



# 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

<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>3</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>5</b>
1.1 Premessa . . . . .	5
<b>2 Verifica degli elementi</b>	<b>6</b>
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 . . . . .	7
2.2 Trave a doppia rastremazione . . . . .	8
2.2.1 Flessione – Sezione D . . . . .	9
2.2.2 Trazione perpendicolare – Sezione D . . . . .	9
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 . . . . .	14
2.3.4 Compressione perpendicolare appoggio . . . . .	15
2.3.5 Freccia . . . . .	15
<b>3 Verifica dei collegamenti</b>	<b>16</b>
3.1 Viti inclinate trave a doppia rastremazione e arcarecci . . . . .	16
3.1.1 Resistenze caratteristiche $R_k$ del singolo connettore . . . . .	16
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	Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per gli arcarecci . . . . .	6
2.2	Valori di progetto SLU la verifica della trave a doppia rastremazione . . . . .	6
2.3	Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per la trave a doppia rastremazione . . . . .	9
2.4	Valori di progetto per la verifica della trave a doppia rastremazione . . . . .	9
2.5	Azioni di progetto SLU nei punti di sezione indicati in figura per la trave del solaio . . . .	13
2.6	Valori di progetto per la verifica della trave a doppia rastremazione . . . . .	14
3.1	Valori di progetto della connessione tramite vite inclinate . . . . .	16

# Elenco delle figure

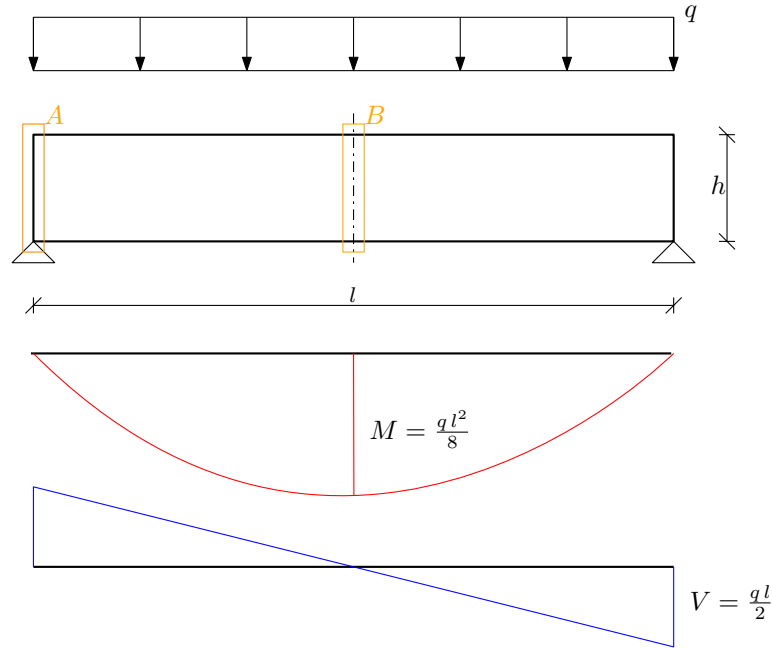
2.1	Indicazione della nomenclatura e dello schema statico adottato per gli arcarecci . . . . .	6
2.2	Indicazione della nomenclatura adottata per le zone di verifica lungo lo sviluppo della trave e delle condizioni di carico assunte per la trave a doppia rastremazione . . . . .	8
2.3	Indicazione della 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

# 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:** 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

**Tabella 2.2:** Valori di progetto SLU la verifica della trave a doppia rastremazione

Valori geometrici e coefficienti di esposizione o durata del carico					
$b$	160 mm	$h$	200 mm	$l$	5000 mm
$\gamma_M$	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

Sezione di verifica:  $160 \times 200$  mm

Classe di servizio 2:  $k_{mod} = 0.9$

disegno, momento, taglio, sezione, ecc

### 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 mezzzeria, pertanto è pari, avendo sezione rettangolare, a:

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

### 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 (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:

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

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

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

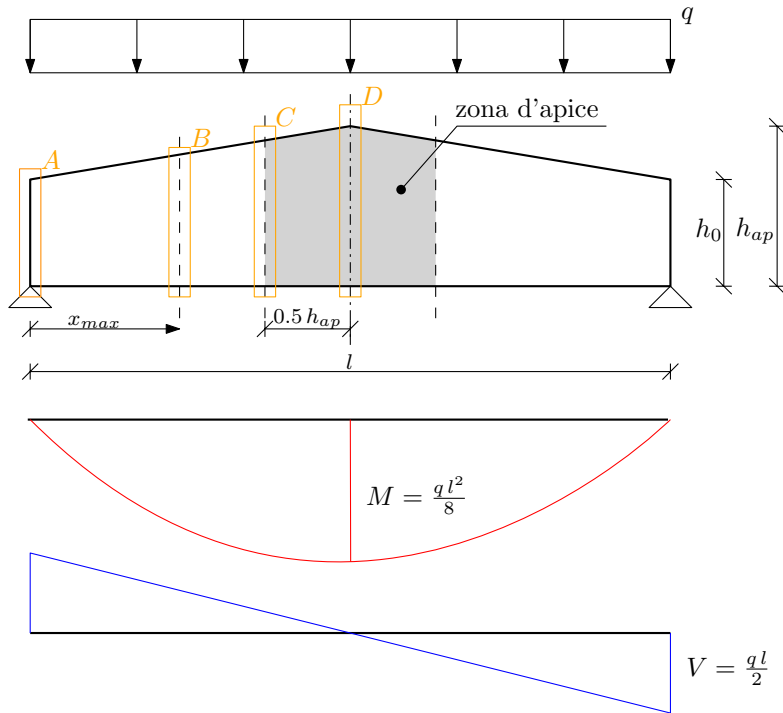
Con  $k_{def} = 0.6$ ,  $\psi_{21} = 0.0$ , in assenza di controfreccia iniziale e nelle ipotesi che gli elementi abbiano lo stesso comportamento viscoelastico, le deformazioni finali per i carichi agli SLE con combinazione rara assumono la forma semplificata:

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

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

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

## 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:** 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

**Tabella 2.4:** 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	$\alpha$	$3,5^\circ$
$h_0$	815 mm	$l$	16 000 mm	$\alpha_{ap}$	$3,5^\circ$
$\gamma_M$	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

In riferimento alla nomenclatura delle sezioni mostrata in figura 2.2 si riportano ora le verifiche svolte.

### 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:

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

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

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

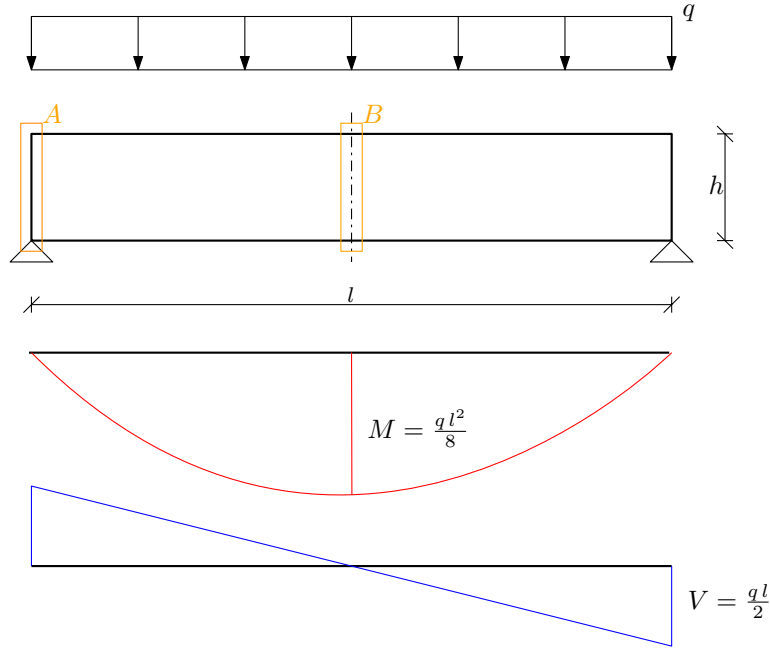
Con  $k_{def} = 0.6$ ,  $\psi_{21} = 0.0$ , in assenza di controfreccia iniziale e nelle ipotesi che gli elementi abbiano lo stesso comportamento viscoelastico, le deformazioni finali per i carichi agli SLE con combinazione rara assumono la forma semplificata:

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

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

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

## 2.3 Trave Solaio



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

**Tabella 2.5:** 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

**Tabella 2.6:** Valori di progetto per la verifica della trave a doppia rastremazione

Valori geometrici e coefficienti di esposizione o durata del carico					
$b$	200 mm	$h$	700 mm	$l$	7635 mm
$\gamma_M$	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

Sezione di verifica:  $200 \times 700$  mm

Classe di servizio 2:  $k_{mod} = 0.9$

disegno, momento, taglio, sezione, ecc

### 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

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

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 (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:

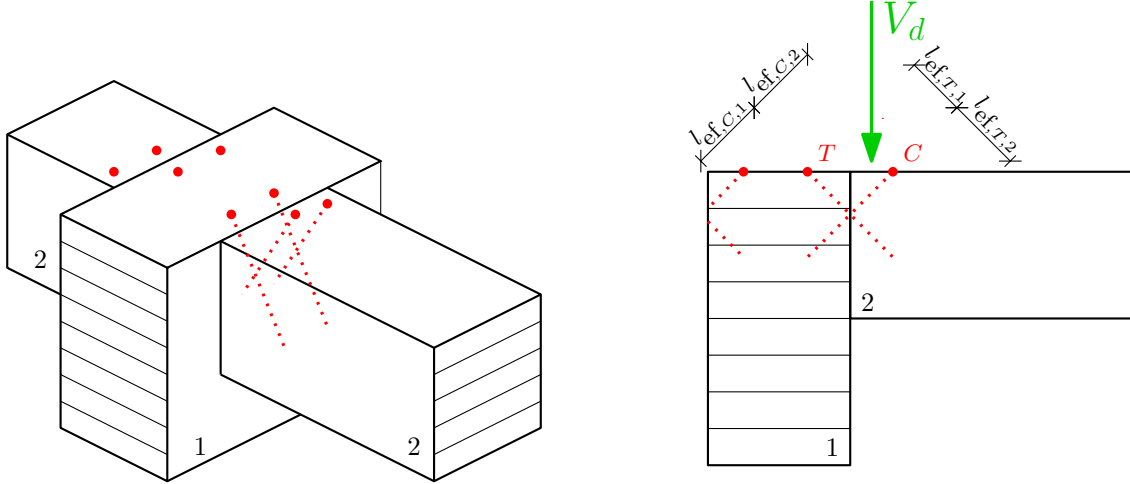
$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 17,73 \text{ mm} \quad (2.55)$$

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

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

# 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
$\rho_k^1$	425 kg m <sup>-3</sup>	$l_{ef}^1$	80 mm	$\alpha_{fibre-vite}^1$	90°
$\rho_k^2$	425 kg m <sup>-3</sup>	$l_{ef}^2$	80 mm	$\alpha_{fibre-vite}^2$	45°
$\gamma_M$	1,5	$k_{mod}$	0,9		
$\gamma_{M1}$	1,05	$\gamma_{M2}$	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

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

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.

### 3.1.1 Resistenze caratteristiche $R_k$ 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

$$\begin{aligned}
 f_{ax,k} &= 0,52 \cdot d^{-0.5} \cdot l_{ef}^{-0.1,i} \cdot \rho_k^{0.8,i} = 0,52 \cdot 6^{-0.5} \cdot 80^{-0.1} \cdot 425^{0.8} = 17,35 \text{ MPa} \\
 k_d &= \min \left( \frac{d}{8}; 1 \right) = \min \left( \frac{6}{8}; 1 \right) = 0.75 \\
 \alpha_{f-v} &= 90^\circ \quad \text{angolo tra la direzione delle fibre e la vite} \\
 n_{ef} &= n^{0.9} = 1
 \end{aligned}$$

## 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

$$\begin{aligned}
 f_{ax,k} &= 0,52 \cdot d^{-0.5} \cdot l_{ef}^{-0.1,i} \cdot \rho_k^{0.8,i} = 0,52 \cdot 6^{-0.5} \cdot 80^{-0.1} \cdot 425^{0.8} = 17,35 \text{ MPa} \\
 k_d &= \min \left( \frac{d}{8}; 1 \right) = \min \left( \frac{6}{8}; 1 \right) = 0.75 \\
 \alpha_{f-v} &= 45^\circ \\
 n_{ef} &= n^{0.9} = 1
 \end{aligned}$$

## Instabilità

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

dove

$$\begin{aligned}
 k_c &= \begin{cases} 1 & \text{se } \bar{\lambda}_k \leq 0.2 \\ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_k^2}} & \text{se } \bar{\lambda}_k > 0.2 \end{cases} = 0,717 \\
 N_{pl,k} &= \frac{\pi d_1^2}{4} f_{y,k} = \frac{\pi (3,8 \text{ mm})^2}{4} 600 \text{ MPa} = 6804,7 \text{ N}
 \end{aligned}$$

in cui

$$\begin{aligned}
 k &= 0.5 \left[ 1 + 0.49 (\bar{\lambda}_k - 0.2) + \bar{\lambda}_k^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.49 (0.713 - 0.2) + 0.713^2 \right] = 0,8795 \\
 \bar{\lambda}_k &= \sqrt{\frac{N_{pl,k}}{N_{ki,k}}} = \sqrt{\frac{6804,7 \text{ N}}{13\,397,9 \text{ N}}} = 0,713 \\
 N_{ki,k} &= \sqrt{c_h E_s I_s} = \sqrt{83,51 \cdot 210\,000 \cdot 10,235} = 13\,397,9 \text{ N} \\
 c_h &= (0.19 + 0.012 d) \rho_k^i \frac{90^\circ + \alpha_{f-v}^i}{180^\circ} = (0.19 + 0.012 d) 425 \frac{90 + 45}{180} = 83,51 \\
 &\quad \text{in cui si è preso il minore tra le due combinazioni di } \alpha_{f-v} \text{ e } \rho_k \\
 E_s &= 210\,000 \text{ MPa} \\
 I_s &= \frac{\pi d_1^4}{64} = \frac{\pi 3,8^4}{64} = 10,235 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

### 3.1.2 Resistenze di progetto $R_d$ 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