = 1260 \text{ kN.}$$

Con $f_{yk} = 235 \text{ N/mm}^2$ e $\gamma_{mo} = 1.05$ si può valutare l'area minima richiesta:

$$A = 1260 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 1.05 / (0.85 \cdot 235 \text{ N/mm}^2) = 6624 \text{ mm}^2.$$

Si ricorda, inoltre, il valore di area minima valutato nel Capitolo 2 in fase di predimensionamento, il quale permette di rispettare le condizioni di deformabilità per il rapporto $L/h = 20$ della trave reticolare in oggetto. Anche tale limite deve essere rispettato ($A_{corrente} \geq 6500 \text{ mm}^2$).

Si decide di realizzare il corrente superiore tramite un'asta composta costituita da angolari a lati uguali ($b = h$ in Fig.7) accoppiati con imbottiture. Utilizzando due angolari uguali, l'area di ciascuno di essi deve risultare pari a circa $6624/2 = 3312 \text{ mm}^2$ (33.1 cm^2)

Per fare in modo che il profilo non risulti di classe 4, sulla base della Figura tratta dalle NTC 2008 si ha $\frac{b}{t} \leq 11.5\epsilon$ con $\epsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$.

Scegliendo un angolare 140x140x13 si ha:

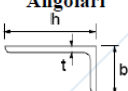
$$I_y = 6385000 \text{ mm}^4$$

$$A = 3495 \text{ mm}^2$$

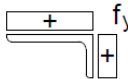
$$b/t = 10.8$$

Gli angolari possono avere una massima distanza tra loro di $3t = 3 \cdot 13 = 39 \text{ mm}$, mentre l'interasse massimo delle imbottiture è pari a $15 \cdot i_y$ (minimo raggio giratore di inerzia) = $15 \cdot 42.7 = 640.5 \text{ mm}$. Si realizzando 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).

Angolari



Riferirsi anche alle piattabande esterne (v. Tab 4.2.II)
Non si applica agli angoli in contatto continuo con altri componenti

Classe	Sezione in compressione	
3		
	$h/t \leq 15\epsilon$	$\frac{b+h}{2t} \leq 11.5\epsilon$

Distribuzione delle tensioni sulla sezione (compressione positiva)

Figura 7. Classificazione profili ad L, NTC2008.

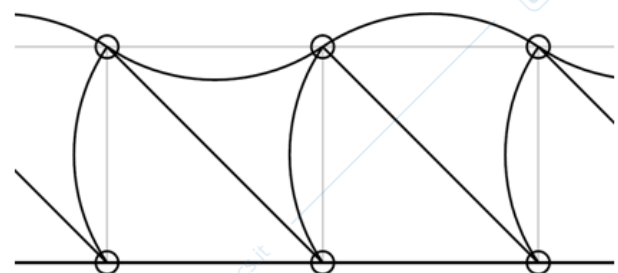


Figura 8. Modo d'instabilità di corrente e montanti.

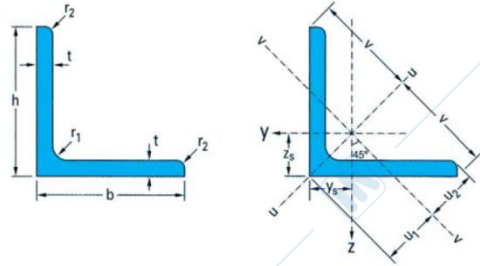
Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

ANGOLARI A LATI UGUALI O DIVERSI - dati geometrici

Norme di riferimento:

Dimensioni: UNI EU 56

Tolleranze: EN 10256-2



Designazione nominale	Massa G kg/m	Dimensioni				Area A cm ²	Dimensioni di costruzione				Posizione degli assi				Superfici da verniciare	
		h = b mm	t mm	r ₁ mm	r ₂ mm		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

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	I _u cm ⁴	I _v cm	I _y cm ⁴	I _v cm	I _{yz} 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	1,75	-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
L 130 x 130 x 12	472,2	50,44	3,97	750,6	5,00	193,7	2,54	-278,5	2	4
L 140 x 140 x 10	504,4	49,43	4,30	802	5,43	206,8	2,76	-297,6	4	4
L 140 x 140 x 13	638,5	63,37	4,27	1 015	5,39	262,0	2,74	-376,6	2	4
L 150 x 150 x 10	624,0	56,91	4,62	992	5,82	256,0	2,96	-368,0	4	4
L 150 x 150 x 12	736,9	67,75	4,60	1 172	5,80	302,0	2,94	-434,9	4	4
L 150 x 150 x 14	845,4	78,33	4,58	1 344	5,77	346,9	2,93	-498,5	2	4
L 150 x 150 x 15	898,1	83,52	4,57	1 427	5,76	368,9	2,93	-529,1	1	4
L 150 x 150 x 18	1 050	98,74	4,54	1 666	5,71	433,8	2,92	-616,2	1	2

Tabella 3: Profilaro profili ad L.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

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 $z_g = 39.2 \text{ mm}$ (da tabella). Si calcolano dunque le proprietà del corrente:

$$I_y = 2 \cdot 6385000 \text{ mm}^4 = 1.277 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 2 \cdot 6385000 \text{ mm}^4 + 2 \cdot 3495 \text{ mm}^2 \cdot (39.2 \text{ mm} + 7.5 \text{ mm})^2 = 2.801 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$A = 2 \cdot 3495 \text{ mm}^2 = 6990 \text{ mm}^2$$

Il corrente compreso 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 pari a 1 m (Fig.8).

Si calcolano il carico critico e la snellezza adimensionalizzata attorno all'asse debole:

$$N_{cr}^y = \pi^2 \frac{EI_y}{l_0^2} = \pi^2 \frac{210000 \text{ MPa} \cdot 1.277 \cdot 10^7 \text{ mm}^4}{(1000 \text{ mm})^2} = 26467318 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}^y}} = \sqrt{\frac{6990 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}}{26467318 \text{ N}}} = 0.249$$

Considerando la curva di instabilità c in base alla tabella 4.2.VI riportata dalla Normativa, il coefficiente di imperfezione α è uguale a 0.49. Si calcolano ora i fattori Φ e χ (NTC2008):

$$\Phi = 0.5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0.5 [1 + 0.49(0.249 - 0.2) + 0.249^2] = 0.543$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.543 + \sqrt{0.543^2 - 0.249^2}} = 0.975$$

(La riduzione indotta dai fenomeni di instabilità nel caso in oggetto è molto limitata). Si calcola infine la capacità portante a compressione tenendo conto degli effetti del secondo ordine:

$$N_{rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yk} / \gamma_{mo} = 0.975 \cdot 6990 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa} / 1.05 = 1525318 \text{ N} = 1525 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 1260 \text{ kN}$$

La verifica è pertanto soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $1525/1260 = 1.21$.

CAPITOLO 6 Progetto del corrente inferiore teso

Per quanto riguarda il corrente inferiore teso, per questioni di omogeneità di costruzione con il corrente compresso, si adotta lo stesso profilo costituito da due angolari 140x140x13 accoppiati con piatti di imbottitura di spessore 15 mm. Si sottolinea inoltre che, 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.

La resistenza plastica della sezione lorda è pari a :

$$N_{pl,rd} = A \cdot f_{yk} / \gamma_{mo} = 6990 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa} / 1.05 = 1564429 \text{ N} = 1564 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 1260 \text{ kN}$$

La verifica è dunque soddisfatta. (Coefficiente di sicurezza pari a $1564/1260 = 1.24$).

In presenza di fori per i collegamenti, la Normativa richiede di valutare anche la resistenza a rottura della sezione netta. Con bulloni M18 si hanno fori di diametro pari a 19 mm. La resistenza a rottura della sezione netta vale dunque:

$$A_{net} = 2 \cdot (3495 - 19 \cdot 13) = 6496 \text{ mm}^2$$

$$f_{tk} = 360 \text{ Mpa per acciaio tipo S235}$$

$$N_{u,rd} = 0.9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk} / \gamma_{m2} = 0.9 \cdot 6496 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa} / 1.25 = 1683763 \text{ N} = 1684 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 1260 \text{ kN}$$

Si osserva che si rispetta la gerarchia delle resistenze come richiede la Normativa ($N_{pl,rd} \leq N_{u,rd}$).

CAPITOLO 7 Progetto del montante compresso

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

- Verifica di resistenza
- Verifica di stabilità.

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

$$N_{rd} = A f_{yk} / \gamma_{mo}, N_{Ed} = 0.85 \cdot N_{Rd} \text{ e } N_{Ed} = 226.8 \text{ kN.}$$

Con $f_{yk} = 235 \text{ N/mm}^2$ e $\gamma_{mo} = 1.05$ si può valutare l'area minima richiesta:

$$A = 226.8 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 1.05 / (0.85 \cdot 235 \text{ N/mm}^2) = 1192 \text{ mm}^2$$

Si decide di realizzare l'asta di parete tramite due angolari a lati uguali accoppiati con imbottiture. Utilizzando due angolari uguali, l'area di ciascuno di essi deve risultare pari a $1192/2 = 596 \text{ mm}^2$ (5.96 cm^2). Per fare in modo che il profilo non risulti di classe 4 si ha $\frac{b}{t} \leq 11.5\varepsilon$ con $\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$. Scegliendo un angolare 60x60x6 si ha:

$$I_y = 227900 \text{ mm}^4 \qquad A = 691 \text{ mm}^2 \qquad b/t = 10.0$$

Gli angolari possono avere una massima distanza tra loro di $3t = 3 \cdot 6 = 18 \text{ mm}$, mentre l'interasse massimo delle imbottiture è pari a $15 \cdot i_y$ (minimo raggio giratore di inerzia) = $15 \cdot 18.2 = 273.0 \text{ mm}$.

Si realizzano dunque le imbottiture con piatti di spessore 15 mm ad interasse 250 mm. Con tale interasse è possibile studiare il montante 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 $z_g = 16.9 \text{ mm}$ (da tabella). Si calcolano dunque le proprietà del corrente:

$$I_y = 2 \cdot 227900 \text{ mm}^4 = 455800 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 2 \cdot 227900 \text{ mm}^4 + 2 \cdot 691 \text{ mm}^2 \cdot (16.9 \text{ mm} + 7.5 \text{ mm})^2 = 1278588 \text{ mm}^4$$

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

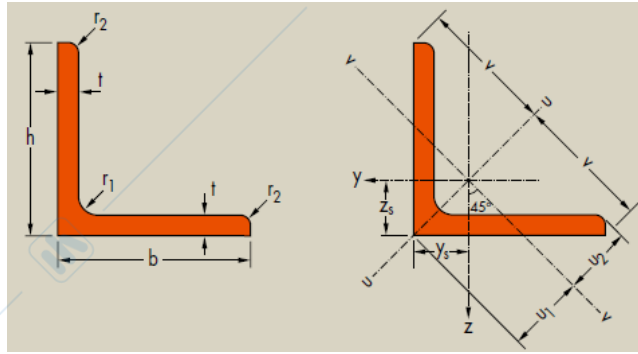
La lunghezza di libera inflessione è pari alla lunghezza dell'elemento, $l_0 = 1 \text{ m}$ (Fig.8).

Si calcola il carico critico e la snellezza adimensionalizzata attorno all'asse debole:

$$N_{cr}^y = \pi^2 \frac{EI_y}{l_0^2} = \pi^2 \frac{210000 \text{ MPa} \cdot 455800 \text{ mm}^4}{(1000 \text{ mm})^2} = 944699 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{Af_{yk}}{N_{cr}^y}} = \sqrt{\frac{1382 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}}{944699 \text{ N}}} = 0.586$$

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

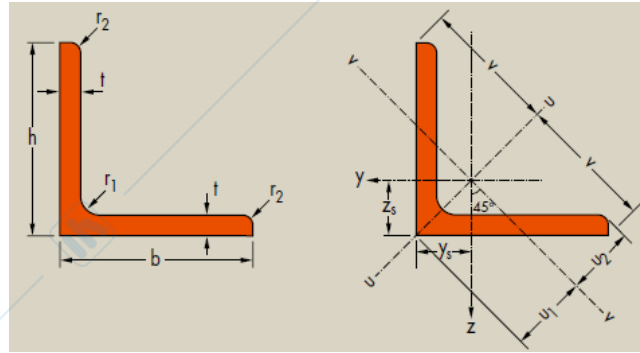


Denominación Designation Designazione	G kg/m	Dimensiones Dimensions Dimensioni				A mm ² x10 ²	Posición de los ejes Position of axes Posizione degli assi				Superficie Surface Superficie	
		h=b mm	t mm	r ₁ mm	r ₂ mm		z _s =y _s mm x10	v mm x10	u ₁ mm x10	u ₂ mm x10	A _L m ² /m	A _G m ² /t
L 50 x 50 x 4 ^{*/A}	3,06	50	4	7	3,5	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	3,5	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	3,5	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	3,5	6,56	1,49	3,54	2,10	1,78	0,194	37,66
L 55 x 55 x 5 ^{*/B}	4,18	55	5	8	4,0	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	4,0	6,31	1,56	3,89	2,21	1,94	0,213	43,04
L 60 x 60 x 4 [*]	3,70	60	4	8	4,0	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	4,0	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	4,0	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	4,0	9,03	1,77	4,24	2,50	2,14	0,233	32,89
L 65 x 65 x 6 ^{*/B}	5,91	65	6	9	4,5	7,53	1,80	4,60	2,55	2,28	0,252	42,70
L 65 x 65 x 7 [*]	6,83	65	7	9	4,5	8,70	1,85	4,60	2,61	2,29	0,252	36,95
L 65 x 65 x 8 ^{*/B}	7,73	65	8	9	4,5	9,85	1,89	4,60	2,67	2,31	0,252	32,64

Denominación Designation Designazione	G kg/m	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					
		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	I _{yz} mm ⁴ x10 ⁴	S235	S355			
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	✓		

Tabella 3: Profilario profili ad L.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio



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 _c =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 70 x 70 x 6	6,38	70	6	9	4,5	8,13	1,93	4,95	2,73	2,46	0,272	42,68
L 70 x 70 x 7	7,38	70	7	9	4,5	9,40	1,97	4,95	2,79	2,47	0,272	36,91
L 70 x 70 x 8 ^{*/*}	8,37	70	8	10	5,0	10,7	2,01	4,95	2,84	2,47	0,271	32,41
L 70 x 70 x 9 ^{*/*}	9,32	70	9	9	4,5	11,9	2,05	4,95	2,90	2,50	0,272	29,20
L 75 x 75 x 4 [*]	4,65	75	4	9	4,5	5,93	1,96	5,30	2,76	2,63	0,292	62,82
L 75 x 75 x 5 [*]	5,76	75	5	9	4,5	7,34	2,01	5,30	2,84	2,63	0,292	50,75
L 75 x 75 x 6 ^{*/*}	6,85	75	6	9	4,5	8,73	2,05	5,30	2,90	2,64	0,292	42,66
L 75 x 75 x 7 [*]	7,93	75	7	9	4,5	10,1	2,10	5,30	2,96	2,65	0,292	36,88
L 75 x 75 x 8 [*]	8,99	75	8	9	4,5	11,4	2,14	5,30	3,02	2,66	0,292	32,53
L 75 x 75 x 10 [*]	11,1	75	10	9	4,5	14,1	2,22	5,30	3,13	2,69	0,292	26,43
L 80 x 80 x 5 [*]	6,17	80	5	10	5,0	7,86	2,12	5,66	3,00	2,81	0,311	50,49
L 80 x 80 x 6 ^{*/*}	7,34	80	6	10	5,0	9,35	2,17	5,66	3,07	2,81	0,311	42,44
L 80 x 80 x 7 [*]	8,49	80	7	10	5,0	10,8	2,21	5,66	3,13	2,82	0,311	36,67
L 80 x 80 x 8 [*]	9,63	80	8	10	5,0	12,3	2,26	5,66	3,19	2,83	0,311	32,34
L 80 x 80 x 10 [*]	11,9	80	10	10	5,0	15,1	2,34	5,66	3,30	2,85	0,311	26,26

Denominación Designation Designazione	G kg/m	Propiedades del perfil / Section properties / Proprietà geometriche del profilo							Classification EN 1993-1-1: 2005					
		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		EN 10025-2: 2004	EN 10025-4: 2004	EN 10225:2001	
		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	I _{yz} mm ⁴ x10 ⁴	S235				S355
L 70 x 70 x 6	6,38	36,88	7,27	2,13	58,60	2,69	15,16	1,37	-21,72	2	3	✓		
L 70 x 70 x 7	7,38	42,30	8,41	2,12	67,19	2,67	17,41	1,36	-24,89	1	2	✓		
L 70 x 70 x 8	8,37	47,27	9,46	2,10	75,01	2,65	19,52	1,35	-27,75	1	1	✓		
L 70 x 70 x 9	9,32	52,47	10,60	2,10	83,18	2,65	21,76	1,35	-30,71	1	1	✓		
L 75x75x4	4,65	31,43	5,67	2,30	49,85	2,90	13,01	1,48	-18,42	4	4	✓		
L 75x75x5	5,76	38,77	7,06	2,30	61,59	2,90	15,96	1,47	-22,82	3	3	✓		
L 75 x 75 x 6	6,85	45,83	8,41	2,29	72,84	2,89	18,82	1,47	-27,01	2	3	✓		
L 75x75x7	7,93	52,61	9,74	2,28	83,60	2,88	21,62	1,46	-30,99	1	3	✓		
L 75 x 75 x 8	8,99	59,13	11,03	2,27	93,91	2,86	24,35	1,46	-34,78	1	1	✓		
L 75x75x10	11,1	71,43	13,52	2,25	113,2	2,83	29,68	1,45	-41,75	1	1	✓		
L 80 x 80 x 5	6,17	47,14	8,02	2,45	74,83	3,09	19,45	1,57	-27,69	3	4	✓		
L 80 x 80 x 6	7,34	55,82	9,57	2,44	88,69	3,08	22,96	1,57	-32,87	3	3	✓		
L 80 x 80 x 7	8,49	64,19	11,09	2,44	102,0	3,07	26,38	1,56	-37,81	1	3	✓		
L 80 x 80 x 8	9,63	72,25	12,58	2,43	114,8	3,06	29,72	1,56	-42,52	1	2	✓		
L 80 x 80 x 10	11,9	87,50	15,45	2,41	138,8	3,03	36,24	1,55	-51,27	1	1	✓		

Tabella 4: Profilario profili ad L.

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Considerando la curva di instabilità c in base alla tabella 4.2.VI riportata dalla Normativa, il coefficiente di imperfezione α è uguale a 0.49. Si calcolano ora i fattori Φ e χ come prescritto dalla Normativa:

$$\Phi = 0.5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0.5[1 + 0.49(0.586 - 0.2) + 0.586^2] = 0.766$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.766 + \sqrt{0.766^2 - 0.586^2}} = 0.794$$

Si calcola infine la capacità portante a compressione tenendo conto degli effetti del secondo ordine:

$$N_{rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yk} / \gamma_{mo} = 0.794 \cdot 1382 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa} / 1.05 = 245588 \text{ N} = 245.6 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 226.8 \text{ kN}$$

La verifica è pertanto soddisfatta con coefficiente di sicurezza pari a $245.6 / 226.8 = 1.08$.

CAPITOLO 8 Progetto dell'asta diagonale tesa

Si predimensioni il profilo imponendo che:

$$N_{rd} = A f_{yk} / \gamma_{m0} \text{ e } N_{rd} = N_{Ed}$$

Con $f_{yk} = 235 \text{ N/mm}^2$ e $\gamma_{m0} = 1.05$ si può valutare l'area minima richiesta:

$$A = 320.7 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 1.05 / 235 \text{ N/mm}^2 = 1433 \text{ mm}^2$$

Si decide di realizzare l'asta di parete tramite due angolari a lati uguali accoppiati con imbottiture. Utilizzando due angolari uguali, l'area di ciascuno di essi deve risultare pari a $1433/2 = 716 \text{ mm}^2$ (7.16 cm^2). Si scelgono due angolari $80 \times 80 \times 5$ ($A = 786 \text{ mm}^2$) accoppiati con piatti di imbottitura di spessore 15 mm.

La resistenza plastica della sezione lorda è pari a :

$$N_{pl,rd} = A \cdot f_{yk} / \gamma_{m0} = 2 \cdot 786 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa} / 1.05 = 351829 \text{ N} = 351.8 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 320.7 \text{ kN}$$

La verifica è dunque soddisfatta con coefficiente di sicurezza pari a $351.8/320.7 = 1.10$.

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

La resistenza a rottura della sezione netta vale dunque:

$$A_{net} = 2 \cdot (786 - 19 \cdot 5) = 1382 \text{ mm}^2$$

$$f_{tk} = 360 \text{ Mpa per acciaio tipo S235}$$

$$N_{u,rd} = 0.9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk} / \gamma_{m2} = 0.9 \cdot 1382 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa} / 1.25 = 358215 \text{ N} = 358.2 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 320.7 \text{ kN}$$

Si osserva che si rispetta la gerarchia delle resistenze come richiede la Normativa ($N_{pl,rd} \leq N_{u,rd}$).

CAPITOLO 9 Progetto di un giunto bullonato

Si progetta ora uno dei giunti bullonati tra corrente e diagonale tesa. Nel progettare un giunto bullonato di una trave reticolare, occorre tenere presente i seguenti aspetti :

- Occorre effettuare una tracciatura precisa del nodo in modo che le linee d'asse (assi baricentrici) si incontrino esattamente nella cerniera ipotizzata in sede di analisi strutturale, onde evitare la nascita di eccentricità indesiderate (non previste in sede di analisi).
- Non è praticamente mai possibile forare i profili in corrispondenza degli assi baricentrici a causa della curvatura trasversale degli elementi. Pertanto si fora solitamente in corrispondenza del cosiddetto "asse di truschino" che per i profili angolari ad L considerati corrisponde approssimativamente alla mezzeria dell'ala .

L'eccentricità tra asse baricentrico e asse di truschino comporta la nascita di un *momento parassita*. I bulloni risultano sottoposti ad una coppia torcente che genera un'azione tagliante supplementare.

Il collegamento in esame è costituito da un piatto di acciaio di opportuno spessore, con fori realizzati al fine di permettere il passaggio di bulloni M18.

I passi del dimensionamento del giunto sono i seguenti:

- 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, e verifica a rifollamento.

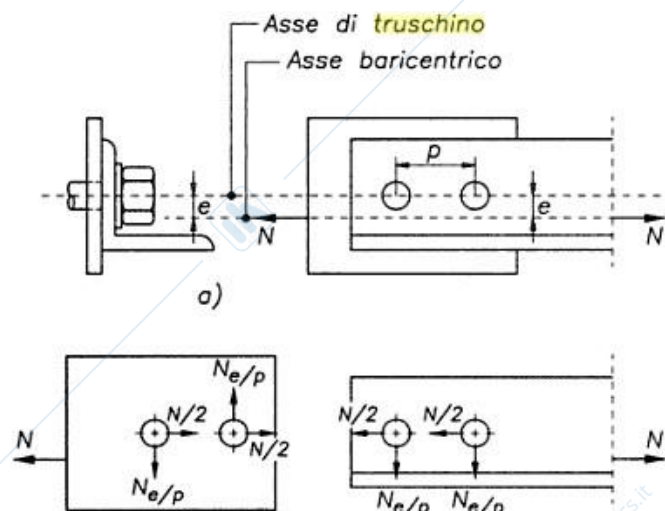


Figura 9. Schematizzazione di un giunto bullonato.

Giunto diagonale-corrente

Si progetta a titolo d'esempio la bullonatura del diagonale teso. La massima sollecitazione normale del diagonale teso è pari a $N_{Ed} = 320.7 \text{ kN}$.

La resistenza di calcolo a taglio data dalla Normativa per bulloni 5.6 è pari a:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{tb} A_{res}}{\gamma_{M2}}$$

dove $f_{tb} = 500 \text{ MPa}$ e $\gamma_{M2} = 1.25$

L'azione di taglio agente su ciascun bullone vale:

$$F_{v,Ed} = \frac{N}{n_s n_b} = \frac{320.7 \text{ kN}}{2 \cdot 5} = 32.07 \text{ kN}$$

Essendo $n_s = 2$ (numero dei piani di taglio) e $n_b = 5$ (numero di bulloni).

Invertendo dunque la formula di cui sopra, e ponendo $F_{v,Rd} = F_{v,Ed}$, si ottiene:

$$A_{res} = \frac{\gamma_{M2} F_{v,Ed}}{0.6 f_{tb}} = \frac{1.25 \cdot 32070 \text{ N}}{0.6 \cdot 500 \text{ MPa}} = 134 \text{ mm}^2$$

Adottando bulloni M18, l'area resistente è $A_{res} = 192 \text{ mm}^2$.

Sulla base delle indicazioni date dalla Normativa per unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali (Tabella 4.2.XIII delle NTC2008), si definiscono le limitazioni sulla posizione dei fori per i bulloni nei due angolari 80x80x5 che costituiscono il diagonale teso. Il profilato deve essere collegato con bulloni $d = 18 \text{ mm}$, pertanto i fori hanno un diametro $d_0 = d + 1 \text{ mm} = 19 \text{ mm}$.

Distanze e interassi (Fig. 4.2.3)	Minimo	Massimo		
		Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (EN10025-5)
e_1	$1.2 d_0$	$4t+40\text{mm}$	-	$\max(8t; 125\text{mm})$
e_2	$1.2 d_0$	$4t+40\text{mm}$	-	$\max(8t; 125\text{mm})$
p_1	$2.2 d_0$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 175\text{mm})$
$p_{1,0}$	-	$\min(14t; 200\text{mm})$	-	-
$p_{1,i}$	-	$\min(28t; 400\text{mm})$	-	-
p_2	$2.4 d_0$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 175\text{mm})$

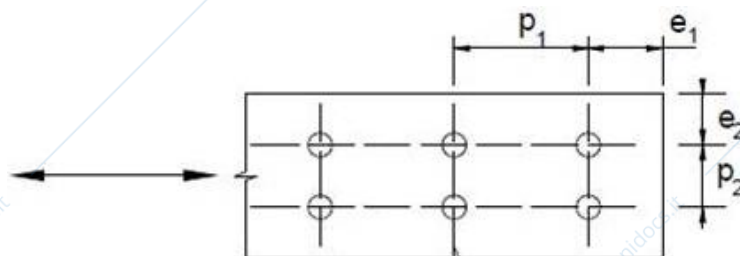


Figura 10. Limiti geometrici di un giunto bullonato (Tabella 4.2.XIII delle NTC2008).

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Le seguenti distanze devono essere rispettate:

$$e_1 \text{ ed } e_2 = \text{minimo: } 1.2 \cdot 19 = 22.8 \text{ mm}$$

$$\text{massimo: } 4 \cdot 5 + 40 = 62 \text{ mm}$$

$$p_1 = \text{minimo: } 2.2 \cdot 19 = 41.8 \text{ mm}$$

$$\text{massimo: } \min\{14 \cdot 8; 200\} = 112 \text{ mm}$$

In favore di sicurezza si pongono:

$$e_1 = 2.5 d = 45 \text{ mm}$$

$$e_2 = 40 \text{ mm}$$

$$p_1 = 3 d = 54 \text{ mm.}$$

Si calcola dunque il momento parassita dato dall'eccentricità tra l'asse di tracciatura adottato e l'asse di truschino:

$$e = e_2 - y_{g,\text{profilo}} \text{ (da profilario)} = 40 \text{ mm} - 21.2 \text{ mm} = 18.8 \text{ mm}$$

Il momento parassita M_p è pertanto pari a :

$$M_p = N \cdot e = 320.7 \text{ kN} \cdot 0.0188 \text{ m} = 6.03 \text{ kN m}$$

Si calcolano, infine, le forze di taglio agenti sui bulloni dovute al taglio indotte sia dalla forza assiale che dal momento parassita:

azione N:	$F_{v,Ed,N} = \frac{N}{n_s n_b} = \frac{320.7 \text{ kN}}{2 \cdot 5} = 32.07 \text{ kN}$
azione M_p : (bulloni su una fila)	$F_{v,Ed,M} = \frac{M_p}{J_b} r_{max} = \frac{M_p/n_s}{2 \sum_{i=1}^{\frac{(n_b-1)}{2}} r_i^2} r_{max} = \frac{M_p/n_s}{2 \sum_{i=1}^{\frac{(n_b-1)}{2}} (ip)^2} \frac{(n_b-1)}{2} p = \frac{6 M_p/n_s}{p n_b (n_b + 1)} = 11.17 \text{ kN}$
totale	$F_{v,Ed,M} = \sqrt{F_{v,Ed,N}^2 + F_{v,Ed,M}^2} = 34.0 \text{ kN}$

La forza di taglio totale agente per ciascun bullone deve essere minore o uguale della resistenza di calcolo a taglio:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{tb} A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot 500 \text{ MPa} \cdot 192 \text{ mm}^2}{1.25} = 46080 \text{ N} = 46.1 \text{ kN}$$

La verifica è pertanto soddisfatta con un coefficiente di sicurezza $46.1/34.0 = 1.36$. Per la gerarchia delle resistenze è bene che il coefficiente di sicurezza del collegamento sia maggiore di quello degli elementi collegati (= 1.10 per il diagonale teso).

Si effettua ora la verifica a rifollamento del profilato:

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (f_{tk} = \text{resistenza a trazione dell'elemento di collegamento e non del bullone!})$$

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

La valutazione viene effettuata per i bulloni di bordo in entrambe le direzioni ortogonale e parallela al carico, in quanto rappresentano la condizione più gravosa:

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{tb}}{f_t}; 1\right) = \min\left(\frac{45}{3 \cdot 19}; \frac{500}{360}; 1\right) = 0.79$$

$$k = \min\left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right) = \min\left(2.8 \frac{40}{19} - 1.7; 2.5\right) = 2.5$$

La compressione esercitata dal bullone sul foro deve essere minore o uguale alla resistenza di calcolo a rifollamento del profilato e del fazzoletto:

$$F_{b,Ed,profilato} = 34.0kN \leq F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot 0.79 \cdot 360 \cdot 19 \cdot 5}{1.25} = 54.0kN \quad (\text{coeff. sicurezza } 54.0/34.0 = 1.59)$$

$$F_{b,Ed,fazzoletto} = 68.0kN \leq F_{b,Rd} = \frac{2.5 \cdot 0.79 \cdot 360 \cdot 19 \cdot 15}{1.25} = 162.1kN \quad (\text{coeff. sicurezza } 162/68 = 2.38)$$

Si evidenzia come in corrispondenza del giunto i due profili ad L vengono imbullonati ad un unico fazzoletto. L'azione agente su quest'ultimo risulta dunque essere doppia rispetto quella agente sui due profili ad L.

In Fig.11 si riporta uno schema dei giunti bullonati.

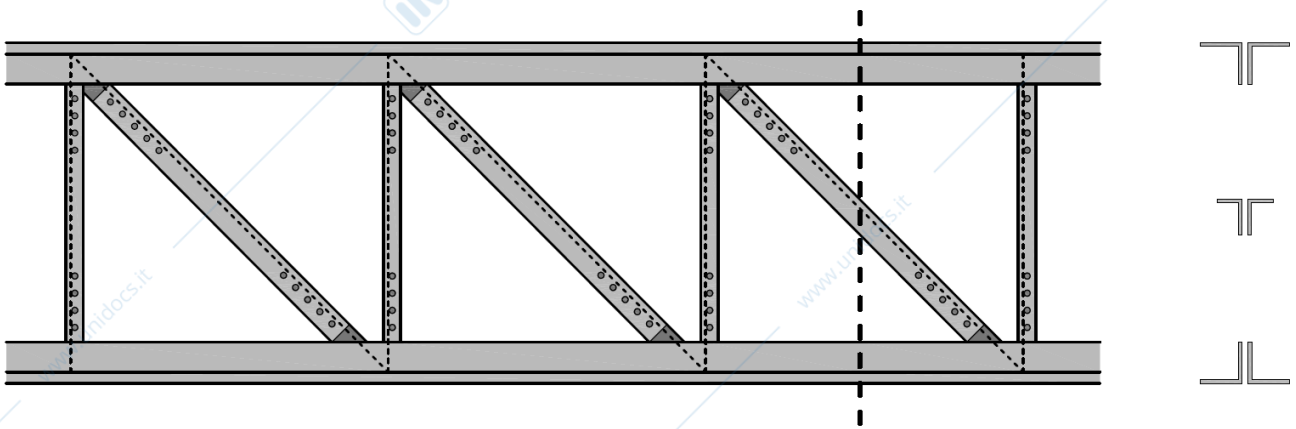


Figura 11. Giunti bullonati della trave reticolare.

CAPITOLO 10 Stati limite di deformazione e vibrazione

Cedimenti elastici

Il calcolo esatto della freccia in mezzeria di una trave reticolare deve essere svolto utilizzando metodi quali ad esempio il Principio dei Lavori Virtuali o il Metodo degli Spostamenti.

Un calcolo approssimato della freccia in mezzeria può però essere condotto riconducendosi al caso di trave appoggiata agli estremi con carico distribuito:

$$f = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EJ}$$

Si osservi che tale equazione si ottiene facilmente integrando opportunamente l'equazione della linea elastica $M = EJ \chi$ e imponendo le condizioni al contorno. L'equazione della linea elastica appena considerata, però, trascura la deformabilità a taglio della trave in quanto, per profili compatti, tale contributo è poco significativo ($GA_v \rightarrow \infty$). Per travi reticolari però la sezione non risulta essere compatta, in quanto costituita da elementi discreti (aste di parete = montanti + diagonali).

L'accorciamento/allungamento di diagonali e montanti contribuisce ad una distorsione della sezione del tutto equivalente a quella di una sezione compatta ad opera dell'azione di taglio (Fig.12).

La freccia in mezzeria per una trave appoggiata agli estremi con carico distribuito, tenendo conto della deformabilità a taglio è definita dalla seguente espressione:

$$f = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EI} + \frac{1}{8} \frac{pl^2}{GA_v} = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EI} \left(1 + 9.6 \frac{EI}{GA_v l^2} \right)$$

Per utilizzare tale formula nel caso di trave reticolare è necessario definire momento d'inerzia e rigidezza a taglio equivalenti. Per correnti uguali, il momento d'inerzia si calcola facilmente come:

$$\begin{aligned} I &= 2 \cdot I_{\text{corrente}} + 2 \cdot A_{\text{corrente}} \cdot (h/2)^2 = 2 \cdot 1.277 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 + 2 \cdot 6990 \text{ mm}^2 \cdot (500 \text{ mm})^2 = \\ &= 2.554 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 + 3.495 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \approx 3.495 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

(Si osservi come il contributo dato dal momento d'inerzia di ciascun angolare rispetto il proprio asse baricentrico sia del tutto trascurabile!).

Per quanto riguarda il fattore GA_v , si effettua l'analogia tra una maglia di trave reticolare e un concio di trave compatta (Fig.12):

allungamento diagonale: $\Delta_d = N_d L / EA_d$

spostamento verticale dovuto al diagonale: $\delta_d = \Delta_d / \cos\theta$

azione assiale diagonale: $N_d = V / \cos\theta$

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

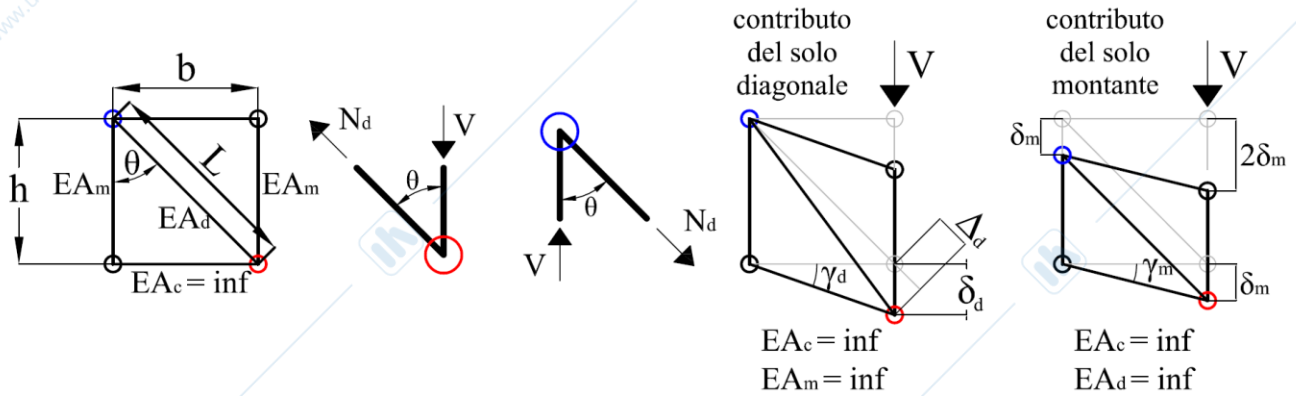


Figura 12. Deformabilità a taglio di una trave reticolare.

allungamento montante: $\delta_m = N_m h / EA_m$

azione assiale montante: $N_m = V$

Si ottiene dunque:

$$\delta = \delta_d + \delta_m = \frac{VL}{EA_d \cos^2 \theta} + \frac{Vh}{EA_m}$$

La deformazione angolare è pari alla rotazione del corrente:

$$\gamma = \frac{\delta_d}{b} + \frac{\delta_m}{b} = \frac{VL}{bEA_d \cos^2 \theta} + \frac{Vh}{bEA_m}$$

Sfruttando il legame tra l'angolo e le dimensioni della maglia della trave reticolare ($\cos \theta = h/L$) si ha:

$$\gamma = \frac{VL^3}{bh^2EA_d} + \frac{Vh}{bEA_m} = \frac{VL^3}{bh^2EA_d} \left(1 + \frac{h^3A_d}{L^3A_m} \right)$$

L'analogia tra trave reticolare e trave compatta comporta infine:

$$\gamma = \frac{VL^3}{bh^2EA_d} \left(1 + \frac{h^3A_d}{L^3A_m} \right) = \frac{V}{GA_v} \quad \rightarrow \quad GA_v = \frac{bh^2}{L^3} EA_d \frac{1}{\left(1 + \frac{h^3A_d}{L^3A_m} \right)}$$

Per il caso in oggetto ($h = b = L/\sqrt{2}$) si ha:

$$GA_v = \frac{EA_d}{2\sqrt{2}} \frac{1}{\left(1 + \frac{A_d}{2\sqrt{2}A_m} \right)}$$

Si può dunque valutare la freccia in mezzera della trave reticolare tenendo conto della deformabilità a taglio dovuta a diagonali e montanti come segue:

$$f = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EI} \left[1 + 9.6 \frac{EI}{GA_v l^2} \right] = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EI} \left[1 + 19.2\sqrt{2} \frac{I}{A_d l^2} \left(1 + \frac{A_d}{2\sqrt{2}A_m} \right) \right]$$

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

Essendo $A_d = 2 \cdot 786 \text{ mm}^2$, $A_m = 2 \cdot 691 \text{ mm}^2$, $l = 20000 \text{ mm}$ e $p = (G_{tr} + G + Q) \cdot 2 \text{ m} = 17.8 \text{ kN/m}$ si ottiene:

$$f = \frac{5}{384} \frac{17.8 \text{ N/mm} \cdot (20000 \text{ mm})^4}{210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 3.495 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} \left[1 + 19.2\sqrt{2} \frac{3.495 \cdot 10^9 \text{ mm}^4}{2 \cdot 786 \text{ mm}^2 \cdot (20000 \text{ mm})^2} \left(1 + \frac{2 \cdot 786 \text{ mm}^2}{2\sqrt{2} \cdot 2 \cdot 691 \text{ mm}^2} \right) \right]$$

$$= 50.53 \text{ mm} \cdot [1 + 0.1509 \cdot (1 + 0.4022)] = 50.53 \text{ mm} \cdot [1 + 0.1509 + 0.0607] = 61.2 \text{ mm}$$

La deformabilità a taglio induce, quindi, un aumento della freccia di circa il $15.1 + 6.1 \approx 21.2\%$. Se si considerasse infinita la rigidezza dei montanti si avrebbe, invece $f = 50.53 \text{ mm} \cdot [1 + 0.1509] = 58.2 \text{ mm}$. Utilizzando metodi esatti come il Principio dei Lavori Virtuali o un codice ad elementi finiti (Fig.13), si ottiene una freccia di 60.9 mm (e 57.9 mm se si considerano i montanti infinitamente rigidi). I valori ottenuti sono in perfetto accordo con quelli valutati con il calcolo approssimato (variazione dello 0.5%). In conclusione, la deformabilità dei diagonali induce un aumento della freccia del 15.1% mentre quella dei montanti un aumento del 6.1% .

Essendo la massima freccia ammissibile pari a $f_{\max} = L/300 = 20000 \text{ mm} / 300 = 66.7 \text{ mm}$, anche la verifica a deformabilità risulta soddisfatta, con un coefficiente di sicurezza di sicurezza pari a $66.7/60.9 = 1.10$. Si fa notare come gli utenti risentano della componente della freccia indotta dai soli carichi variabili $q = Q \cdot 2 \text{ m} = 10 \text{ kN/m}^2$:

$$f = \frac{5}{384} \frac{10.0 \text{ N/mm} \cdot (20000 \text{ mm})^4}{210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 3.495 \cdot 10^9 \text{ mm}^4} [1 + 0.1509 + 0.0607] = 34.4 \text{ mm} \approx \frac{L}{582}$$

Cedimenti anelastici

Lo schema rappresentato in Fig.13 può essere facilmente utilizzato anche per tener conto della freccia anelastica (ovvero non reversibile) dovuta al gioco foro-bullone. Nello schema descritto in Fig.13, infatti, si può imporre che gli allungamenti/accorciamenti di diagonali e montanti siano dovuti al recupero del gioco foro-bullone e non più allo stato tensionale ($d_0 =$ diametro del foro, $d =$ diametro del bullone):

$$\Delta_d = 2 \cdot (d_0 - d) \quad \text{e} \quad \delta_m = 2 \cdot (d_0 - d)$$

Il fattore 2 tiene conto del fatto che ogni elemento è vincolato dai due giunti bullonai ai due estremi.

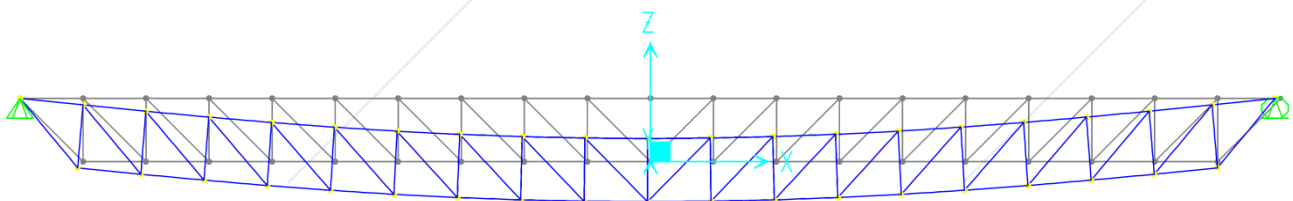


Figura 13. Deformata elastica ottenuta tramite codice ad elementi finiti ($f_{\max} = 62.5$ o 65.5 mm se, rispettivamente, si trascura o si considera la deformabilità dei montanti).

Corso di Tecnica delle Costruzioni – Progetto di una trave reticolare in acciaio

In ciascuna maglia, dunque, l'abbassamento complessivo vale:

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

Alla freccia in mezzeria contribuisce solo la metà delle maglie, il cui numero è l/b , essendo l la luce della trave e b il passo delle maglie. Il valore di freccia in mezzeria dovuto al recupero foro-bullone (cedimento anelastico) è dato, quindi, dalla seguente espressione:

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

Ricordando che $\cos\theta = h/L$, e facendo riferimento al caso in oggetto ($h = b = L/\sqrt{2}$), si deriva:

$$f_{\text{foro-bullone}} = [\sqrt{2} + 1] \cdot 1\text{mm} \cdot 20 = 48.3\text{ mm}$$

Tale valore non deve essere sommato al valore della freccia elastica, in quanto non reversibile e riguarda soltanto il primo ciclo di carico. Tale deformata anelastica deve però essere valutata al fine di individuare eventuali criticità e/o la necessità di provvedimenti particolari.

Vibrazioni (*argomento opzionale)

Le vibrazioni possono creare problemi legati all'utilizzo dell'opera soprattutto nel caso di elementi orizzontali con campate significative, quali appunto passerelle pedonali e ponti. L'approccio seguito per la verifica allo stato limite di vibrazione consiste nello stimare la frequenza naturale di vibrazione f_0 dell'elemento strutturale e nel controllare che superi un valore minimo legato all'utilizzo dell'opera, in modo da evitare il fenomeno di risonanza.

La frequenza propria di una trave di sezione A , densità ρ , luce l e rigidità flessionale EI vale:

$$f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

La frequenza propria f_0 può essere legata alla freccia in mezzeria δ_p dovuta ai pesi propri e permanenti ($g_{tr} + g$) = $p = \rho A g$ (con g accelerazione di gravità):

$$\begin{cases} \delta_p = \frac{5}{384} \frac{\rho A g L^4}{EI} \\ f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \end{cases} = \begin{cases} \frac{EI}{\rho A} = \frac{5}{384} \frac{gL^4}{\delta_p} \\ f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{5}{384} \frac{gL^4}{\delta_p}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{5}{384} \frac{g}{\delta_p}} \end{cases} \rightarrow f_0[\text{Hz}] = \frac{17.75}{\sqrt{\delta_p}} \text{ con } \delta_p \text{ in [mm]}$$

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

$$f_0[\text{Hz}] = \frac{17.75}{\sqrt{61.2 - 34.4}} = 3.4\text{ Hz} \geq 3\text{ Hz}$$

CAPITOLO 11 Predimensionamento e progetto finale

In Tabella 5 si riporta il confronto tra fase di predimensionamento e progetto finale in termini di aree sezionali dei profili e peso totale della trave. La limitata variazione sul peso proprio della trave permette di non effettuare nuovamente le verifiche con il peso proprio della trave aggiornato.

Il peso proprio degli elementi costituenti la trave reticolare (correnti, diagonali e montanti) è di 27.5 kN. A tale valore va sommato un 10% che tenga conto degli elementi di collegamento (fazzoletti, bulloni e imbottiture), ottenendo così un valore di circa 30 kN (≈ 3 tonnellate), in pieno accordo a quanto ipotizzato in fase di predimensionamento.

Tabella 5. Confronto tra scelte in fase di predimensionamento e definitive.

	Area Corrente [mm ²]	Area Montante [mm ²]	Area Diagonale [mm ²]	Peso Trave [kN]
Predimensionamento	6500	1300	1850	26.5
Valore finale	6990	1382	1572	27.5
Variazione [%]	+7.5%	+6.3%	-8.5%	+3.8%

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 tesi e schema a diagonali compressi
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)