Dispensa ad uso interno per gli Studenti del corso di Costruzioni in Legno
A.A. 20010/11 - Facoltà di Ingengeria - Università di Firenze

ESEMPIO DI CALCOLO DI UNA STRUTTURA IN LEGNO SECONDO IL D.M. 14/01/2008

Ing. Marco Pio Lauriola

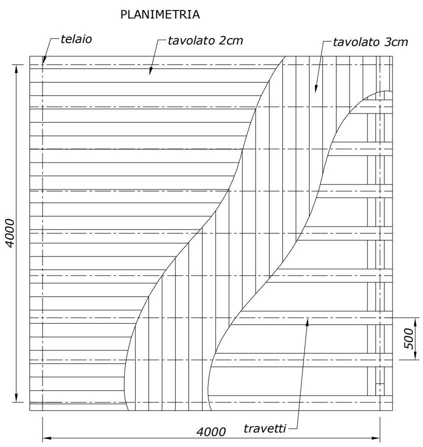
Giugno 2011

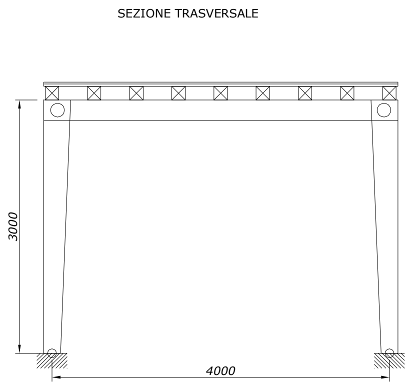
Consideriamo la realizzazione di un piano soppalco interno a un capannone industriale con destinazione d'uso a uffici non aperti al pubblico.

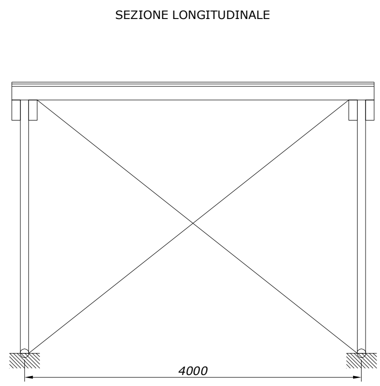
La struttura è composta da due telai posti ad una distanza di 4m e da un solaio realizzato con travetti semplicemente appoggiati sugli stessi e da un tavolato doppio (3+2 cm).

Il materiale utilizzato è legno lamellare incollato di classe GL24h e il fabbricato è collocato a Avellino in Corso Europa 8.

Per semplicità non verranno distinti i carichi permanenti strutturali e non strutturali, si farà riferimento quindi ad un solo γ_g che sarà posto pari a 1.4







Analisi dei carichi

- Carico permanente portato (sovrastruttura): $g_{k,sov} = 4.5x(0.03+0.02) = 0.23$ kN/m^2
- Carico accidentale di esercizio: q_k=2.0 kN/m^2 ψ_{2i}=0.3 coefficiente di combinazione
- Azione sismica:
  lon: 14.789755°
  lat: 40.913047°
  Classe d'uso II coefficiente d'uso: c_u=1
  Vita nominale V_N=50 anni
  periodo di riferimento dell'azione sismica: $V_R=V_N x c_u$=50 anni
  Categoria di sottosuolo: C
  Categoria topografica: T1
  Coefficiente di struttura: q = 2.5 vale per entrambe le direzioni principali in pianta x,y.
  L'edificio è regolare sia in piante che in altezza, non si applica quindi nessuna

riduzione del coefficiente di struttura.
Stato limite di salvaguardia della vita

a_g= 0.195g	S=1.422
F_0= 2.372	h=0.4
T_c*=0.368 s	T_B=0.179 s
S_s=1.422	T_C=0.537s
C_c=1.461	T_D=2.381s
S_T=1	

Verifiche

Verifica travicelli

Travetti solaio 160x160 L.L GL24h
luce: l=4m
interasse: i=0.5m
$g_{k,tv}$= 4.5x0.16x0.16=0.12 kN/m peso proprio travetti

Combinazione di carico di media durata (con carico d'esercizio):
Classe di servizio 1, k_{mod} = 0.8; k_{def} = 0.6

Combinazione di carico permanente (solo carichi permanenti):
Classe di servizio 1, k_{mod} = 0.6

Coefficiente parziale di sicurezza: γ_m = 1.45

Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo - combinazione di media durata

$q_p = g_{k,sov} \cdot i + g_{k,tv} = 0.23 \cdot 0.5 + 0.12$ = 0.24kN/m carico permanente

$q_a = q_k \cdot i = 2.0 \cdot 0.5$ = 1.00kN/m carico accidentale

$$q_{slu} = \gamma_g \cdot q_p + \gamma_q \cdot q_a = 1.4 \cdot 0.24 + 1.5 \cdot 1.00 = 1.84\,kN/m$$

Verifica a flessione:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0.8 \cdot \frac{24}{1.45} = 13.24\,N/mm^2$$ resistenza di progetto a flessione

$$M_{max} = q_{slu} \cdot \frac{l^2}{8} = 1.84 \cdot \frac{4^2}{8} = 3.66\,kNm$$ massimo momento sollecitante

$$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot M_{max}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot 3.66}{160 \cdot 160^2} = 5.36\,N/mm^2 < f_{md}$$ *verificato*

Verifica a taglio

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 0.8 \cdot \frac{2.7}{1.45} = 1.49\,N/mm^2$$ resistenza di progetto a taglio

$$T_{max} = q_{slu} \cdot \frac{l}{2} = 1.84 \cdot \frac{4}{2} = 3.66\,kN$$ massimo taglio sollecitante

$$\tau_{max} = 1.5 \cdot \frac{T_{max}}{b \cdot h} = 1.5 \frac{3.66}{160 \cdot 160} = 0.21\,N/mm^2 < f_{v,d}$$ *verificato*

Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo per carichi permanenti

$$q_{slu} = \gamma_g \cdot q_p = 1.4 \cdot 0.24 = 0.34\,kN/m$$

Verifica a flessione:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0.6 \cdot \frac{24}{1.45} = 9.93\,N/mm^2$$ resistenza di progetto a flessione

$$M_{max} = q_{slu} \cdot \frac{l^2}{8} = 0.34 \cdot \frac{4^2}{8} = 0.66\,kNm$$ massimo momento sollecitante

$$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot M_{max}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot 0.68}{160 \cdot 160^2} = 1.00\,N/mm^2 < f_{m,d}$$ *verificato*

Verifica a taglio:

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 0.6 \cdot \frac{2.7}{1.45} = 1.12\,N/mm^2$$ resistenza di progetto a taglio

$$T_{max} = q_{slu} \cdot \frac{l}{2} = 0.34 \cdot \frac{4}{2} = 0.68\,kN$$ massimo taglio sollecitante

$$\tau_{max} = 1.5 \cdot \frac{T_{max}}{b \cdot h} = 1.5 \frac{0.68}{160 \cdot 160} = 0.04\,N/mm^2 < f_{v,d}$$ *verificato*

Verifiche di deformabilità allo Stato Limite di Esercizio

t=0; f_{amm} = l/500 = 4000/500 = 8.0mm
t=inf; f_{amm} = l/350 = 4000/350 = 11.4mm

La freccia si calcola utilizzando la combinazione di carico rara, tuttavia bisogna distinguere il contributo deformativo dato dai carichi permanenti e quasi permanenti $g_k + \psi_2\, q_k$ (combinazione quasi permanente) che è soggetto ad incremento per deformazioni viscose, dal contributo dei carichi che agiscono per breve periodo $(1- \psi_2)q_k$ che non è soggetto ad incremento viscoso.

combinazione rara $q = q_p + q_a \; = \; q_p + \psi_{2i} \cdot q_a + (1 - \psi_{2i}) \cdot q_a$
ponendo q_{qp} = $q_p + \psi_{2i} \cdot q_a$ = $0.24 + 0.3 \cdot 1.00$ = 0.54kN/m
e q_{br} = $(1 - \psi_{2i}) \cdot q_a$ = $(1 - 0.3) \cdot 1.00$ = 0.70kN/m si ha:
combinazione rara q = q_{qp}+ q_{br} = 0.54+0.70 = 1.24 kN/m

Verifica a tempo zero:

$$f_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{12 \cdot q \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot b \cdot h^3} + \chi \cdot \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot b \cdot h}$$

$$= \frac{5}{384} \cdot \frac{12 \cdot 1.24 \cdot 4000^4}{11600 \cdot 160 \cdot 160^3} + 1.2 \cdot \frac{1.24 \cdot 4000^2}{8 \cdot 720 \cdot 160 \cdot 160} = 6.52 + 0.16 = 6.68mm < f_{amm}$$ *verificato*

Verifica a tempo infinito:

$$f_{inf} = \left(\frac{5}{384}\cdot\frac{12\cdot q_{qp}\cdot l^4}{E_{0,mean}\cdot b\cdot h^3}+\chi\cdot\frac{q_{qp}\cdot l^2}{8\cdot G_{mean}\cdot b\cdot h}\right)\cdot(1+K_{def}) \quad +$$

$$\left(\frac{5}{384}\cdot\frac{12\cdot q_{br}\cdot l^4}{E_{0,mean}\cdot b\cdot h^3}+\chi\cdot\frac{q_{br}\cdot l^2}{8\cdot G_{mean}\cdot b\cdot h}\right) \quad =$$

$$\left\{\frac{5}{384}\cdot\frac{12\cdot l^4}{E_{0,mean}\cdot b\cdot h^3}+\chi\cdot\frac{l^2}{8\cdot G_{mean}\cdot b\cdot h}\right\}\cdot\left\{q_p\cdot(1+K_{def})+q_a\cdot(1+\psi_2\cdot K_{def})\right\}$$

$$= \left\{\frac{5}{384}\cdot\frac{12\cdot 4000^4}{11600\cdot 160\cdot 160^3}+1.2\cdot\frac{4000^2}{8\cdot 720\cdot 160\cdot 160}\right\}\cdot\left\{0.24\cdot(1+0.6)+1.00\cdot(1+0.3\cdot 0.6)\right\}$$

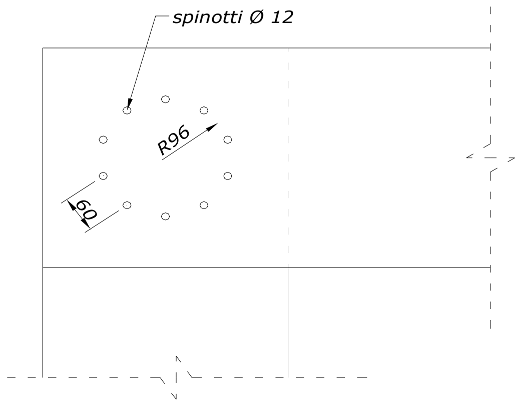
$$= 8.23+0.20=8.43\text{mm} \quad < f_{amm}$$ *verificato*

Sezione trasversale: telai - verifica statica

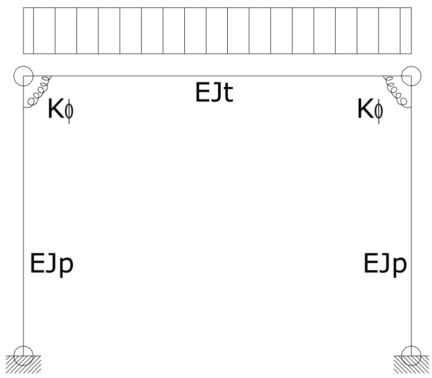
Il telaio è composto da pilastri con sezione 100x360 e travi formate da due profili accoppiati 100x360.

La larghezza di influenza di ciascun telaio è i_T=2m e la luce è L=4m.

Il giunto trave pilastro è realizzato con 10 spinotti Φ 12 di acciaio S235 (f_u =360N/mm^2) posti su una circonferenza di raggio 96mm a spaziatura 60mm; sono presenti due sezioni di taglio per ogni spinotto.



Per la soluzione dei telaio è necessario considerare la reale deformabilità dei giunti; ci si riconduce dunque ad uno schema tipo quello riportato in figura:



$g_{k,tr}$ = 2x(4.5x0.10x0.36)=0.32 kN/m peso proprio trave

Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo

$q_p = \{g_{k,sov}+g_{k,tv}/i_{tv}\}\cdot i+g_{k,tr} = \{0.23+0.12/0.5\}\cdot 2.00+0.32$ =1.26kN/m carico permanente

$q_a = q_k\cdot i = 2.00\cdot 2.00$ = 4.00kN/m carico accidentale

$$q_{slu}=\gamma_g\cdot q_p+\gamma_q\cdot q_a=1.4\cdot 1.26+1.5\cdot 4.00=7.76\,\text{kN/m}$$

Fase 1: nodi resi rigidi dall'introduzione di vincoli ausiliari

$$M(I)=\frac{q_{slu}\cdot L^2}{12}=\frac{7.76\cdot 4^2}{12}=10.35\,\text{kNm}$$ momento di incastro perfetto

Fase 2: applicazione del momento di incastro cambiato di segno e ripartizione in base alla rigidezza degli elementi.

$$k_{ser} = \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d}{23} = \frac{420^{1.5} \cdot 12}{23} = 4491\,N/mm$$

$$k_u = \frac{2}{3} \cdot k_{ser} = \frac{2}{3} \cdot 4491 = 2994\,N/mm$$

Per una rotazione ϕ del giunto, gli spostamenti in direzione tangente alla circonferenza sono:

$$u_i = \phi \times r$$

a cui corrispondono le forze:

$$F_i = k_u \times u_i = k_u \times \phi \times r$$

Il momento corrispondente alla rotazione ϕ vale:

$$M_\phi = 2 \cdot n \cdot F_i \cdot r = 2 \cdot n \cdot k_u \cdot \phi \cdot r^2 = 2 \cdot 10 \cdot 2994 \cdot \phi \cdot 96^2$$

Dunque la rigidezza alla rotazione del giunto è:

$$K_{\phi,u} = M_\phi / \phi = 2 \cdot n \cdot k_u \cdot r^2 = 2 \cdot 10 \cdot 2994 \cdot 96^2 = 0.552 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

Bisogna considerare gli effetti della viscosità riducendo le caratteristiche elastiche nel seguente modo:

$$E_{0,fin} = \frac{E_0}{1 + \Psi_2 \cdot k_{def}} = \frac{11600}{1 + 0.3 \cdot 0.6} = 9831\,N/mm^2$$

$$K_{\phi,u,fin} = \frac{K_{\phi,u}}{1 + \Psi_2 \cdot k_{def}} = \frac{0.552 \cdot 10^9}{1 + 0.3 \cdot 2 \cdot 0.6} = 0.406 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

Si considera che il pilastri e il giunto lavorino in serie; si ricava dunque una rigidezza equivalente da assegnare al pilastro che entrerà in gioco nella ripartizione del momento di incastro:

$$R_p = \frac{3 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{3 \cdot 9831 \cdot \frac{100 \cdot 360^3}{12}}{3000} = 3.82 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

$$R_{p,eq} = \frac{1}{\frac{l_p}{3 \cdot E \cdot J} + \frac{1}{K_{\phi,u}}} = \frac{1}{\frac{1}{3.82 \cdot 10^9} + \frac{1}{0.406 \cdot 10^9}} = 0.367 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

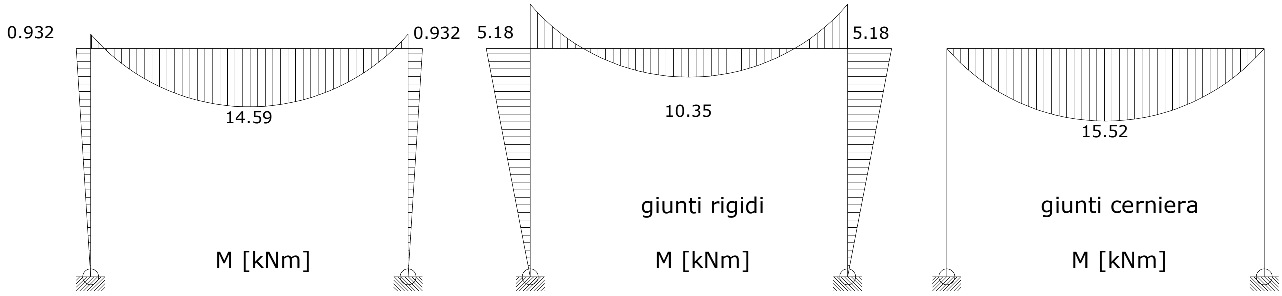
$$R_t = \frac{2 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{2 \cdot 9831 \cdot \frac{200 \cdot 360^3}{12}}{4000} = 3.82 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

Coefficienti di ripartizione:

$r_{p,eq}$ = 0.367/(0.367+3.82) = 0.09
r_t = 3.82/(0.367+3.82) = 0.91
M_p = M(I)x$r_{p,eq}$ = 10.35x0.09= 0.932kN/m

M_t = M(I)xr_t = 10.35x0.91 = 9.42kN/m

$M_{max,t}$ = $\frac{q_{slu} \cdot L^2}{24} + M_t = \frac{7.76 \cdot 4^2}{24} + 9.42 = 5.17 + 9.42 = 14.59\,\text{kNm}$ [1]



Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo trave - combinazione di media durata

Verifica a flessione:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0.8 \cdot \frac{24}{1.45} = 13.24\,\text{N/mm}^2$$ resistenza di progetto a flessione

$$\sigma_{max,t} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot M_{max}}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 14.59 \cdot 10^6}{200 \cdot 360^2} = 3.38\,\text{N/mm}^2 < f_{m,d}$$ *verificato*

Verifica a taglio

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 0.8 \cdot \frac{2.7}{1.45} = 1.49\,\text{N/mm}^2$$ resistenza di progetto a taglio

$$T_{max} = q_{slu} \cdot \frac{L}{2} = 7.76 \cdot \frac{4}{2} = 15.52\,\text{kN}$$ massimo taglio sollecitante

$$\tau_{max} = 1.5 \frac{T_{max}}{b \cdot h} = 1.5 \frac{15.52 \cdot 10^3}{200 \cdot 360} = 0.32\,\text{N/mm}^2 < f_{vd}$$ *verificato*

Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo unione - combinazione di media durata

La resistenza a taglio della singola sezione resistente è:

$M_{y,Rk}$ = 0,3x$f_{u,k}$x$\phi^{2.6}$ = 0.3x360x$12^{2.6}$ = 69071Nmm
$f_{h,1,k}$ = $f_{h,0,k}$ = 0.082x(1-0.01xϕ)xρ_k = 0.082x(1-0.01x12)x380 = 27.4N/mm^2
$f_{h,2,k}$ = $f_{h,90,k}$ = $f_{h,0,k}$/(1.35+0.015xϕ) = 27.4/(1.35+0.015x12) = 17.9N/mm^2

---

1 Se avessimo considerato la connessione infinitamente rigida allora avremmo avuto:

r_p = r_t = 3.82/(3.82+3.82) = 0.50
M_p = M_t = M(I)xr_p = 10.35x0.50 = 5.18kN/m

$M_{max,t}$ = $\frac{q_{slu} \cdot L^2}{24} + M_t = \frac{7.76 \cdot 4^2}{24} + 5.18 = 5.17 + 5.18 = 10.35\text{kNm}$

Il momento di trave appoggiata è $M_{max,t}$ = $\frac{q_{slu} \cdot L^2}{8}$ = 15.52kNm

quindi il comportamento del giunto è più vicino alla cerniera che all'incastro.

$\beta = f_{h,2,k}/f_{h,1,k} = 17.9/27.4 = 0.653$

Si omette il calcolo di tutti i modi di rottura, nel caso specifico il modo di rottura è "k"

$$F_{v,Rk} = 1.15\cdot\sqrt{2\frac{\beta}{1+\beta}}\cdot\sqrt{2\cdot M_{y,Rk}\cdot f_{h,1,k}\cdot\phi}$$

$$= 1.15\cdot\sqrt{2\cdot\frac{0.653}{1+0.653}}\cdot\sqrt{2\cdot 69071\cdot 27.4\cdot 12} = 6894\text{N}$$

considerando due spinotti allineati $n_{ef}=n^{0.9}\sqrt[4]{\frac{a_1}{13\cdot\phi}}=2^{0.9}\cdot\sqrt[4]{\frac{60}{13\cdot 12}}=1.470$

$n_{ef}/n = 1.470/2 = 0.735$

$$F_{v,Rd} = n_{ef}/n\cdot\frac{k_{mod}\cdot F_{v,Rk}}{\gamma_m}=0.735\cdot\frac{0.8\cdot 6894}{1.5}=2703\text{N}$$

Lo sforzo allo SLU sulla singola sezione resistente è:

$$F_{v,d} = \frac{M_p}{2\cdot n\cdot r}+\frac{T}{2\cdot n}=\frac{0.932\cdot 10^6}{2\cdot 10\cdot 96}+\frac{15.52\cdot 10^3}{2\cdot 10}=485+776=1261\text{N}<F_{v,r,d} \qquad \textit{verificato}$$

Le verifiche di resistenza allo SLU andrebbero ripetute anche per la combinazione di carico permanente.

Verifiche di deformabilità allo Stato Limite di Esercizio

t=0; f_{amm} = l/500 = 4000/500 = 8.0mm
t=inf; f_{amm} = l/350 = 4000/350 = 11.4mm

La freccia si calcola utilizzando la combinazione di carico rara, tuttavia bisogna distinguere il contributo deformativo dato dai carichi permanenti e quasi permanenti $g_k + \psi_2\, q_k$ (combinazione quasi permanente) che è soggetto ad incremento per deformazioni viscose, dal contributo dei carichi che agiscono per breve periodo (1- ψ_2)q_k che non è soggetto ad incremento viscoso.

combinazione rara $q=q_p+q_a$ = 5.26kN/m

Verifica a tempo zero:

Fase 1: nodi resi rigidi dall'introduzione di vincoli ausiliari

$$M(l)=\frac{q_{sle}\cdot L^2}{12}=\frac{5.26\cdot 4^2}{12}=7.01\,\text{kNm} \qquad \text{momento di incastro perfetto}$$

Fase 2: applicazione del momento di incastro cambiato di segno e ripartizione in base alla rigidezza degli elementi.

Nel calcolo allo SLE bisogna ricalcolare il portale considerando il k_{ser} delle connessioni, pertanto:

$$K_{\phi,ser}=2\cdot n\cdot k_{ser}\cdot r^2=2\cdot 10\cdot 4491\cdot 96^2=0.828\cdot 10^9\,\text{Nmm/rad}$$

Si considera che il pilastri e il giunto lavorino in serie; si ricava dunque una rigidezza equivalente da assegnare al pilastro che entrerà in gioco nella ripartizione del momento di incastro:

$$R_p = \frac{3 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{3 \cdot 11600 \cdot \frac{100 \cdot 360^3}{12}}{3000} = 4.51 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

$$R_{p,eq} = \frac{1}{\frac{l_p}{3 \cdot E \cdot J} + \frac{1}{K_{\phi,ser}}} = \frac{1}{\frac{1}{4.51 \cdot 10^9} + \frac{1}{0.828 \cdot 10^9}} = 0.700 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

$$R_t = \frac{2 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{2 \cdot 11600 \cdot \frac{200 \cdot 360^3}{12}}{4000} = 4.51 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

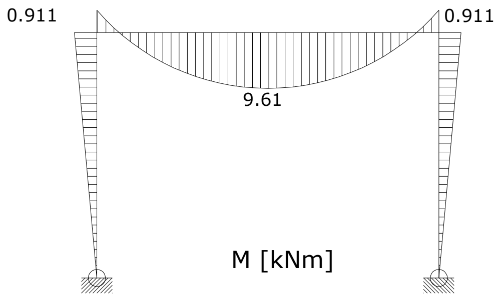
Coefficienti di ripartizione:

$r_{p,eq}$ = 0.700/(0.700+4.51) = 0.13
r_t = 4.51/(0.700+4.51) = 0.87

M_p = M(I)x$r_{p,eq}$ = 7.01x0.13 = 0.91kN/m

M_t = M(I)xr_t = 7.01x0.87 = 6.10kN/m

$M_{max,t}$ = $\frac{q_{sle} \cdot L^2}{24} + M_t = \frac{5.26 \cdot 4^2}{24} + 6.10 = 3.51 + 6.10 = 9.61 \, kNm$



$$f_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{12 \cdot q \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot b \cdot h^3} - M_p \frac{12 \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot b \cdot h^3} + \chi \cdot \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot b \cdot h}$$

$$= \frac{5}{384} \cdot \frac{12 \cdot 5.26 \cdot 4000^4}{11600 \cdot 200 \cdot 360^3} - 0.91 \cdot 10^6 \cdot \frac{12 \cdot 4000^2}{8 \cdot 11600 \cdot 200 \cdot 360^3} + 1.2 \cdot \frac{5.26 \cdot 4000^2}{8 \cdot 720 \cdot 200 \cdot 360}$$

= 1.94 - 0.20 + 0.24 = 2.38mm < f_{amm} *verificato*

Verifica a tempo infinito:

Nella fase 2 si considerano i valori delle caratteristiche elastiche ridotte dal k_{def}
Bisogna considerare gli effetti della viscosità riducendo le caratteristiche elastiche nel seguente modo:

$$E_{0,fin} = \frac{E_0}{1 + k_{def}} = \frac{11600}{1 + 0.6} = 7250 N/mm^2$$

$$G_{fin} = \frac{G}{1 + k_{def}} = \frac{720}{1 + 0.6} = 450 N/mm^2$$

$$K_{\phi,ser,fin} = \frac{K_{\phi,ser}}{1+k_{def}} = \frac{0.828 \cdot 10^9}{1+2 \cdot 0.6} = 0.376 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

Si considera che il pilastri e il giunto lavorino in serie; si ricava dunque una rigidezza equivalente da assegnare al pilastro che entrerà in gioco nella ripartizione del momento di incastro:

$$R_p = \frac{3 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{3 \cdot 7250 \cdot \frac{100 \cdot 360^3}{12}}{3000} = 2.82 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

$$R_{p,eq} = \frac{1}{\frac{l_p}{3 \cdot E \cdot J} + \frac{1}{K_{\phi,ser}}} = \frac{1}{\frac{1}{2.82 \cdot 10^9} + \frac{1}{0.376 \cdot 10^9}} = 0.332 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

$$R_t = \frac{2 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{2 \cdot 7250 \cdot \frac{200 \cdot 360^3}{12}}{4000} = 2.82 \cdot 10^9 \, Nmm/rad$$

Coefficienti di ripartizione:

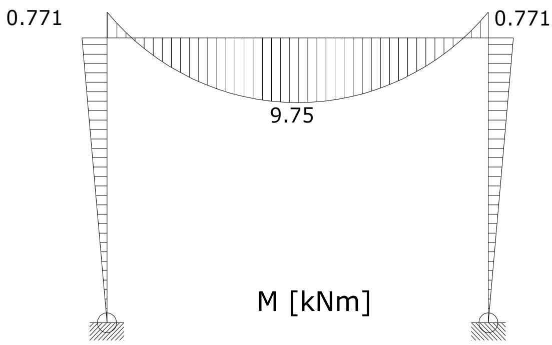
$r_{p,eq}$ = 0.332/(0.332+2.82) = 0.11

r_t = 2.82/(0.332+2.82) = 0.89

M_p = M(I)x$r_{p,eq}$ = 7.01x0.11= 0.771kN/m

M_t = M(I)xr_t = 7.01x0.89 = 6.24kN/m

$$M_{max,t} = \frac{q_{sle} \cdot L^2}{24} + M_t = \frac{5.26 \cdot 4^2}{24} + 6.24 = 3.51 + 6.24 = 9.75 \, kNm$$



$$f_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{12 \cdot q \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot b \cdot h^3} - M_p \frac{12 \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot b \cdot h^3} + \chi \cdot \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot b \cdot h}$$

$$= \frac{5}{384} \cdot \frac{12 \cdot 5.26 \cdot 4000^4}{7250 \cdot 200 \cdot 360^3} - 0.771 \cdot 10^6 \cdot \frac{12 \cdot 4000^2}{8 \cdot 7250 \cdot 200 \cdot 360^3} + 1.2 \cdot \frac{5.26 \cdot 4000^2}{8 \cdot 450 \cdot 200 \cdot 360}$$

= 3.11 - 0.27 + 0.39 = 3.77mm < f_{amm} *verificato*

Sezione trasversale: telai - verifica sismica

Non effettuando il calcolo del periodo proprio, si assume l'ordinata massima dello spettro di progetto pari a $S_e = a_g \times S = 0.195g \times 1.422 = 0.278g$

La massa sismica dell'impalcato è:

peso pilastro $p_p = 4.5x0.10x0.36x3.00 = 0.49kN$

$$m_g = \{g_{k,sov} + g_{k,tv}/i_{tv} + g_{k,tr}/i_t\} \cdot l \cdot L + \frac{p_p \cdot 4}{2}$$

$$= \{0.23 + 0.12/0.5 + 0.32/2.0\} \cdot 4.00 \cdot 4.00 + \frac{0.49 \cdot 4}{2} = 11.1kN \qquad \text{carico permanente}$$

$$m_a = q_k \cdot l \cdot L = 2.00 \cdot 4.00 \cdot 4.00 = 32.0kN \qquad \text{carico accidentale}$$

$$m_{sis} = m_p + \psi_2 \cdot m_a = 11.1 + 0.3 \cdot 32.0 = 20.7kN$$

La forza sismica di piano vale $F_{sis} = 20.7x0.278 = 5.75$ kN

Lo sforzo su ciascun portale della coppia, considerando anche l'eccentricità accidentale del 5%, vale:

$$F = \frac{5.75}{2} x(1 + 2x0,05) = 3.17kN$$

Il momento massimo sul pilastro vale:

$M_{p,sis} = 3.17x3.00/2 = 4.76kNm$

A questo va aggiunto il momento derivante dal carico statico allo SLU sismico

$$q_p = \{g_{k,sov} + g_{k,tv}/i_{tv}\} \cdot i + g_{k,tr} = \{0.23 + 0.12/0.5\} \cdot 2.00 + 0.32 = 1.26kN/m \qquad \text{carico permanente}$$

$$q_a = q_k \cdot i = 2.00 \cdot 2.00 = 4.00kN/m \qquad \text{carico accidentale}$$

$$q_{slu,sis} = q_p + \psi_2 \cdot q_a = 1.26 + 0.3 \cdot 4.00 = 2.46\,kN/m$$

Fase 1: nodi resi rigidi dall'introduzione di vincoli ausiliari

$$M(I) = \frac{q_{slu} \cdot L^2}{12} = \frac{2.46 \cdot 4^2}{12} = 3.28\,kNm \qquad \text{momento di incastro perfetto}$$

Fase 2: applicazione del momento di incastro cambiato di segno e ripartizione in base alla rigidezza degli elementi.

Nel calcolo allo SLU bisogna ricalcolare il portale considerando il k_u delle connessioni, pertanto:

$$K_{\phi,u} = 0.552 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

Si considera che il pilastri e il giunto lavorino in serie; si ricava dunque una rigidezza equivalente da assegnare al pilastro che entrerà in gioco nella ripartizione del momento di incastro:

$$R_p = \frac{3 \cdot E \cdot J_p}{l_p} = \frac{3 \cdot 11600 \cdot \frac{100 \cdot 360^3}{12}}{3000} = 4.51 \cdot 10^9\,Nmm/rad$$

$$R_{p,eq}=\frac{1}{\frac{l_p}{3\cdot E\cdot J}+\frac{1}{K_{\phi,u}}}=\frac{1}{\frac{1}{4.51\cdot 10^9}+\frac{1}{0.552\cdot 10^9}}=0.492\cdot 10^9\,\mathrm{Nmm/rad}$$

$$R_t=\frac{2\cdot E\cdot J_p}{l_p}=\frac{2\cdot 11600\cdot\frac{200\cdot 360^3}{12}}{4000}=4.51\cdot 10^9\,\mathrm{Nmm/rad}$$

Coefficienti di ripartizione:

$r_{p,eq}$ = 0.492/(0.492+4.51) = 0.10
r_t = 4.51/(0.492+4.51) = 0.90

M_p = M(I)x$r_{p,eq}$ = 3.28x0.10 = 0.328kN/m

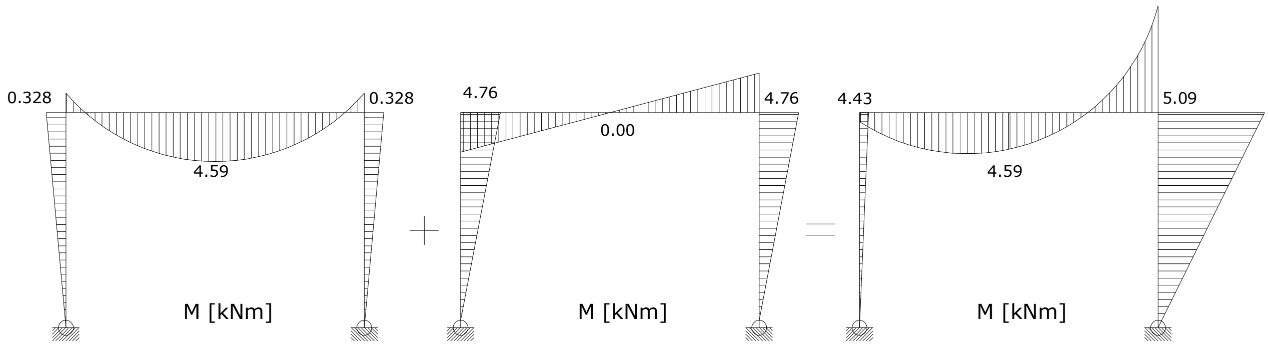
M_t = M(I)xr_t = 3.28x0.90 = 2.95kN/m

Sommando i due diagrammi:

$M_{max,t}$ = $\frac{q_{slu}\cdot L^2}{24}+M_t+0=\frac{2.46\cdot 4^2}{24}+2.95+0=1.64+2.95=4.59\,\mathrm{kNm}$ in mezzeria

$M_{max,t,dx}$ = M_p+ $M_{p,sis}$ = 0.328+4.76 = 5.09kNm

$M_{max,t,sx}$ = M_p - $M_{p,sis}$ = 0.328-4.76 = -4.43kNm



Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo trave - combinazione di media durata

Verifica a flessione:

$$f_{m,d}=k_{mod}\cdot\frac{f_{m,k}}{\gamma_m}=1.0\cdot\frac{24}{1.45}=16.55\,\mathrm{N/mm^2}$$ resistenza di progetto a flessione

$$\sigma_{max,t}=\frac{6\cdot 10^6\cdot M_{max}}{b\cdot h^2}=\frac{6\cdot 9.48\cdot 10^6}{200\cdot 360^2}=2.19\,\mathrm{N/mm^2}<f_{m,d}$$ *verificato*

Verifica a taglio

$$f_{v,d}=k_{mod}\cdot\frac{f_{v,k}}{\gamma_m}=1.0\cdot\frac{2.7}{1.45}=1.86\,\mathrm{N/mm^2}$$ resistenza di progetto a taglio

$$T_{max}=q_{slu}\cdot\frac{L}{2}=2.46\cdot\frac{4}{2}=4.92\,\mathrm{kN}$$ massimo taglio sollecitante

$$\tau_{max} = 1.5\frac{T_{max}}{b \cdot h} = 1.5\frac{4.92 \cdot 10^3}{200 \cdot 360} = 0.07\,N/mm^2 < f_{vd}$$ *verificato*

Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo unione - combinazione di media durata

La resistenza a taglio della singola sezione resistente è:

$$F_{v,Rd} = n_{ef}/n \cdot \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_m} = 0.735 \cdot \frac{1.0 \cdot 6894}{1.5} = 3378N$$

Nel calcolo dello sforzo sulla singola sezione resistente, a favore di sicurezza, si sommano i valori assoluti delle singole componenti, pertanto lo sforzo allo SLU sulla singola sezione resistente è:

T_p = F/2 = 3.17/2 0 1.59 kN   taglio sul pilastro

$$F_{v,d} = \frac{M_p}{2 \cdot n \cdot r} + \frac{T}{2 \cdot n} + \frac{T_p}{3 \cdot n} = \frac{0.328 \cdot 10^6}{2 \cdot 10 \cdot 96} + \frac{4.92 \cdot 10^3}{2 \cdot 10} + \frac{1.59 \cdot 10^3}{2 \cdot 10}$$

$$= 171 + 246 + 80 = 497N < F_{v,r,d}$$ *verificato*