

ESERCITAZIONE 2

DIMENSIONAMENTO DI UN TELAIO IN CALCESTRUZZO, LEGNO E ACCIAIO

Francesca Rossetti
(svolta con Martina Moreno)

L'esercitazione prevede il progetto di un edificio con struttura a telai piani nelle tre diverse tecnologie: legno, acciaio e calcestruzzo armato. Per ciascuna tecnologia viene effettuato un dimensionamento di massima con tre modelli semplici per la trave, i pilastri e gli sbalzi, mentre in una seconda fase – con l'utilizzo di SAP2000 – si effettueranno le verifiche.

Il progetto si basa sull'ipotesi che la tensione massima nell'elemento sia uguale alla tensione di progetto del materiale e prevede tre modelli per il dimensionamento:

- le travi con il modello di trave doppiamente appoggiata ($M = ql^2/8$)
- gli sbalzi con il modello di mensola ($M = ql^2/2$)
- i pilastri con il modello della pilastrata (N)

Il primo passo è stato disegnare le piante di carpenteria per le tre diverse tecnologie, individuando la trave, il pilastro e lo sbalzo più sollecitato con la relativa area di influenza.

In seguito è stato definito il valore del carico q . Infatti per ciascun materiale è stata scelta la tecnologia del solaio, del quale sono stati calcolati:

- **carico strutturale** q_s , ovvero il carico dovuto al peso proprio degli elementi che svolgono una funzione portante;
- **sovraccarico permanente** q_p che rappresenta il carico dovuto al peso proprio di tutti gli elementi che gravano sulla struttura portante per il suo intero periodo di vita e che non svolgono un ruolo strutturale;
- **sovraccarico accidentale** q_a che è il carico variabile nel tempo che può anche non verificarsi per l'intera vita di una costruzione come il sisma e, tra questi, ci sono anche i carichi di esercizio, legati alla funzione dell'edificio.

Tali carichi agenti sul solaio consentono di determinare il carico di progetto per trave, pilastro e sbalzo.

Per ottenere il carico di progetto la normativa fornisce la combinazione di carico per lo stato limite ultimo con coefficienti maggiorativi per i singoli carichi, al fine di restare in sicurezza. I coefficienti γ_{G1} , γ_{G2} , γ_{Q1} per questa combinazione valgono rispettivamente 1,3; 1,5; 1,5.

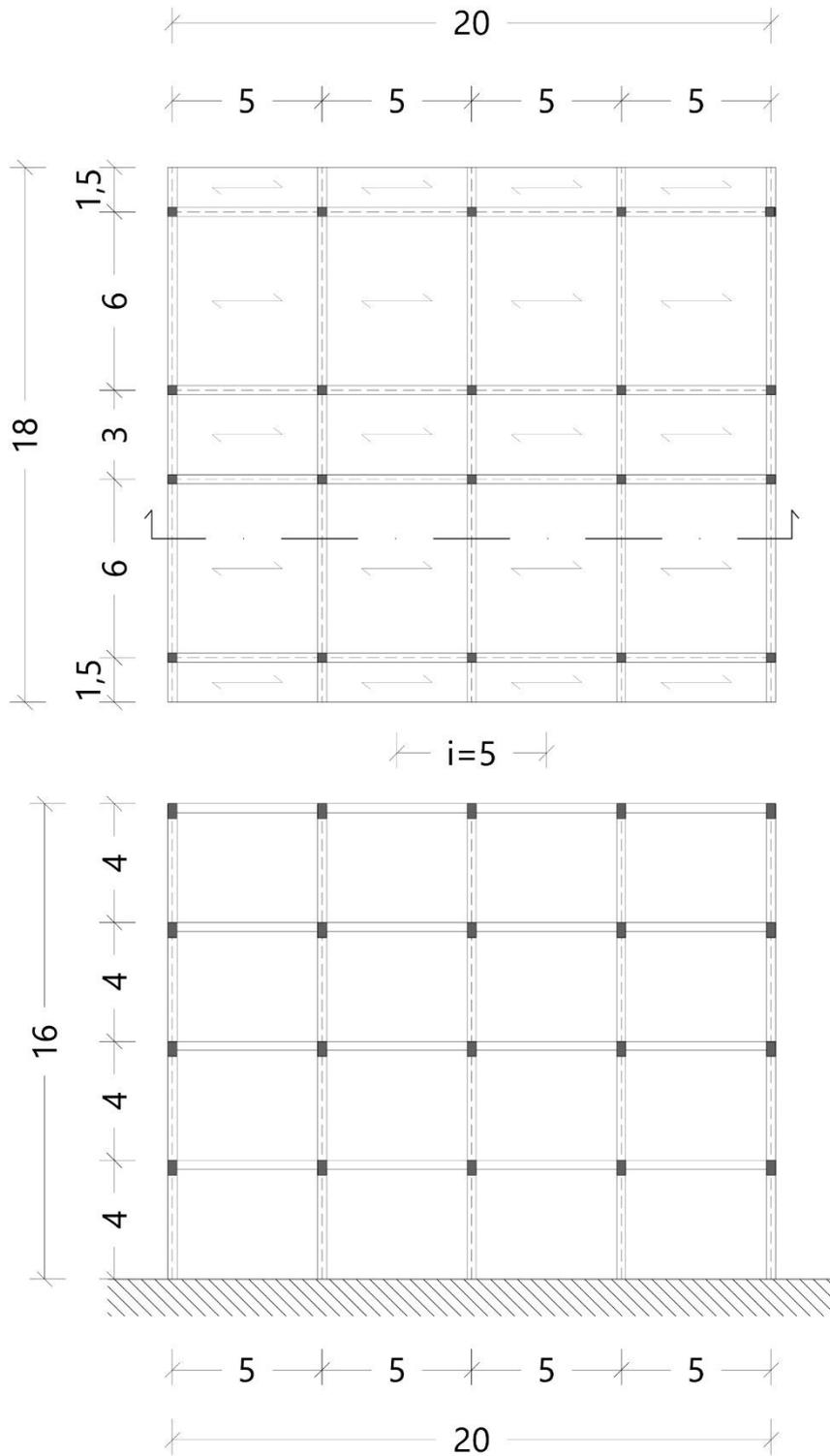
La combinazione di carico è espressa dalla formula seguente:

$$q \text{ [kN/m}^2\text{]} = \gamma_{G1} q_s + \gamma_{G2} q_p + \gamma_{Q1} q_a$$

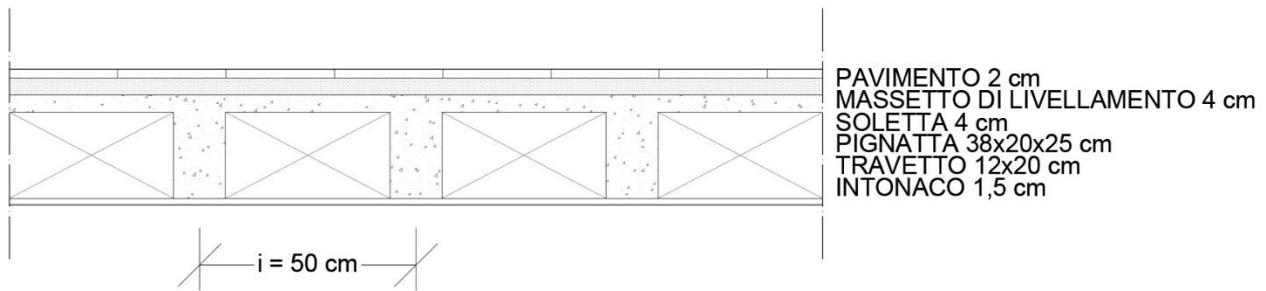
I file Excel forniti come ausilio all'esercitazione calcolano le combinazioni per ciascuno dei tre materiali.

1. CALCESTRUZZO ARMATO

È stata ipotizzata una struttura di quattro piani, di 18 x20 m.



SOLAIO IN LATERO CEMENTO ARMATO



Il solaio è stato predimensionato in base alla luce più grande $\rightarrow H \text{ solaio} \geq 1/25 L$.

Partendo dall'analisi del solaio è stato calcolato il peso a metro quadro di ogni elemento tecnologico moltiplicando il suo peso specifico (espresso in kN/m^3) per la quantità di volume (espressa in m^3/m^2) di quel materiale contenuta in un metro quadrato di solaio.

Come carico strutturale è stato considerato quello dovuto al peso dei travetti, della soletta e delle pignatte (sono elementi di alleggerimento e non hanno una funzione strutturale, ma il loro peso è stato incluso nel carico strutturale).

$q_s \rightarrow$ 1. peso travetti

$$n(\text{travetti}) = 1\text{m}/0,5\text{m} = 2$$

$$\text{Peso travetto} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,024 \text{ m}^3 = 0,6 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \text{Peso travetti} = 2 \times 0,6 \text{ kN} \times 1/\text{m}^2 = \mathbf{1,2 \text{ kN/m}^2}$$

2. soletta

$$P = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,04\text{m} = \mathbf{1 \text{ kN/m}^2}$$

3. pignatte

$$n(\text{pignatte}) = 1\text{m}/0,5\text{m} = 2$$

$$\text{Peso pignatta} = 8 \text{ kN/m}^3 \times 0,076 \text{ m}^3 = 0,6 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \text{Peso pignatte} = 2 \times 0,6 \text{ kN} \times 1/\text{m}^2 = \mathbf{1,2 \text{ kN/m}^2}$$

$$\mathbf{q_s = 3,4 \text{ kN/m}^2}$$

Il sovraccarico permanente comprende invece il peso dell'intonaco, del massetto di livellamento, della pavimentazione, degli impianti, dei tramezzi divisorii interni all'edificio. Questi ultimi sono stati inseriti nei calcoli tenendo conto della loro incidenza a metro quadrato: 1 kN/m^2 per i tramezzi e $0,5 \text{ kN/m}^2$ per gli impianti.

$q_p \rightarrow$ 1. intonaco

$$\text{per } s = 1,5 \text{ cm} \rightarrow \text{Peso intonaco} = \mathbf{0,3 \text{ kN/m}^2}$$

2. pavimento

$$\text{per } s = 2,0 \text{ cm} \rightarrow \text{Peso pavimento} = \mathbf{0,4 \text{ kN/m}^2}$$

3. massetto di livellamento

$$\text{Peso} = 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,04\text{m} = \mathbf{0,96 \text{ kN/m}^2}$$

4. tramezzi = 1 kN/m^2

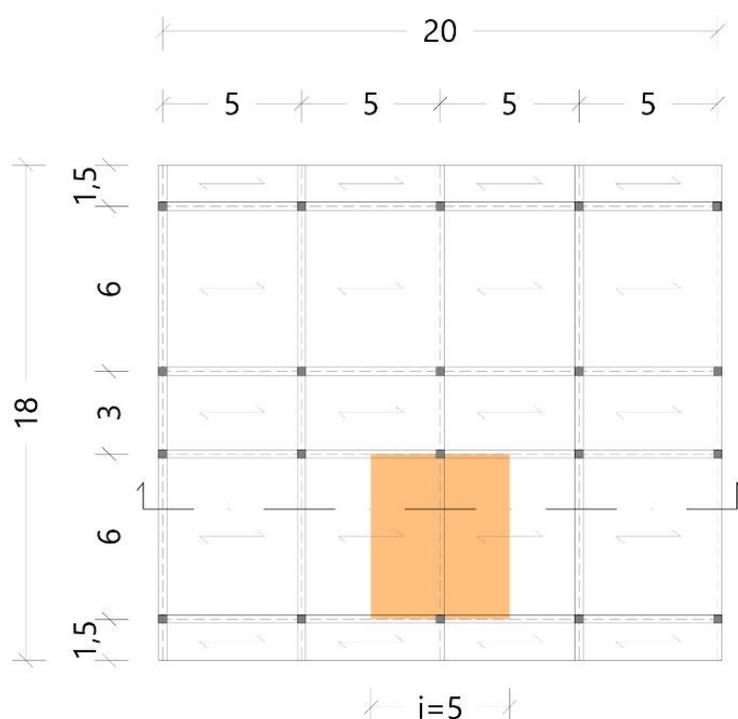
5. impianti = 0,5 kN/m²

q_p = 3,16 kN/m²

Il sovraccarico accidentale comprende il carico legato alla destinazione d'uso dell'edificio. Dalla *NTC2008-Norme tecniche per le costruzioni- D. M. 14 Gennaio 2008 tabella 3.1.* Il emerge che gli ambienti ad uso residenziale tra cui l'albergo, oggetto di studio, **q_a = 2,00 kN/m²** (è stato considerato lo stesso valore durante l'analisi delle tre tecnologie).

A questo punto è stato effettuato il predimensionamento degli elementi strutturali più sollecitati.

TRAVE



In arancione è evidenziata l'area di influenza della trave considerata per il predimensionamento.

Una volta inseriti nella tabella i valori di **q_s**, **q_p** e **q_a** il file Excel esegue la combinazione di carico allo SLU e, moltiplicando il carico ottenuto per l'interasse della trave in esame, fornisce il carico distribuito sulla trave. Inserendo anche la luce della trave viene calcolato il valore del momento massimo, che per il modello di trave appoggiata è **M_{max} = ql²/8**.

A questo punto sono state inserite le resistenze caratteristiche di calcestruzzo e acciaio (**f_{ck}**, **f_{yk}**) per poi ricavare, moltiplicandole per coefficienti di sicurezza riduttivi, le resistenze di progetto (**f_{cd}**, **f_{yd}**).

A partire dal valore del momento massimo e scegliendo la dimensione della base, è possibile ricavare l'altezza utile (**h_u**) della sezione.

Il file Excel fornisce in automatico tale calcolo attraverso la formula:

$$h_u = r \sqrt{(M_{max}/b)} \quad \text{dove } r = \sqrt{\left(\frac{2}{f_{cd}(1-\beta/3)\beta}\right)} ; \quad \beta = f_{cd}/(f_{cd}+f_{yd}/n)$$

La formula dunque fa riferimento anche alle resistenze di progetto del calcestruzzo e dell'acciaio (omogeneizzato con $n=15$, dove n è il coefficiente di omogenizzazione)

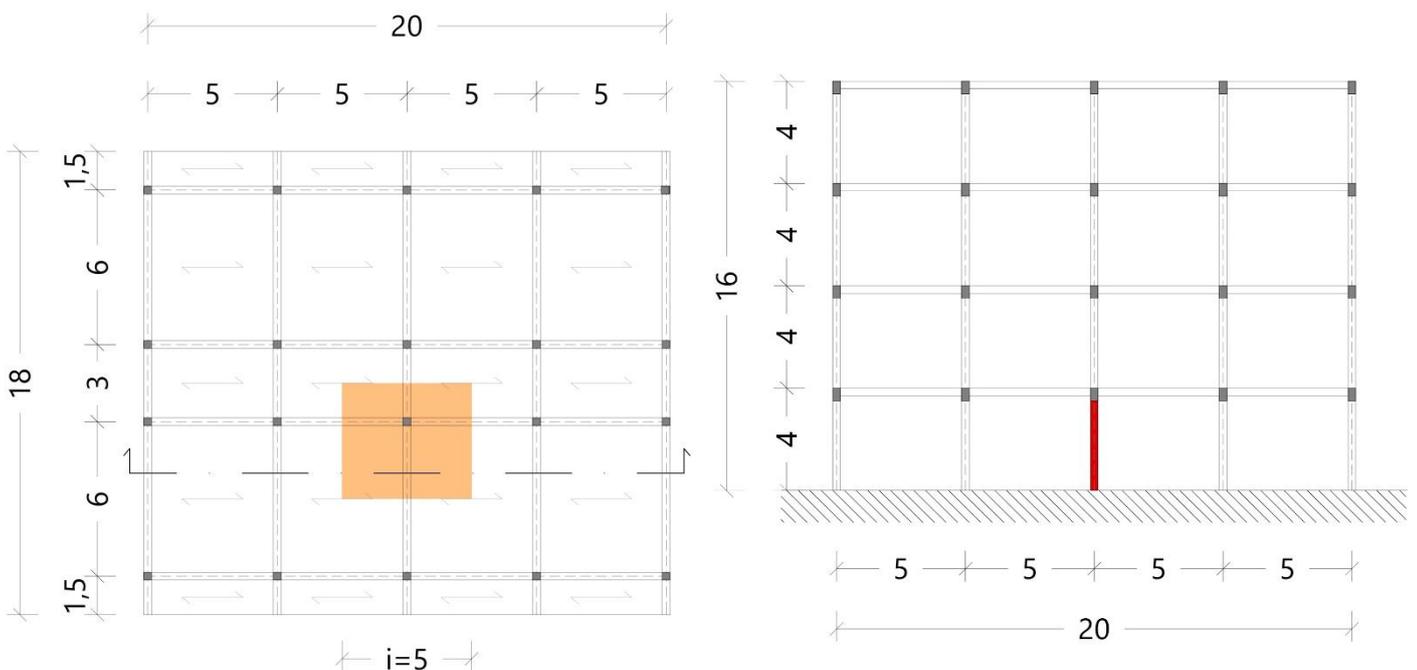
A questo punto, calcolata l'altezza utile e scelto un valore per δ (copriferro), si è determinata e ingegnerizzata l'altezza minima della sezione ($H_{min} = h_u + \delta$).

Una volta predimensionata la sezione, viene calcolata l'area ed il suo peso proprio. Tale peso viene aggiunto ai carichi strutturali per poterlo tenere in considerazione nella verifica della sezione ingegnerizzata, che nel caso in esame è soddisfatta.

interasse (m)	q_s (KN/m ²)	q_b (KN/m ²)	q_a (KN/m ²)	q_u (KN/m)	luce (m)	M_{max} (KN*m)	f_{yk} (N/mm ²)	f_{yk} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)	f_{cd} (N/mm ²)	β	r	b (cm)	h_u (cm)	δ (cm)	H_{min} (cm)	H	H/l	area (m ²)	peso unitario (KN/m)
5,00	3,40	3,16	2,00	60,80	6,00	273,60	450,00	391,30	28,00	15,87	0,38	2,46	40,00	51,07	5,00	56,07	60,00	0,09	0,24	6,00
				68,60	6,00	308,70	450,00	391,30	28,00	15,87	0,38	2,46	40,00	54,25	5,00	59,25	verificata			
4,50	3,40	3,16	2,00	54,72	5,00	171,00	450,00	391,30	28,00	15,87	0,38	2,46	40,00	40,38	5,00	45,38	50,00	0,09	0,20	5,00
				61,22	5,00	191,31	450,00	391,30	28,00	15,87	0,38	2,46	40,00	42,71	5,00	47,71	verificata			

PILASTRO

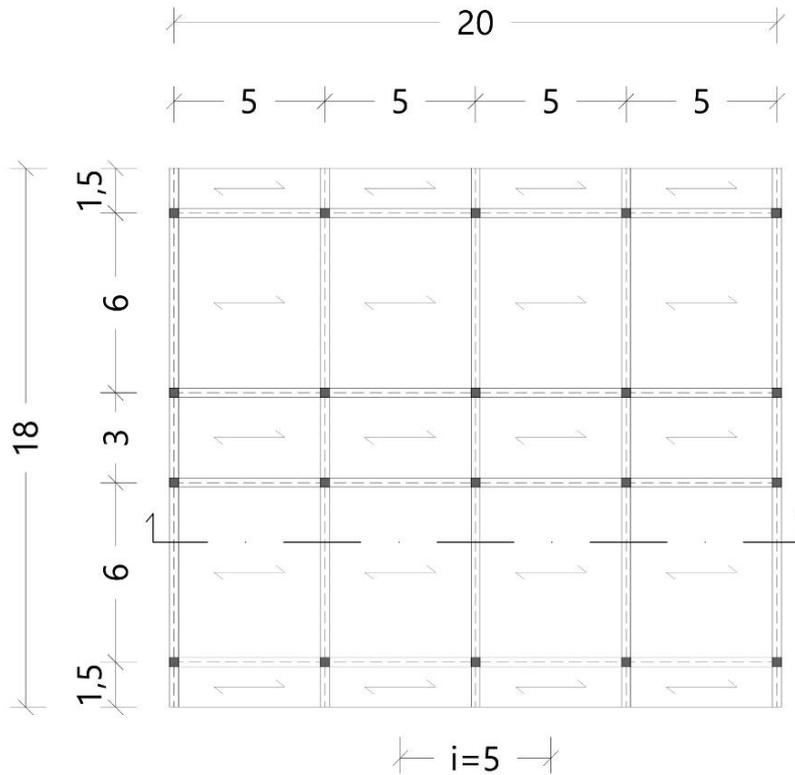
Per prima cosa è stato individuato il pilastro maggiormente sollecitato, cioè quello del pian terreno sul quale gravano i carichi dei 4 piani superiori. Per determinare il valore di N agente è stato moltiplicato il carico (solaio e peso proprio delle travi) per il numero dei piani e per la relativa area di influenza, evidenziata in arancione sulla pianta che segue.



Una volta determinato lo sforzo normale massimo è stato scelto il calcestruzzo da utilizzare (è stata scelta la stessa classe di resistenza della trave) e calcolata la resistenza di progetto f_{cd} .

2. LEGNO

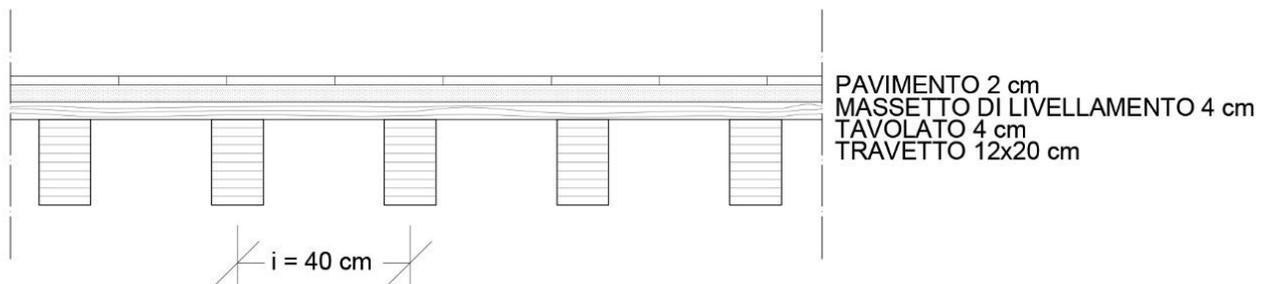
È stata ipotizzata, come nel calcestruzzo, una struttura di quattro piani di 18 m x 20 m.



SOLAIO IN LEGNO

Dallo schema strutturale è stato predimensionato il solaio secondo la luce più grande

→ $H_{\text{solaio}} \geq 1/25 L$.



$q_s \rightarrow$ **1. peso travetti**

$$n(\text{travetti}) = 1\text{m}/0,4\text{m} = 2,5$$

$$\text{Peso travetto} = 5 \text{ kN/m}^3 \times 0,024 \text{ m}^3 = 0,12 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \text{Peso travetti} = 2,5 \times 0,12 \text{ kN} \times 1/\text{m}^2 = \mathbf{0,3 \text{ kN/m}^2}$$

2. tavolato

$$P = 5 \text{ kN/m}^3 \times 0,04\text{m} = \mathbf{0,2 \text{ kN/m}^2}$$

$$\mathbf{q_s = 0,5 \text{ kN/m}^2}$$

$q_p \rightarrow$ **1. pavimento**

$$\text{per } s = 2,0 \text{ cm} \rightarrow \text{Peso pavimento} = \mathbf{0,4 \text{ kN/m}^2}$$

2. massetto di livellamento

$$\text{Peso} = 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,04\text{m} = \mathbf{0,96 \text{ kN/m}^2}$$

3. tramezzi = 1 kN/m²

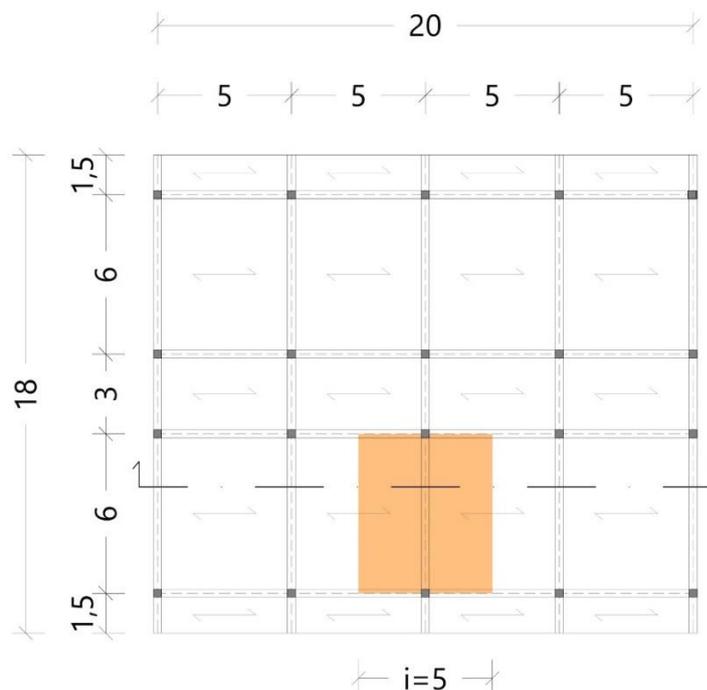
4. impianti = 0,5 kN/m²

$$\mathbf{q_p = 2,86 \text{ kN/m}^2}$$

$$\mathbf{q_a = 2,00 \text{ kN/m}^2}$$

Il passo successivo è stato quello di predimensionare gli elementi strutturali più sollecitati.

TRAVE



Si procede come nel caso del calcestruzzo armato fino al calcolo del M_{max} . A questo punto sono stati inseriti i dati relativi al materiale scelto: legno lamellare con classe di resistenza GL24h. E' stata quindi inserita la resistenza caratteristica a flessione $f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$.

Si calcola dunque la tensione di progetto $\rightarrow f_d = k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_m$

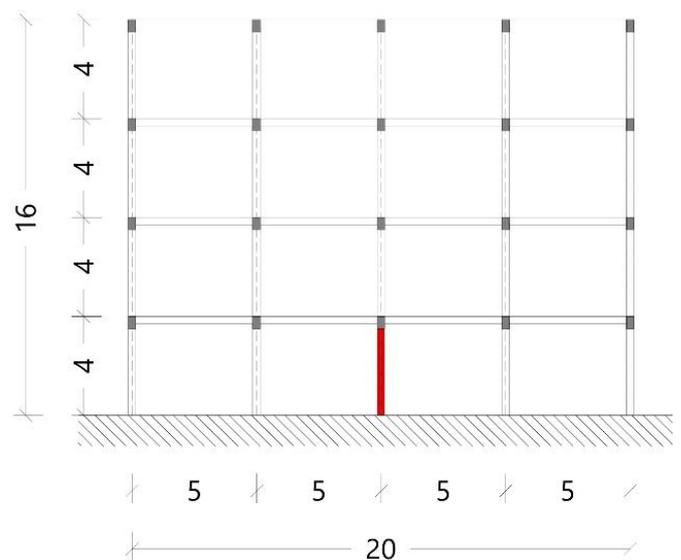
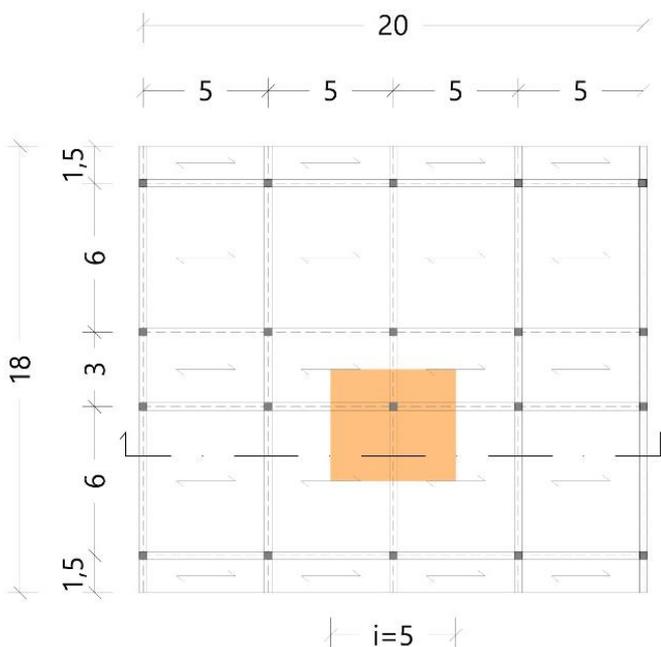
- k_{mod} è un coefficiente riduttivo dei valori di resistenza che tiene conto della durata del carico e dell'umidità della struttura;
- $f_{m,k}$ è il valore caratteristico del materiale;
- γ_m è un coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale.

Successivamente fissata la base della sezione si ottiene un valore di h_{min} e dunque viene scelto il valore di H.

interasse (m)	q_s (KN/m ²)	q_p (KN/m ²)	q_a (KN/m ²)	q_u (KN/m)	luce (m)	M_{max} (KN*m)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	k_{mod}	γ_m	f_d (N/mm ²)	b (cm)	h_{min} (cm)	H (cm)
5,00	0,50	2,86	2,00	39,70	6,00	178,65	24,00	0,80	1,45	13,24	35,00	48,09	50,00
4,50	0,50	2,86	2,00	35,73	5,00	111,66	24,00	0,80	1,45	13,24	35,00	38,02	40,00

PILASTRO

Il pilastro più sollecitato è quello del pian terreno sul quale vengono trasferiti i carichi dei 4 piani superiori. Per trovare il valore di **N** viene moltiplicato il carico (solaio e peso proprio delle travi) per il numero dei piani e per la relativa area di influenza (in arancione).



A questo punto si ottiene l'area minima necessaria a resistere allo sforzo di compressione

$$A_{\min} = N / f_{c0d}$$

Per non incorrere nel fenomeno di instabilità, si tiene conto della snellezza del pilastro e del suo raggio di inerzia, così da ottenere una base minima che è stata ingegnerizzata. Successivamente viene calcolata l'altezza minima della sezione come rapporto fra l'area minima e la base progettata, per giungere poi al valore di h.

L ₁	L ₂	Area	trave _p	trave _s	q _{trave}	q _s	q _p	q _s	q _{solaio}	n _{piani}	N	f _{c0,k}	k _{mod}	γ _m	f _{c0d}	A _{min}	E,005	β	I	λ _{max}	ρ _{min}	b _{min}	b	h _{min}	h	A _{design}	I _{design}
m	m	m ²	kN/m	kN/m	kN	kN/mq	kN/mq	kN/mq	kN		kN	Mpa			Mpa	cm ²	Mpa		m		cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm ⁴
5,00	4,50	22,50	0,87	0,87	10,74	0,50	2,86	2,00	178,65	4	758	24,00	0,80	1,45	13,24	572,1	9400	1,0	3,70	83,66	4,42	15,32	35,00	16,35	35,00	1225	125052

SBALZO

Per il dimensionamento dello sbalzo, si procede in modo analogo al calcestruzzo armato, fino al calcolo del **M_{max}**. Fissato il valore della base si ottiene l'altezza minima che è stata successivamente ingegnerizzata.

Una volta progettata la sezione, si procede con la verifica dell'abbassamento (allo SLE)

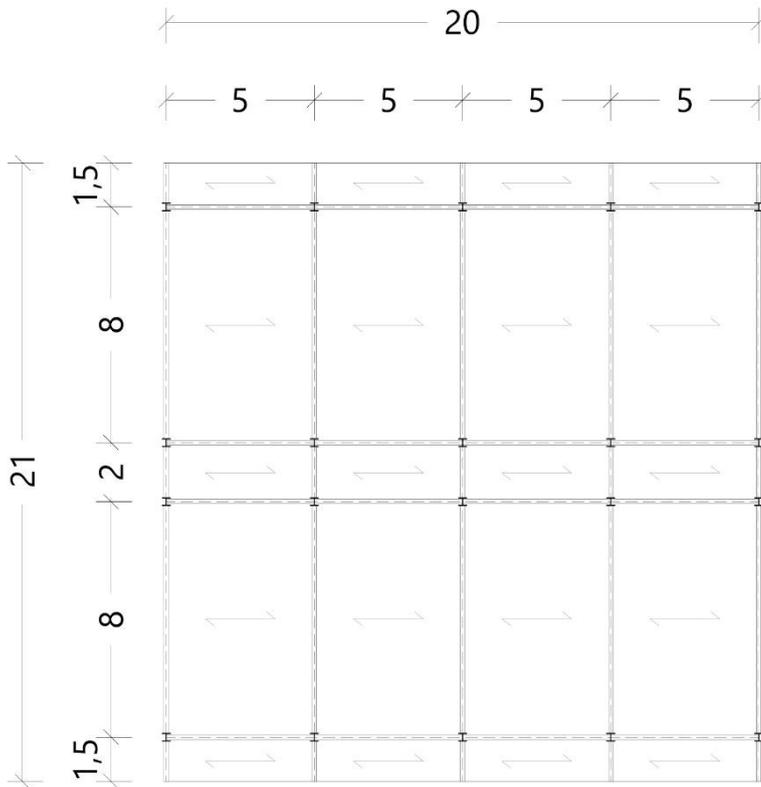
$$v_{\max} = q l^4 / 8 E I_x$$

$$v_{\max} \leq 1/250 l$$

interasse (m)	q _s (kN/mq)	q _p (kN/mq)	q _s (kN/mq)	q _v (kN/m)	luce (m)	M _{max} (kN*m)	f _{m,k} (N/mm ²)	k _{mod}	γ _m	f _d c	b (cm)	h _{min} (cm)	H (cm)	E (N/mm ²)	I _x (cm ⁴)	q _s (kN/m)	v _{max} (cm)	l/v _{max}	
5	0,50	2,86	2,00	39,7	1,5	44,6625	24	0,8	1,45	13,24	25	28,45	30	11600	56250	22	0,21	709,48	SI

3. ACCIAIO

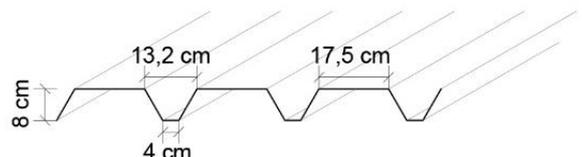
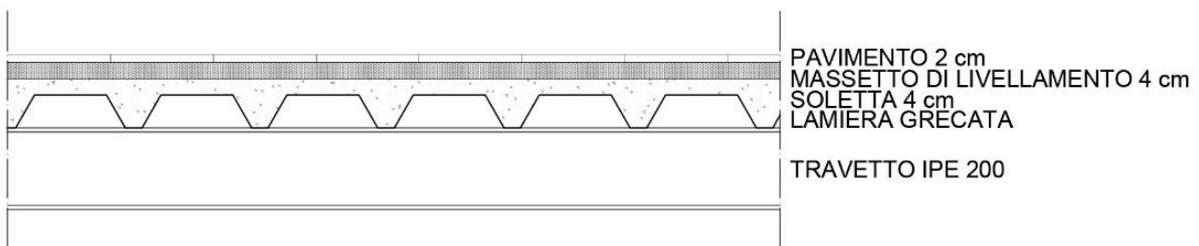
Per l'acciaio è stata ipotizzata una struttura sempre di quattro piani, ma di 20 m x 21 m e con luci maggiori.



A partire dallo schema strutturale è stato predimensionato il solaio in base alla luce più grande

→ $H_{\text{solaio}} \geq 1/25 L$.

SOLAIO ACCIAIO



$q_s \rightarrow$ **1. peso travetti**

$$n(\text{travetti}) = 1\text{m}/0,7\text{m} = 1,4$$

$$\text{Peso travetto} = 78,5 \text{ kN/m}^3 \times 0,0028 \text{ m}^3 = 0,21 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \text{Peso travetti} = 1,4 \times 0,21 \text{ kN} \times 1/\text{m}^2 = \mathbf{0,30 \text{ kN/m}^2}$$

2. soletta

$$P = 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,04\text{m} = \mathbf{0,96 \text{ kN/m}^2}$$

$$\text{Incidenza cls} = 24 \text{ kN/m}^3 \times A^* \times (1\text{m}/i) = 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,007 \text{ m}^3 \times (1\text{m}/0,30\text{m}) = \mathbf{0,55 \text{ kN/m}^2}$$

3. lamiera

$$\text{Per } s = 1 \text{ mm} \rightarrow \text{Peso lamiera} = \mathbf{0,1 \text{ kN/m}^2}$$

$$\mathbf{q_s = 1,9 \text{ kN/m}^2}$$

$q_p \rightarrow$ **1. pavimento**

$$\text{per } s = 2,0 \text{ cm} \rightarrow \text{Peso pavimento} = \mathbf{0,4 \text{ kN/m}^2}$$

2. massetto di livellamento

$$\text{Peso} = 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,04\text{m} = \mathbf{0,96 \text{ kN/m}^2}$$

3. tramezzi = 1 kN/m²

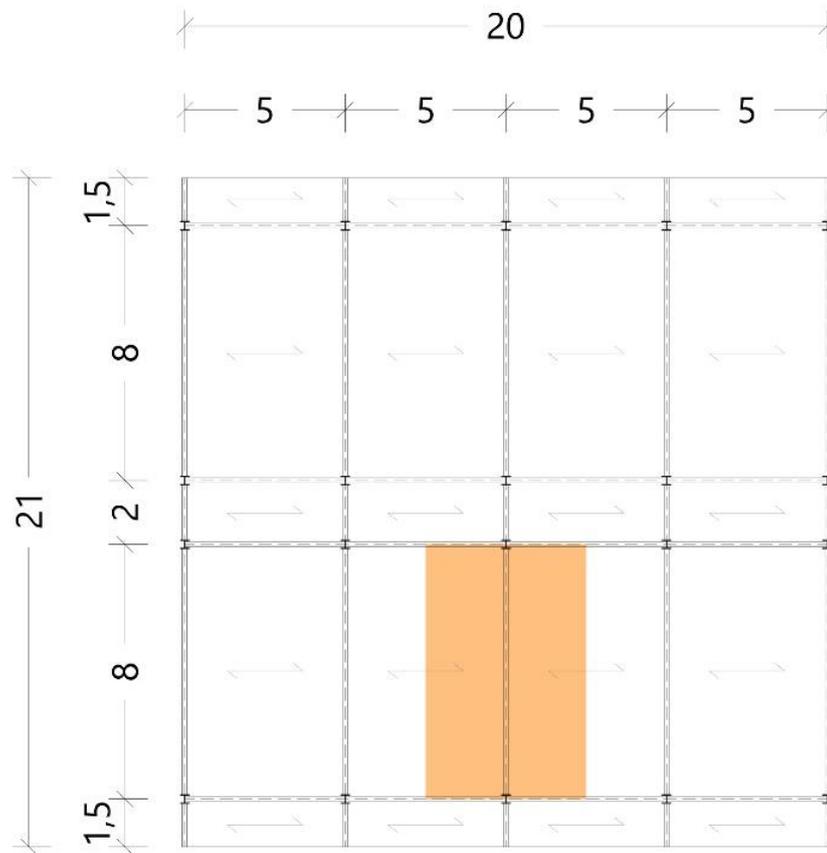
4. impianti = 0,5 kN/m²

$$\mathbf{q_p = 2,86 \text{ kN/m}^2}$$

$$\mathbf{q_a = 2,00 \text{ kN/m}^2}$$

Anche nel caso dell'acciaio il passo successivo è stato quello di predimensionare gli elementi strutturali più sollecitati.

TRAVE



Si procede come nei casi precedenti fino al calcolo del M_{max} . Scelto l'acciaio S235, è stato inserito il valore $f_{y,k}$, resistenza caratteristica del materiale per poi calcolare la tensione di progetto

$$\rightarrow f_d = f_{y,k} / 1,05.$$

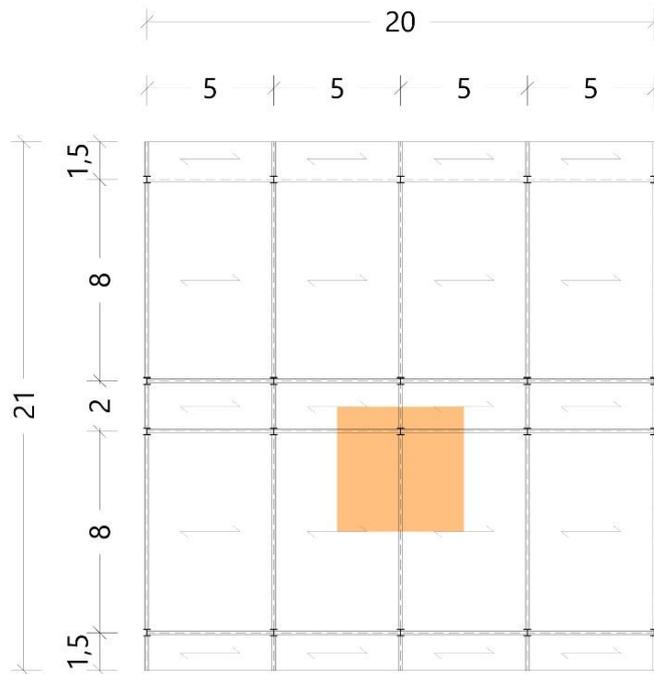
Dunque si ottiene il valore del $W_{x,min} = M_{max} / f_d$.

Infine è stato scelto da prontuario il profilato IPE con $W_x \geq W_{x,min}$

interasse (m)	q_s (KN/m ²)	q_p (KN/m ²)	q_a (KN/m ²)	q_u (KN/m)	luce (m)	M_{max} (KN*m)	$f_{y,k}$ (N/mm ²)	f_d (N/mm ²)	$W_{x,min}$ (cm ³)	W_x (cm ³)
5,00	1,90	2,86	2,00	48,80	8,00	390,40	235,00	223,81	1744,34	1928,00
5,00	1,90	2,86	2,00	48,80	5,00	152,50	235,00	223,81	681,38	713,10

PILASTRO

Il pilastro più sollecitato è quello del pian terreno sul quale vengono trasferiti i carichi dei 4 piani superiori. Per trovare il valore di N , come nei casi precedenti, viene moltiplicato il carico (soffitto e peso proprio delle travi) per il numero dei piani e per la relativa area di influenza (in arancione).



Come nella trave, è stata scelta la classe di resistenza dell'acciaio (S235) e dunque calcolata la tensione di progetto, ottenendo una A_{min} della sezione.

Tuttavia le sezioni di acciaio potrebbero essere soggette a fenomeni di instabilità, pertanto ai fini del predimensionamento è stata calcolata la snellezza del pilastro, il raggio di inerzia minimo e il momento di inerzia minimo, che sono stati presi come riferimento durante l'ingegnerizzazione.

E' stata infatti scelta da sagomario una sezione HEA con valori maggiori di tali grandezze di riferimento.

L_1	L_2	Area	trave _p	trave _s	q_{trave}	q_s	q_p	q_a	q_{solai}	n_{piani}	N	f_{yk}	γ_m	f_{yd}	A_{min}	E	β	l	λ^*	ρ_{min}	I_{min}	A_{design}	I_{design}	ρ_{min}	λ	profilo
m	m	m ²	kN/m	kN/m	kN	kN/mq	kN/mq	kN/mq	kN		kN	Mpa		Mpa	cm ²	Mpa		m		cm	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm		
5,00	5,00	25,00	0,88	0,48	8,84	1,90	2,86	2,00	244,00	4	1011	235,00	1,05	223,81	45,2	210000	1,00	3,70	96,23	3,84	668	53,8	3692	4,98	74,30	HEA200

SBALZO

Anche in questo caso, per l'acciaio è stato determinato il valore minimo del modulo di resistenza W_x , da usare come riferimento per ingegnerizzare la sezione IPE.

Una volta progettata la sezione, si procede con la verifica dell'abbassamento (allo SLE)

$$v_{max} = q l^4 / 8 E I_x$$

$$v_{max} \leq 1/250 l.$$

interasse (m)	q_s (kN/mq)	q_p (kN/mq)	q_a (kN/mq)	q_u (kN/m)	luce (m)	M_{max} (kN*m)	$f_{y,k}$ (N/mm ²)	f_d (N/mm ²)	$W_{x,min}$ (cm ³)	I_x (cm ⁴)	peso (kN/m)	q_e (kN/m)	E (N/mm ²)	v_{max} (cm)	l/v_{max}	
5	1,90	2,86	2,00	48,8	1,5	54,9	235	223,81	245,30	2772	0,25	29,05	210000	0,316	474,988	SI