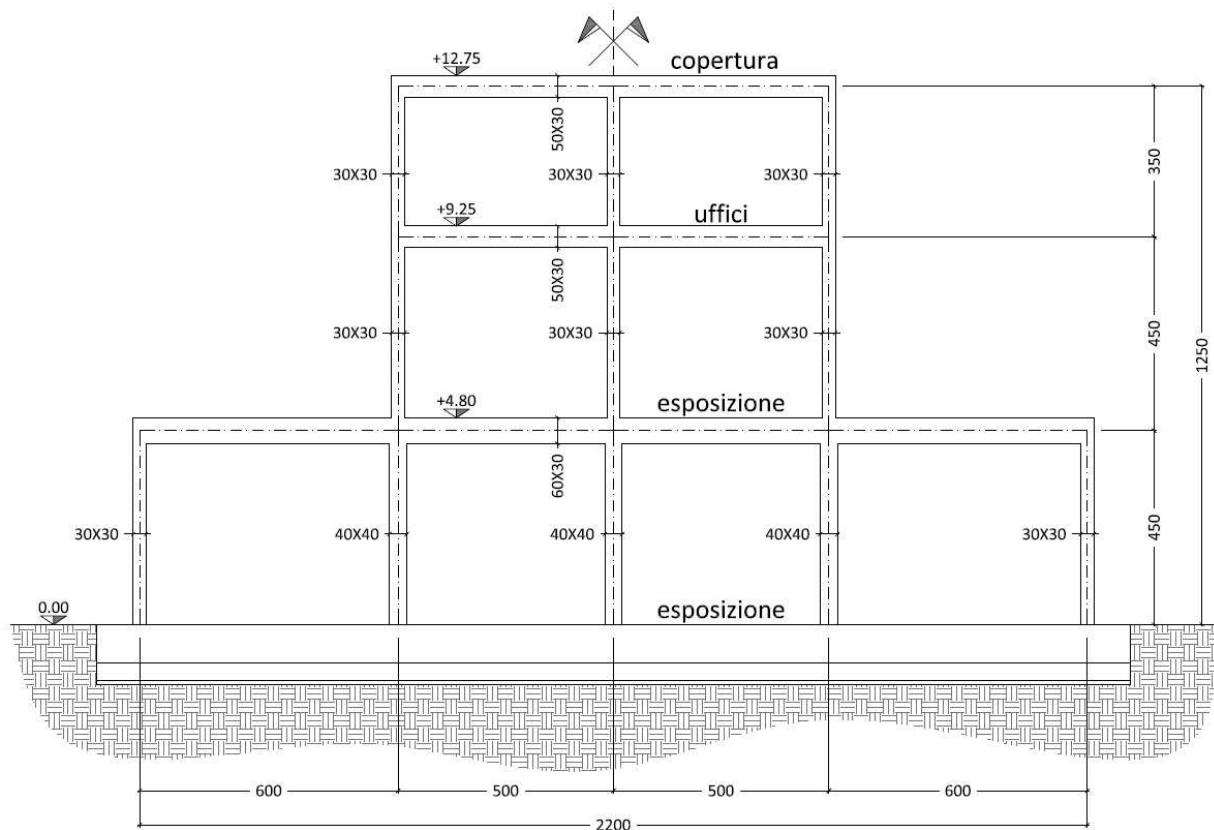


1. PREMESSA E PRESENTAZIONE DELLA STRUTTURA

L'oggetto dell'esercitazione è la progettazione strutturale di un edificio in cemento armato, sito in Lucca. La struttura è realizzata tramite la ripetizione, in numero di 5, con interasse 5 m, dello schema riportato in figura.



Si è scelto di modellare la struttura come un telaio a nodi spostabili incastrato alla base, affrontando poi lo studio dell'interazione struttura terreno in un secondo momento.

Si riportano nel seguito, a titolo di esempio, le verifiche di due tipologie di membrature.

2. VERIFICA SLU TRAVATA PIANO PRIMO

Facendo riferimento alla sezione in campata più sollecitata ($M_{Ed} = 247 \text{ kN} \cdot \text{m}$), imponiamo che la rottura avvenga in fase III, cioè che il calcestruzzo abbia raggiunto la deformazione ultima di rottura $\epsilon_{cu} = \epsilon_{cu} = 0.0035$ e l'armatura tesa abbia raggiunto una deformazione compresa tra il valore di snervamento e quello convenzionale di rottura $\epsilon_{yd} \leq \epsilon_s = 0.01$, ciò implica che la tensione nel cls è pari al suo valore di calcolo f_{cd} , e la tensione nell'armatura tesa è pari al suo valore di calcolo f_{yd} . Si ipotizza che anche l'armatura compressa abbia raggiunto lo snervamento.

Armatura	Ferri	A [mm ²]	f_{yd} [MPa]	f_{yk} [MPa]
superiore	2Ø20	628.32	373.92	430
inferiore	5Ø20	1570.80	373.92	430

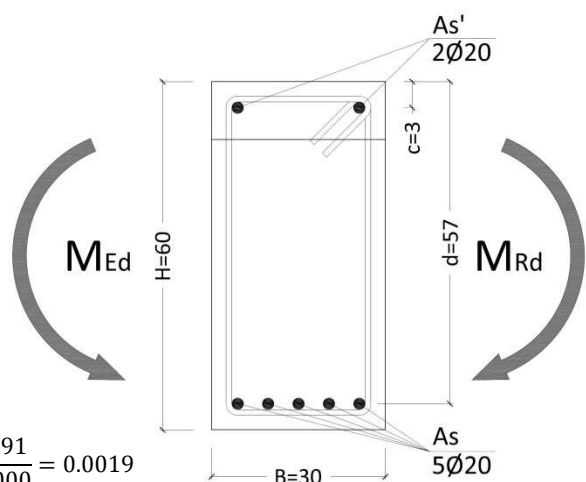
Equilibrio alla traslazione orizzontale

$$0.80 \cdot B \cdot y \cdot f_{cd} + A'_s \cdot f_{yd} - A_s \cdot f_{yd} = 0$$

$$\Rightarrow y = \frac{[A_s - A'_s] f_{yd}}{0.80 \cdot B \cdot f_{cd}} = \frac{[1570.80 - 628.32] 373.92}{0.80 \cdot 300 \cdot 14.11} = 104.07 \text{ mm}$$

Controllo deformazione armatura compressa

$$\epsilon'_s = \frac{y - c}{y} \cdot \epsilon_{cu} = \frac{104.07 - 30}{104.07} \cdot 0.0035 = 0.0025 \geq \epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{373.91}{200000} = 0.0019$$



L'armatura compressa è effettivamente snervata.

Calcolo del momento resistente

$$M_{Rd} = 0.80 \cdot B \cdot y \cdot f_{cd} \cdot (d - 0.4 \cdot y) + A'_s \cdot f_{yd} \cdot (d - c) \\ = 0.80 \cdot 300 \cdot 104.07 \cdot 14.11 \cdot (570 - 0.4 \cdot 104.07) + 628.33 \cdot 373.92 \cdot (570 - 30) = 313 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{247}{313} = 0.79 < 1$$

Verifica delle armature trasversali

Armatura	Ferri	As tr [mm ²]	A [mm ² /m]	V _{Ed} [kN]
mezzeria	Φ10/20	157.08	785.40	134
appoggi	Φ10/10	157.08	1570.80	292

$$\text{passo staffe} = 20 \text{ cm} < 0.8 \cdot H = 0.8 \cdot 60 = 48 \text{ cm}$$

$$g = \frac{1}{\text{passo}/100} = \frac{1}{20/100} = 5 \text{ staffe/m} > 3 \text{ staffe/m}$$

$$A_s = 785.40 \text{ mm}^2/\text{m} > A_{smin} = 1.5 \cdot B_{eff} = 1.5 \cdot 300 = 450 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Verifica in mezzeria

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot H \cdot \frac{A_{s tr}}{\text{passo}} \cdot f_{yd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sin \alpha = 0.9 \cdot 600 \cdot \frac{157.08}{200} \cdot 373.92 \cdot (\cot 90 + \cot 45) \cdot \sin 90 = 159 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot B \cdot H \cdot \alpha_c \cdot (0.5 \cdot f_{cd}) \cdot \frac{(\cot \alpha + \cot \theta)}{(1 + \cot^2 \theta)} = 0.9 \cdot 300 \cdot 600 \cdot 1.0114 \cdot (0.5 \cdot 14.11) \cdot \frac{(\cot 90 + \cot 45)}{(1 + \cot^2 45)} = 578 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rsd}; V_{Rcd}\} = \min\{159; 578\} = 159 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{134}{159} = 0.84 < 1$$

Verifica sugli appoggi

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot H \cdot \frac{A_{s tr}}{\text{passo}} \cdot f_{yd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sin \alpha = 0.9 \cdot 600 \cdot \frac{157.08}{100} \cdot 373.92 \cdot (\cot 90 + \cot 45) \cdot \sin 90 = 317 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot B \cdot H \cdot \alpha_c \cdot (0.5 \cdot f_{cd}) \cdot \frac{(\cot \alpha + \cot \theta)}{(1 + \cot^2 \theta)} = 0.9 \cdot 300 \cdot 600 \cdot 1.0114 \cdot (0.5 \cdot 14.11) \cdot \frac{(\cot 90 + \cot 45)}{(1 + \cot^2 45)} = 578 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rsd}; V_{Rcd}\} = \min\{317; 578\} = 317 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{292}{317} = 0.92 < 1$$

2. VERIFICA DEFORMABILITA' TRAVATA PIANO PRIMO

$$\lambda_{Ed} = \frac{l}{H} = \frac{600}{60} = 10$$

$k = 1.3$ (campata terminale di trave continua)

$$\rho = \frac{A_s}{B \cdot H} = \frac{1570.80}{300 \cdot 600} = 0.873\%$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{B \cdot H} = \frac{628.32}{300 \cdot 600} = 0.349\%$$

$$\lambda_{limite} = k \cdot \left[11 + \frac{0.0015 \cdot f_{ckmod}}{\rho + \rho_1} \right] \cdot \left[\frac{500 \cdot A_s}{f_{ykmod} \cdot (A'_s + A_s)} \right] = 1.3 \cdot \left[11 + \frac{0.0015 \cdot 24.9}{0.873\% + 0.349\%} \right] \cdot \left[\frac{500 \cdot 1570.80}{430 \cdot (628.32 + 1570.80)} \right] \\ = 15.18 > \lambda_{Ed}$$

3. VERIFICA FESSURAZIONE TRAVATA PIANO PRIMO (SLE)

$$M_{Ed\text{frequente}} = 133 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed\text{quasi permanente}} = 126 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y = \frac{n \cdot (A_s + A'_s)}{B} \left(-1 + \sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot \frac{A_s \cdot d + A'_s \cdot c}{n \cdot (A_s + A'_s)^2}} \right) = \frac{6.73 \cdot (1570.80 + 628.32)}{300} \left(-1 + \sqrt{1 + 2 \cdot 300 \cdot \frac{1570.80 \cdot 570 + 628.32 \cdot 30}{6.73 \cdot (1570.80 + 628.32)^2}} \right) = 159.12 \text{ mm}$$

$$z = d - \frac{y}{3} = 570 - \frac{159.12}{3} = 516.96 \text{ mm}$$

$$J_i = \frac{B \cdot y^3}{3} + n \cdot A_s \cdot (d - y)^2 + n \cdot A'_s \cdot (y - c)^2 = \frac{300 \cdot 159.12^3}{3} + 6.73 \cdot 1570.80 \cdot (570 - 159.12)^2 + 6.73 \cdot 628.32 \cdot (159.12 - 30)^2 = 2.26 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{s\text{frequente}} = n \cdot \frac{M_{Ed\text{frequente}} \cdot (d - y)}{J_i} = 6.73 \cdot \frac{133 \cdot 10^6 \cdot (570 - 159.12)}{2.26 \cdot 10^9} = 162.73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s\text{quasi permanente}} = n \cdot \frac{M_{Ed\text{quasi permanente}} \cdot (d - y)}{J_i} = 6.73 \cdot \frac{126 \cdot 10^6 \cdot (570 - 159.12)}{2.26 \cdot 10^9} = 154.17 \text{ MPa}$$

$$h_{eff} = \min \left\{ 2.5 \cdot (H - d); \frac{H}{2} \right\} = \min \left\{ 2.5 \cdot (600 - 570); \frac{600}{2} \right\} = 75 \text{ mm} \Rightarrow A_{c\text{eff}} = B \cdot h_{eff} = 300 \cdot 75 = 22500 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c\text{eff}}} = \frac{1570.80}{22500} = 0.0698$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sm\text{frequente}} &= \min \left\{ \frac{1}{E_s} \cdot \left[\sigma_{s\text{frequente}} - \frac{k_t \cdot f_{ctm}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + n \cdot \rho_{eff}) \right]; \frac{\sigma_{s\text{frequente}}}{E_s} \right\} = \\ &= \min \left\{ \frac{1}{210000} \cdot \left[162.73 - \frac{0.4 \cdot 2.5581}{0.0698} \cdot (1 + 6.73 \cdot 0.0698) \right]; \frac{162.73}{210000} \right\} = \min \{ 6.72 \cdot 10^{-4}; 7.74 \cdot 10^{-4} \} \\ &= 6.72 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sm\text{quasi permanente}} &= \min \left\{ \frac{1}{E_s} \cdot \left[\sigma_{s\text{quasi perm}} - \frac{k_t \cdot f_{ctm}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + n \cdot \rho_{eff}) \right]; \frac{\sigma_{s\text{quasi perm}}}{E_s} \right\} = \\ &= \min \left\{ \frac{1}{210000} \cdot \left[154.17 - \frac{0.4 \cdot 2.5581}{0.0698} \cdot (1 + 6.73 \cdot 0.0698) \right]; \frac{154.17}{210000} \right\} = \min \{ 6.32 \cdot 10^{-4}; 7.34 \cdot 10^{-4} \} \\ &= 6.32 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$k_1 = 0.8 \text{ (barre ad aderenza migliorata)}$$

$$k_2 = 0.5 \text{ (flessione semplice)}$$

$$k_3 = 3.4$$

$$k_4 = 0.425$$

$$\Phi_{eq} = \frac{(n_s \cdot \Phi_s^2) + (n'_s \cdot \Phi'_s{}^2)}{(n_s \cdot \Phi_s) + (n'_s \cdot \Phi'_s)} = \frac{(5 \cdot 20^2) + (2 \cdot 20^2)}{(5 \cdot 20) + (2 \cdot 20)} = 20 \text{ mm}$$

$$\Delta_{s\text{max}} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\Phi_{eq}}{\rho_{eff}} = 3.4 \cdot 30 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot \frac{20}{0.0698} = 150.71 \text{ mm}$$

$$w_{d\text{frequente}} = \Delta_{s\text{max}} \cdot \varepsilon_{sm\text{frequente}} = 150.71 \cdot 6.72 \cdot 10^{-4} = 0.101 \text{ mm} < w_2 = 0.3 \text{ mm}$$

$$w_{d\text{quasi permanente}} = \Delta_{s\text{max}} \cdot \varepsilon_{sm\text{quasi permanente}} = 150.71 \cdot 6.32 \cdot 10^{-4} = 0.095 \text{ mm} < w_3 = 0.4 \text{ mm}$$

4. DIMENSIONAMENTO SOLAIO PIANO PRIMO

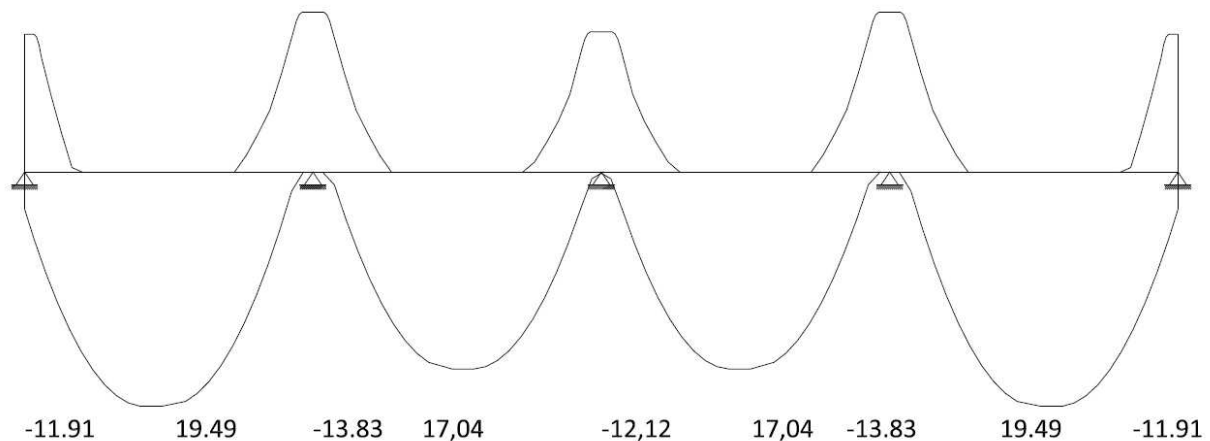
La tipologia di solaio adottata è quella di solaio misto in cemento armato gettato in opera e blocchi di alleggerimento in laterizio (pignatte). I principali requisiti di un solaio sono quelli di garantire un'ottima resistenza meccanica, con una modesta deformabilità a fronte di un minimo spessore e un peso ridotto.

I travetti a traliccio sono i travetti di uso più comune e sono composti da una piccola struttura reticolare spaziale con discrete capacità autoportanti. L'armatura di base non è stata considerata nel dimensionamento, perché formata da ferri di piccolo diametro. Un'ulteriore armatura, destinata ad assorbire i momenti flettenti positivi, verrà annegata nella suola del travetto, mentre per i momenti flettenti negativi, invece, deve essere posizionata in opera un'armatura poco prima del getto finale.

Si è scelto un solaio di spessore 24+4, con interasse tra travetti di 0.5 m.

La struttura è composta da 5 telai, posti ad interasse di 5 m. Appurato ciò, siamo passati all'analisi dei solai, orditi in direzione ortogonale ai telai stessi. Vista la geometria della struttura ogni solaio è stato studiato come una trave semplice su 5 appoggi, con gli appoggi di estremità analizzati, distintamente, come incastrati o incernierati. Il risultato è l'involuppo del momento flettente.

Sollecitazioni SLU - involuppo



luce solaio = 5 m

$$h_{\text{solaio}} = 24 + 4 = 28 \text{ cm} > h_{\text{min solaio}} = \frac{\text{luce solaio}}{25} = \frac{500}{25} = 20 \text{ cm}$$

$$A_{\text{travetto}} = b_{\text{trav}} \cdot h_{\text{trav}} = 120 \cdot 240 = 28800 \text{ mm}^2$$

Armatura	Ferri	A [mm ²]	f _{yd} [MPa]	f _{yk} [MPa]
superiore	1Φ16	201.06	373.92	430
inferiore	2Φ14	307.88	373.92	430

$$A_{s \text{ inf min}} = \max \left\{ 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot A_{\text{trav}}; 0.0013 \cdot A_{\text{trav}} \right\} =$$

$$= \max \left\{ 0.26 \cdot \frac{2.5581}{430} \cdot 28800; 0.0013 \cdot 28800 \right\} =$$

$$= \max \{ 44.55; 37.44 \} = 44.55 \text{ mm}^2 < A_{s \text{ inf}}$$

$$A_{s \text{ inf max}} = 0.04 \cdot A_{\text{trav}} = 0.04 \cdot 28800 = 1152 \text{ mm}^2 > A_{s \text{ tot}} = A_{s \text{ inf}} + A_{s \text{ sup}} = 307.88 + 201.06 = 508.94 \text{ mm}^2$$

Verifica flessionale

$$M_{Rd \text{ sup}} = -0.9 \cdot (h_{\text{trav}} - c) \cdot f_{yd} \cdot A_{s \text{ sup}} = -[0.9 \cdot (240 - 25) \cdot 373.92 \cdot 201.06] / 10^6 = -14.55 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed \text{ min}}}{M_{Rd \text{ sup}}} = \frac{-13.83}{-14.55} = 0.95 < 1$$

$$M_{Rd \text{ inf}} = 0.9 \cdot \left(h_{\text{trav}} - c - \frac{\Phi_{\text{inf}}}{2} \right) \cdot f_{yd} \cdot A_{s \text{ inf}} = \left[0.9 \cdot \left(240 - 25 - \frac{14}{2} \right) \cdot 373.92 \cdot 307.88 \right] / 10^6 = 21.55 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed \text{ max}}}{M_{Rd \text{ inf}}} = \frac{19.49}{21.55} = 0.90 < 1$$

Verifica a taglio

$$k = \min \left\{ 1 + \left(\frac{200}{h_{\text{trav}}} \right)^{0.5}; 2 \right\} = \min \left\{ 1 + \left(\frac{200}{240} \right)^{0.5}; 2 \right\} = \min \{ 1.91; 2 \} = 1.91$$

$$\rho_1 = \min \left\{ \frac{A_{s \text{ sup}} + A_{s \text{ inf}}}{A_{\text{trav}}}; 0.02 \right\} = \min \left\{ \frac{201.06 + 307.88}{28800}; 0.02 \right\} = \min \{ 0.0177; 0.02 \} = 0.0177$$

$$\gamma_c = 1.5$$

$$\sigma_{cp} = \min \left\{ \frac{N_{Ed}}{A_{trav}}; 0.2 \cdot f_{cd} \right\} = \min \left\{ \frac{0}{28800}; 0.2 \cdot 14.11 \right\} = \min \{0; 2.82\} = 0 \text{ MPa}$$

$$v_{min} = 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0.035 \cdot 1.91^{1.5} \cdot 24.9^{0.5} = 0.4621 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd1} = \left[\frac{0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}}}{\gamma_c} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot A_{trav} = \left[\frac{0.18 \cdot 1.91 \cdot (100 \cdot 0.0177 \cdot 24.9)^{\frac{1}{3}}}{1.5} + 0.15 \cdot 0 \right] \cdot 28800 = 23.34 \text{ kN}$$

$$V_{Rd2} = [v_{min} + (0.15 \cdot \sigma_{cp})] \cdot A_{trav} = [0.4621 + (0.15 \cdot 0)] \cdot 28800 = 13.31 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \max\{V_{Rd1}; V_{Rd2}\} = \max\{23.34; 13.31\} = 23.34 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{20.88}{23.34} = 0.89 < 1$$

