



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E MECCANICA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

RELAZIONE COSTRUZIONI IN LEGNO

*Rete di drenaggio acque meteoriche
Quartiere “Le Albere” – Ex Parco Michelin (Trento)*

DOCENTI

Alberto Bellin

Maria Grazia Zanoni

STUDENTI

Nicola Meoli 225077

Luca Zorzi 227085

Anno accademico 2020/21

Indice

Elenco delle tabelle	3
Elenco delle figure	4
1 Introduzione	5
1.1 Premessa	5
2 Verifica degli elementi	6
2.1 Arcarecci	6
2.1.1 Flessione	7
2.1.2 Stabilità flesso-torsionale	7
2.1.3 Taglio	7
2.1.4 Freccia	8
2.2 Trave a doppia rastremazione	8
2.2.1 Flessione – Sezione D	9
2.2.2 Trazione perpendicolare – Sezione D	10
2.2.3 Trazione perpendicolare combinata a taglio – Sezione C	10
2.2.4 Flessione – Sezione B	11
2.2.5 Taglio – Sezione A	11
2.2.6 Compressione perpendicolare – Sezione A	11
2.2.7 Stabilità flesso-torsionale – Sezione B	12
2.2.8 Freccia	12
2.3 Trave Solaio	13
2.3.1 Flessione	14
2.3.2 Stabilità flesso-torsionale	14
2.3.3 Taglio	15
2.3.4 Compressione perpendicolare appoggio	15
2.3.5 Freccia	15
3 Verifica dei collegamenti	16
3.1 Viti inclinate trave a doppia rastremazione e arcarecci	16
3.1.1 Resistenze caratteristiche R_k del singolo connettore	17
3.1.2 Resistenze di progetto R_d del singolo connettore	18
3.1.3 Resistenza di progetto della connessione e verifica	18
3.1.4 Distanze minime e distanze effettive	18

Elenco delle tabelle

2.1	Valori di progetto SLU per la verifica degli arcarecci	6
2.2	Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per gli arcarecci	6
2.3	Valori di progetto per la verifica della trave a doppia rastremazione	9
2.4	Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per la trave a doppia rastremazione	9
2.5	Valori di progetto per la verifica della trave del solaio	14
2.6	Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per la trave del solaio	14
3.1	Valori di progetto della connessione tramite vite inclinate	16

Elenco delle figure

2.1	Indicazione della nomenclatura e dello schema statico adottato per gli arcarecci	6
2.2	Indicazione della nomenclatura adottata per le zone di verifica lungo lo sviluppo della trave e delle condizioni di carico assunte per la trave a doppia rastremazione	8
2.3	Indicazione della nomenclatura e dello schema statico adottato per la trave del solaio . . .	13
3.1	Schematizzazione della connessione tramite viti incrociate tra la trave rastremata e gli arcarecci	16
3.2	Rappresentazione della vite ASSY PLUS VG TC nel quale la nomenclatura corrisponde a $d_1 = d$ e $d_2 = d_1$	17

Introduzione

1.1 Premessa

Verifica degli elementi

2.1 Arcarecci

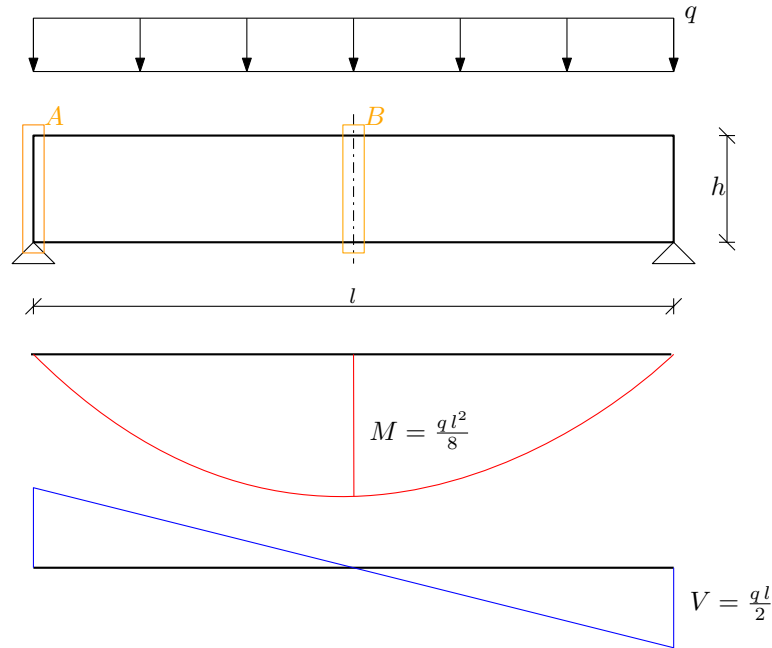


Figura 2.1: Indicazione della nomenclatura e dello schema statico adottato per gli arcarecci

Tabella 2.1: Valori di progetto SLU per la verifica degli arcarecci

Valori geometrici e coefficienti di esposizione o durata del carico					
b	160 mm	h	200 mm	l	5000 mm
γ_M	1,45	k_{mod}	0,9	k_{def}	0,6
Valori di resistenza GL28h [MPa]					
$f_{m,k}$	28,0	$f_{m,d}$	17,379	$E_{0,mean}$	12 600,0
$f_{v,k}$	3,5	$f_{v,d}$	2,172	$E_{0,05}$	10 500,0
$f_{c,90,k}$	2,5	$f_{c,90,d}$	1,552	G_{mean}	650,0
$f_{t,90,k}$	0,5	$f_{t,90,d}$	0,31	G_{05}	540,0
Valori dei carico q [kN m ⁻¹]					
SLU	3,08	$SLE_{rara}^{perm.}$	0,78	$SLE_{rara}^{acc.1}$	1,31

Tabella 2.2: Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per gli arcarecci

Sezione	x [mm]	M_d [kN m]	V_d [kN]
A	0,0	0,0	7,704
B	2500,0	9,63	0,0

Si riportano ora le verifiche svolte calcolate in base al capitolo 6 dell'Eurocodice 5 (UNI EN 1995-1-1), salvo diversamente specificato.

2.1.1 Flessione

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 17,379 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

La sollecitazione massima la si ha in mezzeria, pertanto è pari, avendo sezione rettangolare, a:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{M_d}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{9,63 \times 10^6 \text{ N mm}}{\frac{160 \cdot 200^2}{6} \text{ mm}^3} = 9,028 \text{ MPa}$$

2.1.2 Stabilità flessio-torsionale

Sebbene lo sbandamento sia impedito, pur tenendone conto si ha:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (2.2)$$

dove

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{se } 0.75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{se } \lambda_{rel,m} \geq 1.4 \end{cases} = 1 \quad (2.3)$$

in cui

$$\begin{aligned} \lambda_{rel,m} &= \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{28.0}{213.9}} = 0.362 \\ \sigma_{m,crit} &= \frac{0.78}{l_{eff}} \frac{b^2}{h} E_{0.05} = \frac{0.78}{4900.0} \frac{160^2}{200} 10500.0 = 213,9 \text{ MPa} \\ l_{eff} &= 0.9 l + 2 h = 0.9 \cdot 5000 + 2 \cdot 200 = 4900,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

essendo il carico nel bordo compresso dell'elemento.

Quindi la verifica diventa

$$9,028 \text{ MPa} < 1 \cdot 17,379 \text{ MPa} = 17,379 \text{ MPa}$$

risultando pertanto soddisfatta.

2.1.3 Taglio

Si deve avere

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (2.4)$$

La sollecitazione massima che si ha agli appoggi vale

$$\tau_d = 1.5 \frac{V_d}{b_{eff} \cdot h} = \frac{7,704 \times 10^3 \text{ N}}{114.3 \cdot 200 \text{ mm}^2} = 0,506 \text{ MPa}$$

in cui da normativa NTC (C.4.4.8.1.9) per il legno lamellare

$$b_{eff} = k_{cr} \cdot b = \frac{2.5}{f_{v,k}} \cdot b = \frac{2.5}{3.5} \cdot 160 = 114,3 \text{ mm}$$

Essendo $0,506 \text{ MPa} < 2,172 \text{ MPa}$ la verifica è soddisfatta.

2.1.4 Freccia

La freccia dovuta al contributo del momento flettente e del taglio, nel caso di semplice appoggio vale

$$w(q) = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot J} + \chi \frac{1}{8} \frac{q \cdot l^2}{G_{mean} \cdot b \cdot h} \quad (2.5)$$

che, per un carico unitario e per una sezione rettangolare, assume il valore di riferimento

$$w(q = 1 \text{ kN m}^{-1}) = \frac{5}{384} \frac{1 \cdot 5000^4}{12600.0 \cdot 106,667 \times 10^6} + 1.2 \frac{1}{8} \frac{1 \cdot 5000^2}{650.0 \cdot 160 \cdot 200} = 6,235 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Le deformazioni istantanee per i carichi agli SLE con combinazione rara valgono:

$$w_{inst,G} = w(q = 0,78 \text{ kN m}^{-1}) = 4,83 \text{ mm} \quad (2.7)$$

$$w_{inst,Q1} = w(q = 1,31 \text{ kN m}^{-1}) = 8,17 \text{ mm} \implies l/w_{inst,Q1} = 612,1 > 300 \quad (2.8)$$

$$w_{inst,TOT} = w_{inst,G} + w_{inst,Q1} = 13,0 \text{ mm} \quad (2.9)$$

Con $k_{def} = 0.6$, $\psi_{21} = 0.0$, in assenza di controfreccia iniziale e nelle ipotesi che gli elementi abbiano lo stesso comportamento viscoelastico, le deformazioni finali per i carichi agli SLE con combinazione rara assumono la forma semplificata:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 7,73 \text{ mm} \quad (2.10)$$

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1} \cdot (1 + \psi_{21} k_{def}) = 8,17 \text{ mm} \quad (2.11)$$

$$w_{fin,TOT} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} = 15,9 \text{ mm} \implies l/w_{fin,TOT} = 314,5 > 200 \quad (2.12)$$

2.2 Trave a doppia rastremazione

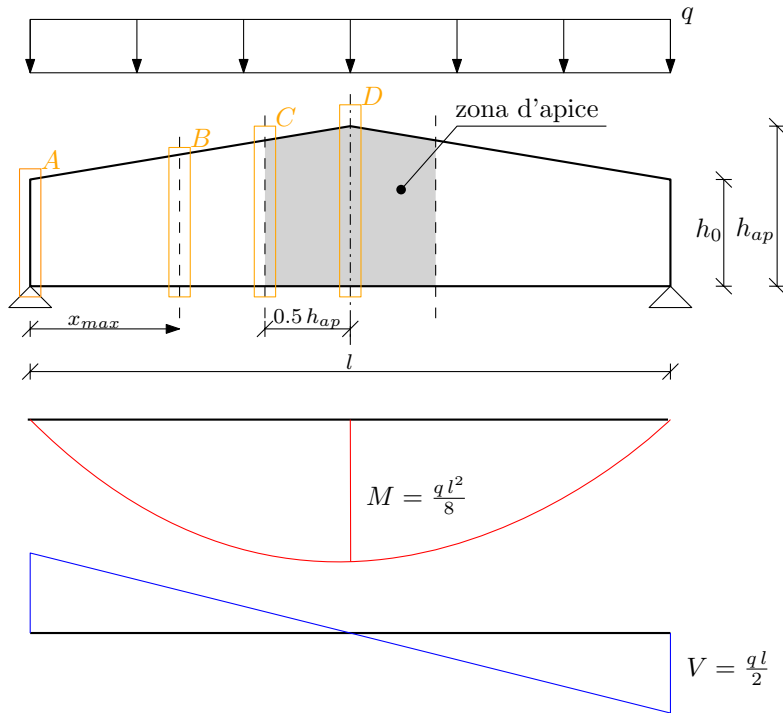


Figura 2.2: Indicazione della nomenclatura adottata per le zone di verifica lungo lo sviluppo della trave e delle condizioni di carico assunte per la trave a doppia rastremazione

Tabella 2.3: Valori di progetto per la verifica della trave a doppia rastremazione

Valori geometrici e coefficienti di esposizione o durata del carico					
b	240 mm	h_{ap}	1300 mm	α	3,5°
h_0	815 mm	l	16 000 mm	α_{ap}	3,5°
γ_M	1,45	k_{mod}	0,9	k_{def}	0,6
Valori di resistenza GL28h [MPa]					
$f_{m,k}$	28,0	$f_{m,d}$	17,379	$E_{0,mean}$	12 600,0
$f_{v,k}$	3,5	$f_{v,d}$	2,172	$E_{0,05}$	10 500,0
$f_{c,90,k}$	2,5	$f_{c,90,d}$	1,552	G_{mean}	650,0
$f_{t,90,k}$	0,5	$f_{t,90,d}$	0,31	G_{05}	540,0
Valori dei carico q [kN m ⁻¹]					
SLU	19,56	$SLE_{rara}^{perm.}$	8,64	$SLE_{rara}^{acc.1}$	10,92

Tabella 2.4: Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per la trave a doppia rastremazione

Sezione	x [mm]	M_d [kN m]	V_d [kN]
A	0,0	0,0	156,48
B	5015,4	538,8	
C	7350,0	621,788	12,714
D	8000,0	625,92	0,0

In riferimento alla nomenclatura delle sezioni mostrata in figura 2.2 si riportano ora le verifiche svolte calcolate in base al capitolo 6 dell'Eurocodice 5 (UNI EN 1995-1-1), salvo diversamente specificato.

2.2.1 Flessione – Sezione D

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d} \quad (2.13)$$

Avendo la trave a doppia rastremazione un raggio $r_{in} = \infty$ si ha

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0.76 + 0.001 \frac{r_{in}}{t} & \text{se } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} = 1 \quad (2.14)$$

La sollecitazione in mezzzeria vale

$$\sigma_{m,d} = k_l \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 1.106 \frac{6 \cdot 625,92 \times 10^6 \text{ N mm}}{240 \text{ mm} \cdot (1300 \text{ mm})^2} = 10,239 \text{ MPa} \quad (2.15)$$

dove

$$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3 = 1.106 \quad (2.16)$$

in cui $k_l = k_1$ in quanto: il raggio medio $r = \infty$, per le travi a doppia rastremazione, fa sì che si annullino gli altri termini. Avendo $\alpha_{ap} = 3,5^\circ$ si ha

$$k_1 = 1 + 1.4 \tan \alpha_{ap} + 5.4 \tan^2 \alpha_{ap} = 1.106$$

Essendo $10,239 \text{ MPa} < 1 \cdot 17,379 \text{ MPa} = 17,379 \text{ MPa}$ la verifica a flessione è soddisfatta.

2.2.2 Trazione perpendicolare – Sezione D

Si deve avere

$$\sigma_{t,90,d}^{ap} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d} \quad (2.17)$$

con

$$k_{dis} = \begin{cases} 1.4 & \text{se travi a doppia rastremazione o curve} \\ 1.7 & \text{se travi centinate} \end{cases} = 1.4 \quad (2.18)$$

e

$$k_{vol} = \begin{cases} 1.0 & \text{se legno massiccio} \\ \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 & \text{se legno lamellare incollato LVL a strati paralleli} \end{cases} = 0.478 \quad (2.19)$$

in cui $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$, mentre V è il volume della zona sollecitata in riferimento alla figura sopra citata ed è limitato a

$$V = \min\left(\frac{2}{3}V_d; V_{colmo}\right) = 0,399 \text{ m}^3$$

con V_b volume totale della trave pari a $4,061 \text{ m}^3$ e V_{colmo} volume reale della zona di colmo pari a $0,399 \text{ m}^3$.

La sollecitazione vale

$$\sigma_{t,90,d}^{ap} = k_p \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 0.012 \frac{6 \cdot 625,92 \times 10^6 \text{ N mm}}{240 \text{ mm} \cdot (1300 \text{ mm})^2} = 0,113 \text{ MPa} \quad (2.20)$$

dove

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 = 0.012 \quad (2.21)$$

in cui $k_p = k_5$ in quanto: il raggio medio $r = \infty$, per le travi a doppia rastremazione, fa sì che si annullino gli altri termini. Avendo $\alpha_{ap} = 3,5^\circ$ si ha

$$k_5 = 0.2 \tan \alpha_{ap} = 0.012$$

Essendo $0,113 \text{ MPa} < 1.4 \cdot 0.478 \cdot 0,31 \text{ MPa} = 0,208 \text{ MPa}$ la verifica a trazione è soddisfatta.

2.2.3 Trazione perpendicolare combinata a taglio – Sezione C

Si deve avere

$$\frac{\tau_d^{0.5 ap}}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}^{0.5 ap}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (2.22)$$

Occorre dapprima calcolare le azioni di progetto nella sezione C partendo dalla quota della sezione $x^C = \frac{l}{2} - 0.5 \cdot h_{ap} = 7350,0 \text{ mm}$, in quanto il carico e la trave sono simmetriche rispetto la mezzerie. Le azioni a tale x valgono:

$$V_{0.5 ap} = 12,714 \text{ kN} \quad M_{0.5 ap} = 621,788 \text{ kN mm} \quad (2.23)$$

Il secondo termine della disequazione di verifica si calcola nello stesso modo di quanto visto nel paragrafo precedente con $M = M_{0.5 ap}$ e $h = h_{0.5 ap} = 1260,0 \text{ mm}$ variati. Si ha perciò

$$\sigma_{t,90,d}^{0.5 ap} = 0,12 \text{ MPa}$$

La componente di taglio del primo termine si calcola come:

$$\tau_d^{0.5 ap} = 1.5 \frac{V_{0.5 ap}}{b_{eff} \cdot h_{0.5 ap}} = 1.5 \frac{12,714 \times 10^3 \text{ N}}{171,4 \text{ mm} \cdot 1260,0 \text{ mm}} = 0,088 \text{ MPa}$$

in cui dalle NTC (C.4.4.8.1.9) per il legno lamellare si ha:

$$b_{eff} = k_{cr} \cdot b = \frac{2.5}{f_{v,k}} \cdot b = \frac{2.5}{3.5} \cdot 240 = 171,4 \text{ mm}$$

In definitiva la verifica risulta soddisfatta:

$$\frac{0,088 \text{ MPa}}{2,172 \text{ MPa}} + \frac{0,12 \text{ MPa}}{1.4 \cdot 0.478 \cdot 0,31 \text{ MPa}} = 0,617 \leq 1 \quad (2.24)$$

2.2.4 Flessione – Sezione B

Bordo inclinato e compresso Avendo un momento flettendo che tende le fibre inferiori, la formula di verifica nel late di travo con il bordo inclinato compresso è

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha,comp.} \cdot f_{m,d} \quad (2.25)$$

Bordo non inclinato e teso La formula di verifica è analoga a quella sopra ma non è presente il coefficiente riduttivo, perciò è automaticamente soddisfatta quando lo è la prima.

Il coefficiente riduttivo vale:

$$k_{m,\alpha,comp.} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0.75 f_{v,d} \tan \alpha}\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d} \tan \alpha}\right)^2}} = 0.95 \quad (2.26)$$

Si calcolano quindi le tensioni a flessione nella zona maggiormente sollecitata posta ad una quota x_{max} . Tale quota vale, nel caso di trave simmetrica e carico distribuito:

$$x_{max} = \frac{l \cdot h_0}{2 \cdot h_{ap}} = 5015,4 \text{ mm} \quad (2.27)$$

In corrispondenza di questa sezione si hanno le seguenti caratteristiche:

$$h_{x_{max}} = h_{ap} - \tan \alpha \cdot (0.5 l - x_{max}) = 1117,5 \text{ mm} \quad (2.28)$$

$$M_d^{max} = V_d \cdot x_{max} - \frac{Q \cdot (x_{max})^2}{2} = 538,8 \text{ kN mm} \quad (2.29)$$

$$\sigma_{m,d}^{max} = \sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6 \cdot M_d^{max}}{b \cdot h_{x_{max}}^2} = 10,787 \text{ MPa} \quad (2.30)$$

Si ha perciò

$$10,787 \text{ MPa} < 0.95 \cdot 17,379 \text{ MPa} = 16,509 \text{ MPa}$$

2.2.5 Taglio – Sezione A

La verifica consiste in

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (2.31)$$

La tensione di taglio vale

$$\tau_d = 1.5 \frac{V_d}{b_{eff} \cdot h_0} = 1.5 \frac{156,48 \times 10^3 \text{ N}}{171,4 \text{ mm} \cdot 815 \text{ mm}} = 1,68 \text{ MPa}$$

con b_{eff} uguale a quella calcolata al paragrafo 2.2.3.

Risulta quindi soddisfatta:

$$1,68 \text{ MPa} < 2,172 \text{ MPa}$$

2.2.6 Compressione perpendicolare – Sezione A

Si deve avere

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (2.32)$$

in cui $k_{c,90}$ vale 1.75 per il legno lamellare e $f_{c,90,d}$ è pari a 1,552 MPa.

La tensione all'appoggio si calcola come

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{A_{ef}} = \frac{156,48 \times 10^3 \text{ N}}{79 200 \text{ mm}^2} = 1,976 \text{ MPa}$$

in cui A_{ef} consiste nell'area di contatto efficace $b \cdot l_{ef}$, calcolata aumentando la lunghezza di appoggio (che vale 300 mm) di 30 mm in un solo lato.

Si ha quindi

$$1,976 \text{ MPa} < 1.75 \cdot 1,552 \text{ MPa} = 2,716 \text{ MPa}$$

2.2.7 Stabilità flessio-torsionale – Sezione B

A favore di sicurezza si utilizza la $\sigma_{m,d}^{max}$ e una altezza h della trave pari alla media tra h_0 e h_{ap} che è minore dell'altezza $h_{x^{max}}$.

Si deve avere:

$$\sigma_{m,d}^{max} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (2.33)$$

dove

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{se } 0.75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{se } \lambda_{rel,m} \geq 1.4 \end{cases} = 0.796 \quad (2.34)$$

in cui

$$\begin{aligned} \lambda_{rel,m} &= \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{28.0}{27.0}} = 1.018 \\ \sigma_{m,crit} &= \frac{0.78}{l_{eff}} \frac{b^2}{h} E_{0.05} = \frac{0.78}{16515.0} \frac{240^2}{1057.5} 10500.0 = 27.0 \text{ MPa} \\ l_{eff} &= \{0.9l + 2h; 1 \cdot \text{interasse} 2h\} = \{0.9 \cdot 16000 + 2 \cdot 1057.5; 1 \cdot 900 + 2 \cdot 1057.5\} \\ &= \{16515.0 \text{ mm}; 3015.0 \text{ mm}\} = 16515.0 \text{ mm (condizione più sfavorevole)} \end{aligned}$$

Si sono valutate entrambe le possibilità di sbandamento della trave e scelta quella più sfavorevole, ovvero quella che portasse ad un k_{crit} minore. Una considerando una lunghezza libera di inflessione pari a tutta la lunghezza della trave e coefficientata di 0.9; e un'altra nella quale gli arcarecci blocchino la torsione. In questo secondo caso la lunghezza di libera inflessione è pari all'interasse tra gli arcarecci e si ha una via di mezzo tra la condizione con coefficiente 0.9 e 1. Si è scelto 1 per essere a favore di sicurezza. Infine si è sommato $2h$ essendo il carico applicato nel bordo compresso dell'elemento.

Quindi la verifica diventa

$$10,787 \text{ MPa} < 0.796 \cdot 17,379 \text{ MPa} = 13,841 \text{ MPa}$$

risultando pertanto soddisfatta.

2.2.8 Freccia

La freccia dovuta al contributo del momento flettente e del taglio, nel caso di semplice appoggio vale

$$w(q) = k_m \cdot \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot J_0} + k_v \cdot \chi \frac{1}{8} \frac{q \cdot l^2}{G_{mean} \cdot A_0} \quad (2.35)$$

Con J_0 e A_0 calcolati nella sezione rettangolare all'appoggio con altezza h_0 . Nel caso di travi a doppia rastremazione i due coefficienti valgono:

$$k_m = \left(\frac{h_0}{h_{ap}}\right)^3 \frac{1}{0.15 + 0.85 \left(\frac{h_0}{h_{ap}}\right)} = 0.361 \quad (2.36)$$

$$k_v = \frac{2}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{ap}}\right)^{2/3}} = 0.846 \quad (2.37)$$

Per un carico unitario assume il valore di riferimento:

$$w(q = 1 \text{ kN m}^{-1}) = 0.361 \cdot \frac{5}{384} \frac{1 \cdot 16000^4}{12600.0 \cdot 10826,868 \times 10^6} + 0.846 \cdot 1.2 \frac{1}{8} \frac{1 \cdot 16000^2}{650.0 \cdot 240 \cdot 815} = 2,512 \text{ mm} \quad (2.38)$$

Le deformazioni istantanee per i carichi agli SLE con combinazione rara valgono:

$$w_{inst,G} = w(q = 8,64 \text{ kN m}^{-1}) = 21,71 \text{ mm} \quad (2.39)$$

$$w_{inst,Q1} = w(q = 10,92 \text{ kN m}^{-1}) = 27,43 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad l/w_{inst,Q1} = 583,4 > 300 \quad (2.40)$$

$$w_{inst,TOT} = w_{inst,G} + w_{inst,Q1} = 49,14 \text{ mm} \quad (2.41)$$

Con $k_{def} = 0.6$, $\psi_{21} = 0.0$, in assenza di controfreccia iniziale e nelle ipotesi che gli elementi abbiano lo stesso comportamento viscoelastico, le deformazioni finali per i carichi agli SLE con combinazione rara assumono la forma semplificata:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 34,74 \text{ mm} \quad (2.42)$$

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1} \cdot (1 + \psi_{21} k_{def}) = 27,43 \text{ mm} \quad (2.43)$$

$$w_{fin,TOT} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} = 62,17 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad l/w_{fin,TOT} = 257,4 > 200 \quad (2.44)$$

2.3 Trave Solaio

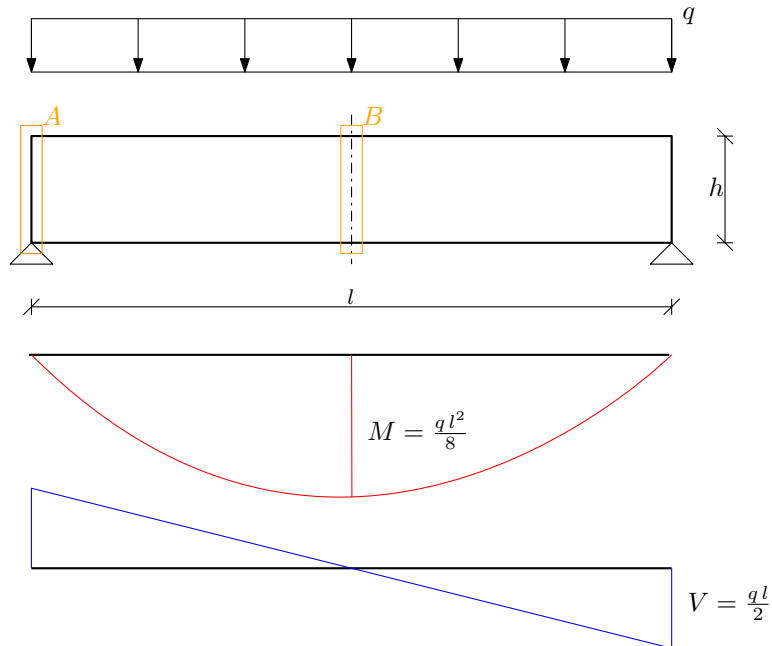


Figura 2.3: Indicazione della nomenclatura e dello schema statico adottato per la trave del solaio

Tabella 2.5: Valori di progetto per la verifica della trave del solaio

Valori geometrici e coefficienti di esposizione o durata del carico					
b	200 mm	h	700 mm	l	7635 mm
γ_M	1,45	k_{mod}	0,9	k_{def}	0,6
Valori di resistenza GL28h [MPa]					
$f_{m,k}$	28,0	$f_{m,d}$	17,379	$E_{0,mean}$	12 600,0
$f_{v,k}$	3,5	$f_{v,d}$	2,172	$E_{0,05}$	10 500,0
$f_{c,90,k}$	2,5	$f_{c,90,d}$	1,552	G_{mean}	650,0
$f_{t,90,k}$	0,5	$f_{t,90,d}$	0,31	G_{05}	540,0
Valori dei carico q [kN m ⁻¹]					
SLU	34,41	$SLE_{rara}^{perm.}$	15,6	$SLE_{rara}^{acc.1}$	8,66

Tabella 2.6: Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per la trave del solaio

Sezione	x [mm]	M_d [kN m]	V_d [kN]
A	0,0	0,0	131,36
B	3817,5	250,734	0,0

Si riportano ora le verifiche svolte calcolate in base al capitolo 6 dell'Eurocodice 5 (UNI EN 1995-1-1), salvo diversamente specificato.

2.3.1 Flessione

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 17,379 \text{ MPa} \quad (2.45)$$

La sollecitazione massima la si ha in mezzzeria, pertanto è pari, avendo sezione rettangolare, a:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{M_d}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{250,734 \times 10^6 \text{ N mm}}{\frac{200 \cdot 700^2}{6} \text{ mm}^3} = 15,351 \text{ MPa}$$

2.3.2 Stabilità flessio-torsionale

Si deve avere

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (2.46)$$

dove

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{se } 0.75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{se } \lambda_{rel,m} \geq 1.4 \end{cases} = 1 \quad (2.47)$$

in cui

$$\begin{aligned} \lambda_{rel,m} &= \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{28.0}{56.6}} = 0.703 \\ \sigma_{m,crit} &= \frac{0.78 b^2}{l_{eff} h} E_{0.05} = \frac{0.78}{8271.5} \frac{200^2}{700} 10500.0 = 56,6 \text{ MPa} \\ l_{eff} &= 0.9 l + 2 h = 0.9 \cdot 7635 + 2 \cdot 700 = 8271,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

essendo il carico nel bordo compresso dell'elemento.

Quindi la verifica diventa

$$15,351 \text{ MPa} < 1 \cdot 17,379 \text{ MPa} = 17,379 \text{ MPa}$$

risultando pertanto soddisfatta.

2.3.3 Taglio

Si deve avere

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (2.48)$$

La sollecitazione massima che si ha agli appoggi vale

$$\tau_d = 1.5 \frac{V_d}{b_{eff} \cdot h} = \frac{131,36 \times 10^3 \text{ N}}{142,9 \cdot 700 \text{ mm}^2} = 1,97 \text{ MPa}$$

in cui da normativa NTC (C.4.4.8.1.9) per il legno lamellare

$$b_{eff} = k_{cr} \cdot b = \frac{2.5}{f_{v,k}} \cdot b = \frac{2.5}{3.5} \cdot 200 = 142,9 \text{ mm}$$

Essendo $1,97 \text{ MPa} < 2,172 \text{ MPa}$ la verifica è soddisfatta.

2.3.4 Compressione perpendicolare appoggio

Si deve avere

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (2.49)$$

in cui $k_{c,90}$ vale 1.75 per il legno lamellare e $f_{c,90,d}$ è pari a 1,552 MPa.

La tensione all'appoggio si calcola come

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{A_{ef}} = \frac{131,36 \times 10^3 \text{ N}}{52 \, 800 \text{ mm}^2} = 2,488 \text{ MPa}$$

in cui A_{ef} consiste nell'area di contatto efficace $b \cdot l_{ef}$, calcolata aumentando la lunghezza di appoggio della scarpa metallica (che vale 234 mm) di 30 mm in un solo lato.

Si ha quindi

$$2,488 \text{ MPa} < 1.75 \cdot 1,552 \text{ MPa} = 2,716 \text{ MPa}$$

2.3.5 Freccia

La freccia dovuta al contributo del momento flettente e del taglio, nel caso di semplice appoggio vale

$$w(q) = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot J} + \chi \frac{1}{8} \frac{q \cdot l^2}{G_{mean} \cdot b \cdot h} \quad (2.50)$$

che, per un carico unitario e per una sezione rettangolare, assume il valore di riferimento

$$w(q = 1 \text{ kN m}^{-1}) = \frac{5}{384} \frac{1 \cdot 7635^4}{12600.0 \cdot 5716,667 \times 10^6} + 1.2 \frac{1}{8} \frac{1 \cdot 7635^2}{650.0 \cdot 200 \cdot 700} = 0,71 \text{ mm} \quad (2.51)$$

Le deformazioni istantanee per i carichi agli SLE con combinazione rara valgono:

$$w_{inst,G} = w(q = 15,6 \text{ kN m}^{-1}) = 11,08 \text{ mm} \quad (2.52)$$

$$w_{inst,Q1} = w(q = 8,66 \text{ kN m}^{-1}) = 6,15 \text{ mm} \implies l/w_{inst,Q1} = 1241,1 > 300 \quad (2.53)$$

$$w_{inst,TOT} = w_{inst,G} + w_{inst,Q1} = 17,23 \text{ mm} \quad (2.54)$$

Con $k_{def} = 0.6$, $\psi_{21} = 0.3$, in assenza di controfreccia iniziale e nelle ipotesi che gli elementi abbiano lo stesso comportamento viscoelastico, le deformazioni finali per i carichi agli SLE con combinazione rara assumono la forma semplificata:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 17,73 \text{ mm} \quad (2.55)$$

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1} \cdot (1 + \psi_{21} k_{def}) = 7,26 \text{ mm} \quad (2.56)$$

$$w_{fin,TOT} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} = 24,99 \text{ mm} \implies l/w_{fin,TOT} = 305,5 > 200 \quad (2.57)$$

Verifica dei collegamenti

3.1 Viti inclinate trave a doppia rastremazione e arcarecci

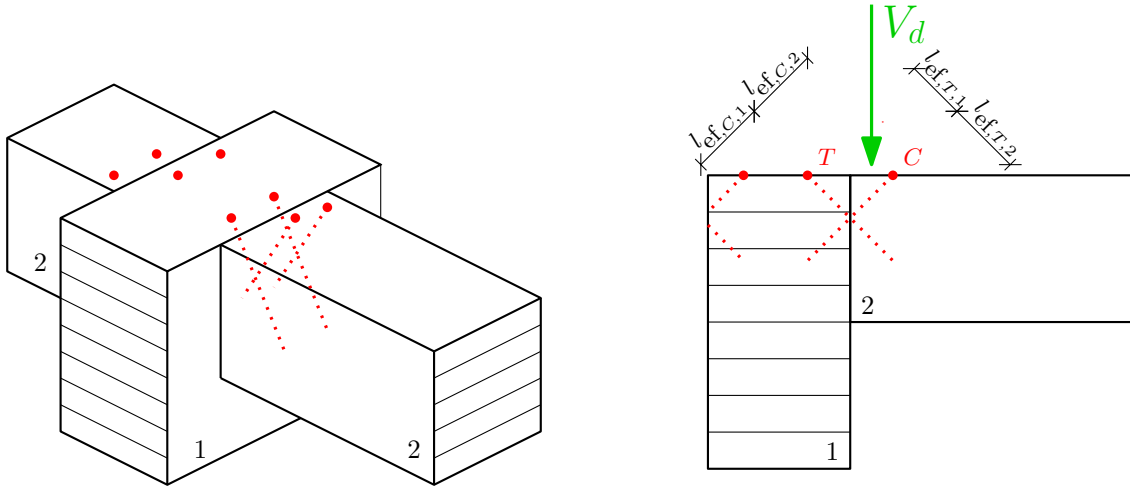


Figura 3.1: Schematizzazione della connessione tramite viti incrociate tra la trave rastremata e gli arcarecci

Tabella 3.1: Valori di progetto della connessione tramite viti inclinate

Valori di progetto della connessione tramite viti inclinate					
d	6 mm	d_1	3,8 mm	n	2
ρ_k^1	425 kg m ⁻³	l_{ef}^1	80 mm	$\alpha_{fibra-vite}^1$	90°
ρ_k^2	425 kg m ⁻³	l_{ef}^2	80 mm	$\alpha_{fibra-vite}^2$	45°
γ_M	1,5	k_{mod}	0,9		
γ_{M1}	1,05	γ_{M2}	1,25	$f_{u,k}$	600 MPa

La connessione tra la trave a doppia rastremazione e ciascun arcareccio viene eseguita tramite due viti a tutto filetto. Entrambe le viti sono sottoposte a puro sforzo assiale ed essendo inclinate ad $\alpha = 45^\circ$ gli sforzi valgono

$$F_{traz} = F_{comp} = V^{arcareccio} \cos(\alpha) = 7704 \text{ N} \cos 45^\circ = 5447,6 \text{ N} \quad . \quad (3.1)$$

Per la vite sottoposta a sola trazione si tengono conto dei modi di rottura per trazione del materiale acciaio e della rottura per estrazione della vite lato elemento principale 1 e lato elemento secondario 2. Per la vite sottoposta a sola compressione si tiene conto della rottura per estrazione nei due elementi, e della rottura a instabilità per carico di punta a compressione. Infine si tengono conto delle distanze minime dal bordo e dalle estremità.

Le viti utilizzate sono della ditta Wurth e denominate *ASSY PLUS VG TC*.

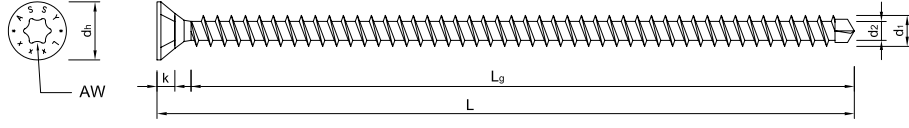


Figura 3.2: Rappresentazione della vite ASSY PLUS VG TC nel quale la nomenclatura corrisponde a $d_1 = d$ e $d_2 = d_1$

3.1.1 Resistenze caratteristiche Rk del singolo connettore

Rottura acciaio

$$F_{ax,Rk}^{acciaio} = 0.9 A_{res} f_{u,k} = 0.9 \frac{\pi d_1^2}{4} f_{u,k} = \frac{\pi (3,8 \text{ mm})^2}{4} 600 \text{ MPa} = 6124,2 \text{ N} \quad (3.2)$$

Estrazione elemento 1

$$F_{ax,Rk}^{estr.1} = \frac{f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef}^i \cdot k_d \cdot n_{ef}}{1,2 \cos^2 \alpha_{f-v} + \sin^2 \alpha_{f-v}} = \frac{17,35 \cdot 6 \cdot 80 \cdot 0.75 \cdot 1}{1,2 \cos^2 90 + \sin^2 90} = 6246,4 \text{ N} \quad (3.3)$$

dove

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0.5} \cdot l_{ef}^{-0.1, i} \cdot \rho_k^{0.8, i} = 0,52 \cdot 6^{-0.5} \cdot 80^{-0.1} \cdot 425^{0.8} = 17,35 \text{ MPa}$$

$$k_d = \min \left(\frac{d}{8}; 1 \right) = \min \left(\frac{6}{8}; 1 \right) = 0.75$$

$\alpha_{f-v} = 90^\circ$ angolo tra la direzione delle fibre e la vite

$$n_{ef} = n^{0.9} = 1$$

Estrazione elemento 2

$$F_{ax,Rk}^{estr.2} = \frac{f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef}^i \cdot k_d \cdot n_{ef}}{1,2 \cos^2 \alpha_{f-v} + \sin^2 \alpha_{f-v}} = \frac{17,35 \cdot 6 \cdot 80 \cdot 0.75 \cdot 1}{1,2 \cos^2 45 + \sin^2 45} = 5678,6 \text{ N} \quad (3.4)$$

dove

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0.5} \cdot l_{ef}^{-0.1, i} \cdot \rho_k^{0.8, i} = 0,52 \cdot 6^{-0.5} \cdot 80^{-0.1} \cdot 425^{0.8} = 17,35 \text{ MPa}$$

$$k_d = \min \left(\frac{d}{8}; 1 \right) = \min \left(\frac{6}{8}; 1 \right) = 0.75$$

$\alpha_{f-v} = 45^\circ$

$$n_{ef} = n^{0.9} = 1$$

Instabilità Le formule che seguono derivano dal documento ETA del produttore 11/0190.

$$F_{ax,Rk}^{buck} = k_c \cdot N_{pl,k} = 0,717 \cdot 6804,7 \text{ N} = 4877,8 \text{ N} \quad (3.5)$$

dove

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{se } \bar{\lambda}_k \leq 0.2 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_k^2}} & \text{se } \bar{\lambda}_k > 0.2 \end{cases} = 0,717$$

$$N_{pl,k} = \frac{\pi d_1^2}{4} f_{y,k} = \frac{\pi (3,8 \text{ mm})^2}{4} 600 \text{ MPa} = 6804,7 \text{ N}$$

in cui

$$\begin{aligned}
k &= 0.5 \left[1 + 0.49 (\bar{\lambda}_k - 0.2) + \bar{\lambda}_k^2 \right] = 0.5 \left[1 + 0.49 (0.713 - 0.2) + 0.713^2 \right] = 0.8795 \\
\bar{\lambda}_k &= \sqrt{\frac{N_{pl,k}}{N_{ki,k}}} = \sqrt{\frac{6804,7 \text{ N}}{13\,397,9 \text{ N}}} = 0,713 \\
N_{ki,k} &= \sqrt{c_h E_s I_s} = \sqrt{83,51 \cdot 210\,000 \cdot 10,235} = 13\,397,9 \text{ N} \\
c_h &= (0.19 + 0.012 d) \rho_k^i \frac{90^\circ + \alpha_{f-v}^i}{180^\circ} = (0.19 + 0.012 d) 425 \frac{90 + 45}{180} = 83,51 \\
&\text{in cui si è preso il minore tra le due combinazioni di } \alpha_{f-v} \text{ e } \rho_k \\
E_s &= 210\,000 \text{ MPa} \\
I_s &= \frac{\pi d_1^4}{64} = \frac{\pi 3,8^4}{64} = 10,235 \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

3.1.2 Resistenze di progetto Rd del singolo connettore

$$F_{ax,Rd}^{acciaio} = \frac{F_{ax,Rk}^{acciaio}}{\gamma_{M2}} = \frac{6124,2 \text{ N}}{1.25} = 4899,4 \text{ N} \quad (3.6)$$

$$F_{ax,Rd}^{estr.1} = \frac{k_{mod} \cdot F_{ax,Rk}^{estr.1}}{\gamma_M} = \frac{0.9 \cdot 6246,4 \text{ N}}{1.5} = 3747,9 \text{ N} \quad (3.7)$$

$$F_{ax,Rd}^{estr.2} = \frac{k_{mod} \cdot F_{ax,Rk}^{estr.2}}{\gamma_M} = \frac{0.9 \cdot 5678,6 \text{ N}}{1.5} = 3407,1 \text{ N} \quad (3.8)$$

$$F_{ax,Rd}^{buck} = \frac{F_{ax,Rk}^{buck}}{\gamma_{M1}} = \frac{4877,8 \text{ N}}{1.05} = 4645,6 \text{ N} \quad (3.9)$$

La resistenza di progetto del singolo connettore vale, per la sollecitazione di trazione:

$$F_{ax,Rd,traz}^{connettore} = \min[\text{eqq. (3.6), (3.7), (3.8)}] = 3407,1 \text{ N}; \quad (3.10)$$

mentre per quella di compressione:

$$F_{ax,Rd,comp}^{connettore} = \min[\text{eqq. (3.7), (3.8), (3.9)}] = 3407,1 \text{ N}. \quad (3.11)$$

3.1.3 Resistenza di progetto della connessione e verifica

Avendo una doppia vite le resistenze di progetto della connessione equivalgono alle resistenze della singola vite appena calcolate, moltiplicate per il numero efficace $n_{ef} = n^{0.9} = 1.87$.

Per la sollecitazione di trazione si ha

$$F_{ax,Rd,traz}^{connessione} = 6358,0 \text{ N} > F_{traz} = 5447,6 \text{ N}; \quad (3.12)$$

mentre per quella di compressione:

$$F_{ax,Rd,comp}^{connessione} = 6358,0 \text{ N} > F_{comp} = 5447,6 \text{ N} \quad (3.13)$$

Le verifiche sono pertanto soddisfatte

3.1.4 Distanze minime e distanze effettive

Secondo il paragrafo 8.7.2 le distanze minime devono essere almeno di:

$$a_1 = 7d = 42 \quad a_2 = 5d = 30 \quad a_{1,CG} = 10d = 60 \quad a_{2,CG} = 4d = 24 \text{ mm} \quad (3.14)$$

che sono ampiamente rispettate in quanto $a_{2,CG} + a_2 + a_2 + a_{2,CG} = 108 \text{ mm} < 160 \text{ mm}$