

Corso di aggiornamento

Verifica sismica degli edifici esistenti in c.a.

7 - Analisi lineare: valutazione di massima o dettagliata delle caratteristiche di sollecitazione

Forlì

29-31 gennaio 2015

Aurelio Ghersi

Valutazione preliminare
delle caratteristiche di sollecitazione
con procedimenti semplificati

Perché?

- Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati
 - Determinando l'ordine di grandezza delle sollecitazioni è possibile individuare quali possono essere i problemi principali
 - Può consentire di esprimere rapidamente un primo giudizio, anche se approssimato
 - È utile come validazione dei calcoli successivi (o almeno dei calcoli lineari), ai sensi del capitolo 10 delle NTC08
 - Può fornire indicazioni anche per quanto riguarda le indagini da effettuare in sito e sui materiali

In cosa consiste?

1. Stimare la rigidezza dei pilastri
 - Usare formule semplificate (linee guida della Basilicata, suggerimenti di A. Ghersi)
2. Determinare le forze sulla struttura con analisi statica
 - Fare il calcolo a meno del periodo T , non noto
3. Determinare il periodo proprio T della struttura (formula di Rayleigh) e le forze conseguenti
4. Ripartire il taglio tra i pilastri in proporzione alle rigidezze
5. Stimare i momenti flettenti

E poi?

I risultati ottenuti vengono usati, come per quelli ottenuti da analisi più precise, per:

- determinare il moltiplicatore del sisma che porta al limite di resistenza **a taglio**
- determinare il moltiplicatore del sisma che porta al limite di resistenza **a flessione**

Nota:

- Contemporaneamente, anzi preliminarmente, determinare in funzione della resistenza a flessione e a taglio se è c'è o no possibilità di rotture a taglio dei pilastri

1. Rigidezze dei pilastri

Linee guida della Basilicata

- Valutare le rigidezze dei pilastri

$$k_i = c \frac{EI}{h^3}$$

$c = 9$ in presenza di travi emergenti

$c = 6$ in presenza di travi a spessore

$c = 3$ in assenza di travi

1. Rigidezze dei pilastri

Indicazioni di A. Ghersi

- Valutare le rigidezze solo dei pilastri “che contano”
- Ridurre la rigidezza per tener conto delle travi

Dal secondo piano in su

$$k_r = \frac{\frac{12 E \sum I_p}{h_r^3}}{1 + 0.5 \frac{I_{media}}{h_r} \frac{\sum I_p}{\sum I_t}}$$

$$k_r = \frac{\frac{12 E \sum I_p}{h_r^3}}{1 + \frac{I_{media}}{h_r} \frac{\sum I_p}{\sum I_t}}$$

Al primo piano

1. Rigidezze dei pilastri

Indicazioni di A. Ghersi

- In alternativa, valutare le rigidezze di ciascun pilastro, riducendola per tener conto delle travi

$$k_i = \frac{12 E I_{p,i}}{h_r^3} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{E I_{p,i} / h_r}{E I_{t,sup} / L_t} + \frac{E I_{p,i} / h_r}{E I_{t,inf} / L_t} \right)}$$

2. Forze da analisi statica

- Calcolare le forze F_j , con formule per analisi statica (a meno di T)

$$F_k = 0.85 W_k z_k \frac{\sum_i W_i}{\sum_i W_i z_i} S_e(T_1) \quad \text{con } S_e(T_1)=1$$

- Calcolare tagli di piano e spostamenti relativi

$$V_p = \sum_{j=p}^n F_j \quad u_{rel,p} = \frac{V_p}{K_p} \quad K_p = \sum k_i$$

- Calcolare spostamenti assoluti

$$u_p = \sum_{j=1}^p u_{rel,j}$$

3. Determinare il periodo proprio e le forze conseguenti

- Stimare il periodo con la formula di Rayleigh

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n m_j u_j^2}{\sum_{j=1}^n F_j u_j}}$$

E quindi a_g

4. Ripartire il taglio e verificare i pilastri

- Ripartire il taglio di piano in base alla rigidezza

$$V_i = V_p \frac{k_i}{K_p}$$

- Effettuare la verifica a taglio, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

5. Valutare il momento flettente e verificare travi e pilastri

- Il procedimento è stato già più volte descritto (dal taglio al momento flettente nei pilastri e da questo a quello delle travi)

$$M_p = V_p \frac{h}{2} \qquad M_t = \frac{M_{p,\text{sup}} + M_{p,\text{inf}}}{2}$$

- Effettuare la verifica a flessione, valutando per quale aliquota dell'azione sismica la verifica è soddisfatta

Esempio

Procedimento

Si procede come per nuovi edifici:

- Determinazione delle masse di piano, con $g_k + \psi_2 q_k$
- Definizione dello spettro di risposta elastico per SLV
nell'esempio: periodo di ritorno 475 anni, suolo B
- Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con analisi statica ($q = 1$)

The floor plan shows a rectangular workshop layout with the following components:

- Workstations (T):**
 - T 80x20 (Top right)
 - T 30x50 (Bottom right)
- Material Storage (M):**
 - M 30x50 (Top left, bottom left, and along the right wall)
 - M 60x30 (Top middle, bottom middle)
 - M 30x30 (Bottom left)
 - M 40x30 (Bottom middle)
- Central Area:**
 - foro ascensore (Staircase opening)
 - 60x20 (Central rectangular area)
- Dimensions and Layout:**
 - Overall dimensions: 1194 (width) x 550 (depth).
 - Internal dimensions: 1194 (width) x 1194 (depth).
 - Wall thickness: 135 (top), 150 (bottom), 500 (left), 550 (right).
 - Door width: 1080 (left), 1080 (right).

Carpenteria

1. Rigidezze dei pilastri

- Seguendo le linee guida della Basilicata

$$k_i = c \frac{EI}{h^3}$$

$c = 9$ in presenza di travi emergenti
 $c = 6$ in presenza di travi a spessore
 $c = 3$ in assenza di travi

si ha ad esempio, per la direzione y

piano	2							h	3.20	m
		pil	b	h	EI / h ³	c	k	n	k	
			cm	cm	kN/mm					
pilastri	a	1, 17, 20	30	30	0.587	9	5.28	3	15.85	
	b	18, 19	30	30	0.587	3	1.76	2	3.52	
	c	9	30	40	1.392	9	12.52	1	12.52	
	d	12	30	50	2.718	9	24.46	1	24.46	
	e	2,3,4,10,11	50	30	0.978	3	2.94	5	14.68	
									71.04	

vedi file Excel "Analisi semplificata Bas"

2. Forze da analisi statica

massa (peso) degli impalcati

- Dai carichi unitari, si valutano le masse di impalcato, secondo le norme attualmente vigenti

			m ²	solaio	m ²	sbalzo	m	trave	m	tompagno	somma	pilastro	TOT	a m ²
Impalcati	ultimo	sism	283.5	5.6	40.5	5.2	113.0	3.5	44.5	7.0	2505	81.0	2586.2	7.98
												massa	263.6	
	altri	sism	283.5	5.6	40.5	5.2	113.0	3.5	89.0	7.0	2817	200.7	3017.4	9.31
												massa	307.6	

Impalcato	Peso	Peso a m ²
6	2586.2 kN	7.98 kN/m ²
altri	3017.4 kN	9.31 kN/m ²

Nota: i valori sono riferiti all'intero edificio. Nel seguito data la simmetria si considererà solo mezzo edificio

2. Forze da analisi statica forze

- Si sono calcolare le forze F_j , con formule per analisi statica (a meno di T)

$$F_k = 0.85 W_k z_k \frac{\sum_i W_i}{\sum_i W_i z_i} S_e(T_1) \quad \text{con } S_e(T_1)=1$$

piano	h	z	peso W	W z	F	V
	m	m	kN		kN	kN
6	3.20	19.20	1293.1	24828	1917.7	1917.7
5	3.20	16.00	1508.7	24139	1864.5	3782.1
4	3.20	12.80	1508.7	19311	1491.6	5273.7
3	3.20	9.60	1508.7	14484	1118.7	6392.4
2	3.20	6.40	1508.7	9656	745.8	7138.2
1	3.20	3.20	1508.7	4828	372.9	7511.1
			8836.6	97245		

2. Forze da analisi statica spostamenti

- Dalle forze e rigidezze si sono calcolati gli spostamenti relativi e assoluti

$$u_{rel,p} = \frac{V_p}{K_p}$$

$$u_p = \sum_{j=1}^p u_{rel,j}$$

piano	V	k	dr	u
	kN	kN/mm	mm	mm
6	1917.7	38.75	49.49	580.30
5	3782.1	38.75	97.61	530.81
4	5273.7	38.75	136.11	433.20
3	6392.4	48.92	130.66	297.10
2	7138.2	71.04	100.49	166.43
1	7511.1	113.89	65.95	65.95

3. Determinare il periodo proprio e le forze conseguenti

- Stimare il periodo con la formula di Rayleigh

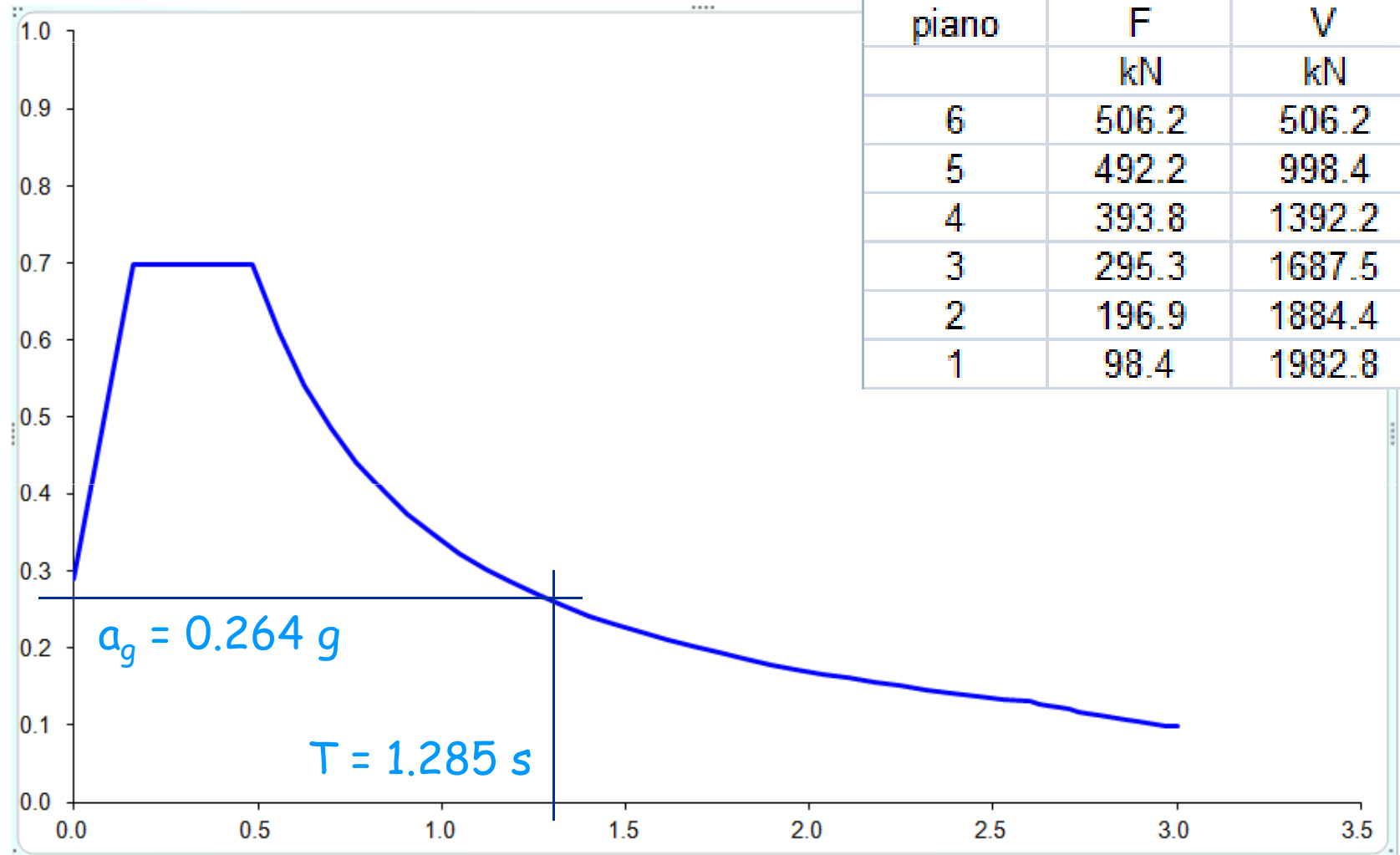
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n m_j u_j^2}{\sum_{j=1}^n F_j u_j}}$$

Si ottiene $T = 1.285 \text{ s}$

piano	m	F	u	m u ²	F u
	t	kN	mm		
6	131.81	1917.7	580.30	44389	1112817
5	153.79	1864.5	530.81	43333	989690
4	153.79	1491.6	433.20	28861	646158
3	153.79	1118.7	297.10	13575	332359
2	153.79	745.8	166.43	4260	124126
1	153.79	372.9	65.95	669	24592
				135086	3229742

3. Determinare il periodo proprio e le forze conseguenti

- Si ha:



4. Ripartire il taglio

e poi verificare i pilastri a taglio

- Ripartire il taglio di piano in base alla rigidezza

$$V_i = V_p \frac{k_i}{K_p}$$

- Si ottiene ad esempio $V_{12} = 1884.4 \times \frac{24.46}{71.04} = 648.9 \text{ kN}$

[illegible]

5. Valutare il momento flettente e poi verificare travi e pilastri a flessione

- Non è riportato



Una valutazione delle resistenze di travi e pilastri
può fornire utili indicazioni sul fattore di struttura q
da utilizzare

Nota: ho approfondito questo aspetto nella presentazione
successiva

Stesso procedimento con rigidezze calcolate secondo A. Ghersi

- Le elaborazioni sono riportate nel file Excel "Analisi semplificata AG"
- Come si può vedere da quei numeri (che qui non riporto) i risultati sono molto vicini a quelle che sono mostrati più avanti, ottenuti partendo dall'analisi modale

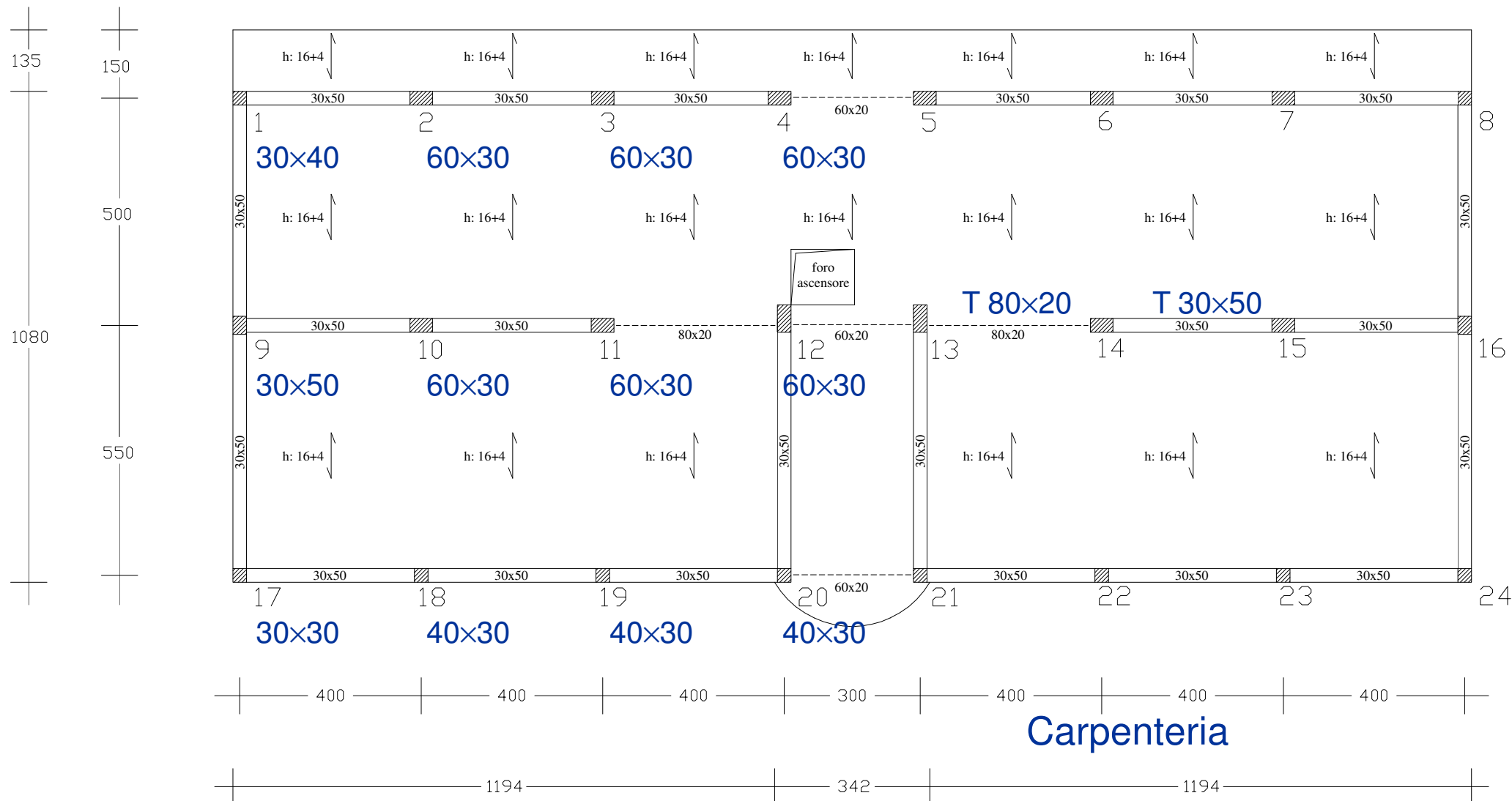
Determinazione più precisa
delle caratteristiche di sollecitazione

Analisi modale (con $q = 1$)

Si procede come per nuovi edifici:

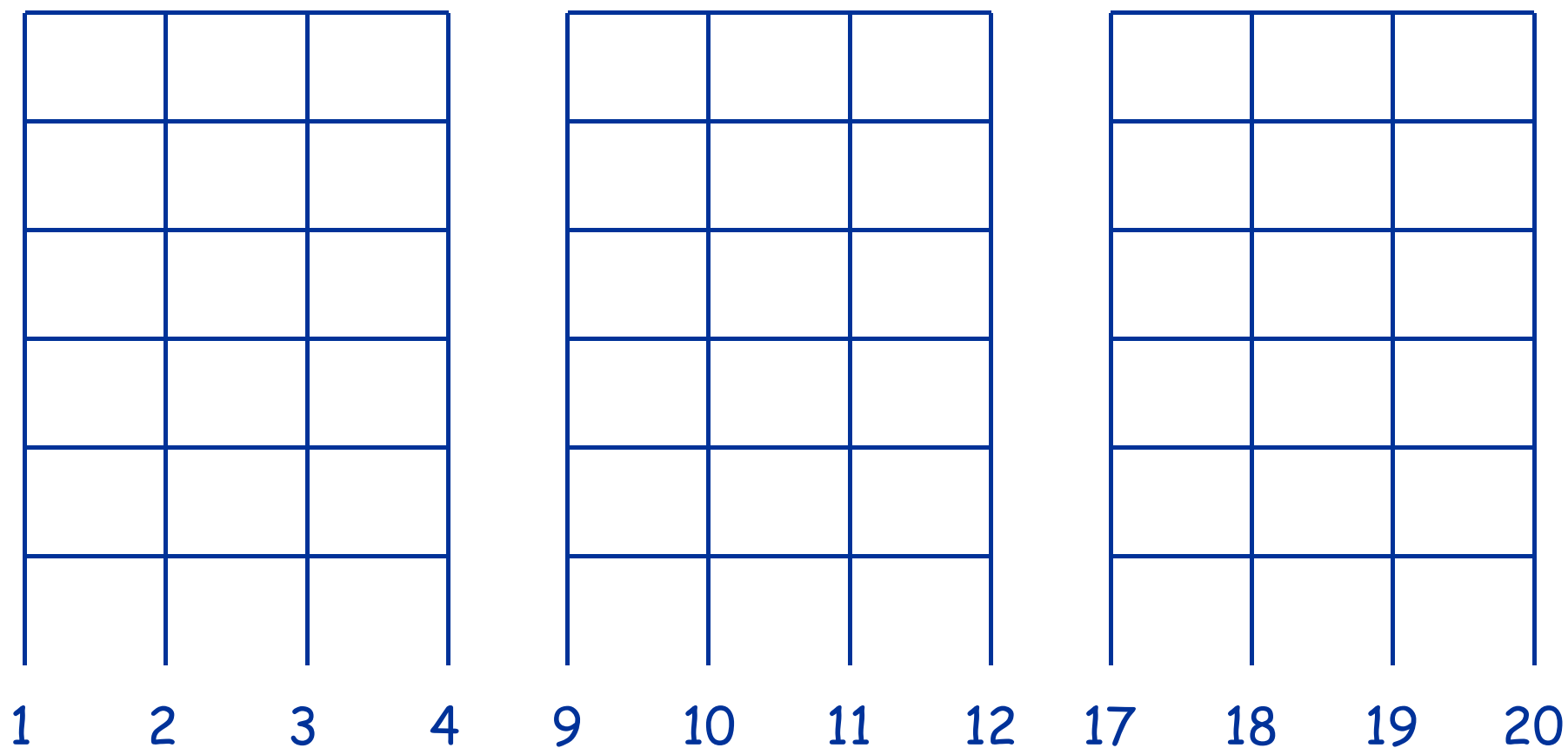
- Determinazione delle masse di piano, con $g_k + \psi_2 q_k$
- Definizione dello spettro di risposta elastico per SLV
nell'esempio: periodo di ritorno 475 anni, suolo B
- Effettuazione dell'analisi modale con spettro elastico ($q = 1$)

Edificio in esame



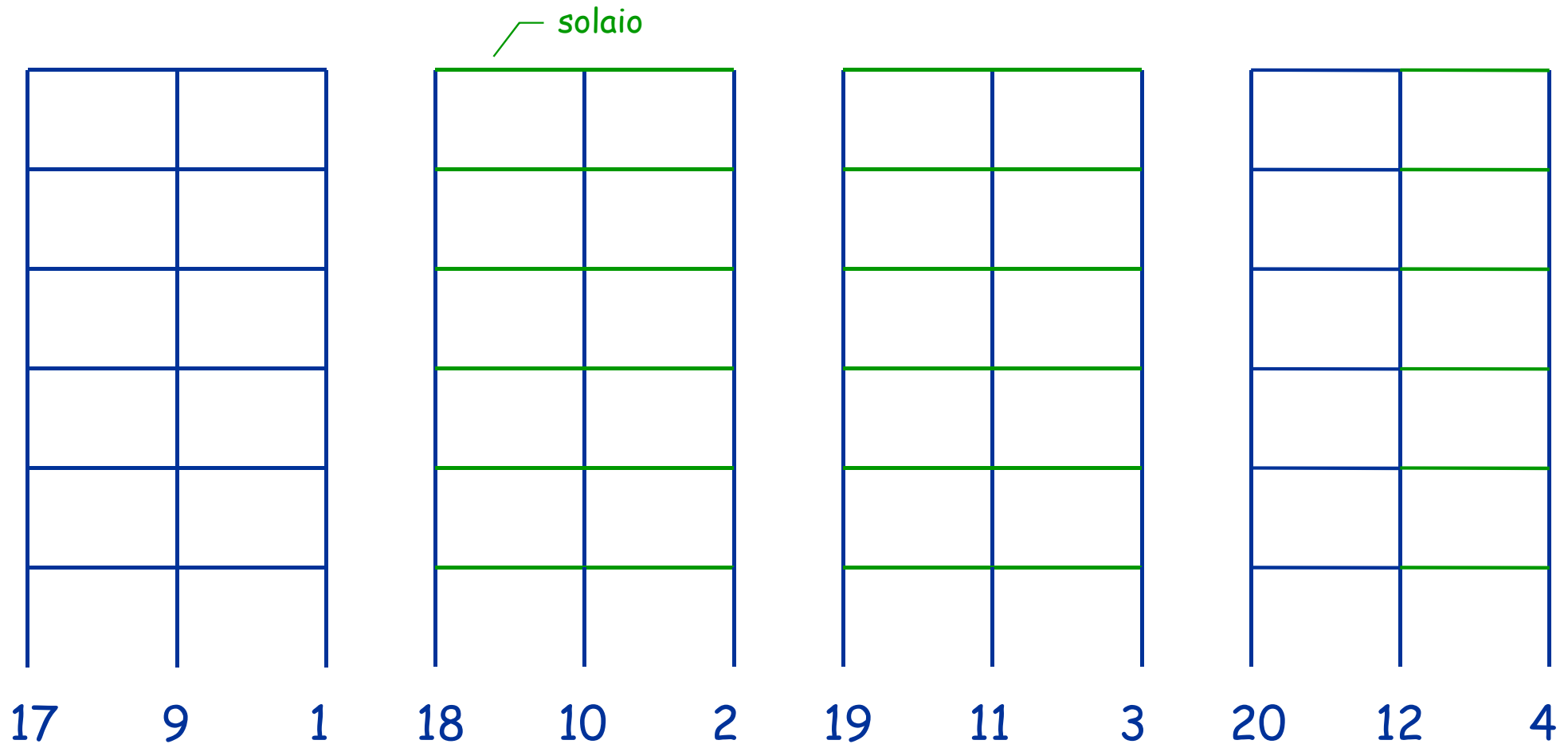
Schema geometrico

treno di telai - direzione x



Periodo: $T = 1.06 \text{ s}$

Schema geometrico treno di telai - direzione y



Periodo: $T = 1.68 \text{ s}$

Pilastri

Sforzo normale in condizioni sismiche

	1										con sisma	
	N pia	N	Ac,nec	b	h	Ac	As,nec	n	fi	As	N pia	N
ultimo	81.5	81.5	126	30	30	900	2.7	4	12	4.5	66.1	66.1
5	113.0	194.5	300	30	30	900	2.7	4	12	4.5	97.6	163.7
4	113.0	307.5	474	30	30	900	2.8	4	12	4.5	97.6	261.3
3	113.0	420.5	648	30	30	900	3.9	4	12	4.5	97.6	358.9
2	113.0	533.5	823	30	30	900	4.9	4	14	6.2	97.6	456.5
1	113.0	646.5	997	30	40	1200	6.0	6	14	9.2	99.9	556.4
	9											
	N pia	N									N pia	N
ultimo	110.0	110.0									94.6	94.6
	150.3	260.3									133.1	227.7
	150.3	410.6									133.1	360.8
	150.3	560.9									133.1	493.9
	150.3	711.2									135.4	629.3
	150.3	861.5									137.6	766.9
	17											
	N pia	N									N pia	N
ultimo	57.5	57.5									50.5	50.5
	89.0	146.5									82.0	132.5
	89.0	235.5									82.0	214.5
	89.0	324.5									82.0	296.5
	89.0	413.5	638	30	30	900	3.8	4	12	4.5	82.0	378.5
	89.0	502.5	775	30	30	900	4.6	4	14	6.2	82.0	460.5

Dallo schema con carichi verticali ridotti o dallo stesso foglio di calcolo usato per il progetto simulato si ottiene lo sforzo normale da carichi verticali in presenza di sisma, conformemente alle NTC 08

vedi file Excel "Edificio 2014" - foglio Pilastri

Travi

Momenti flettenti da q in condizioni sismiche

			luce		4.00		4.00		4.00	
Trave				1		2		3		4
1...4	ultimo			M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-
		sism	25.3	16.9	28.9	40.5	25.3	33.7	25.3	25.3
		max	33.0	22.0	37.7	52.8	33.0	44.0	33.0	33.0
		As		2.5	4.2	5.9	3.7	4.9	3.7	3.7
			n,sup	2	0	4	0	4	0	3
			fi	14	0	14	0	14	0	14
			n,inf	2	3	2	3	2	3	2
			fi	14	14	14	14	14	14	14

	altri	sism	32.3	21.5	36.9	51.7	32.3	43.1	32.3	32.3
		max	40.0	26.7	45.7	64.0	40.0	53.3	40.0	40.0
		As		3.0	5.1	7.2	4.5	6.0	4.5	4.5
			n,sup	2	0	5	0	4	0	3
							0	14	0	14
							3	2	3	2
							14	14	14	14

Dallo stesso foglio di calcolo usato per il progetto simulato o dallo schema con carichi verticali ridotti si ottiene il momento flettente da carichi verticali in presenza di sisma

Travi

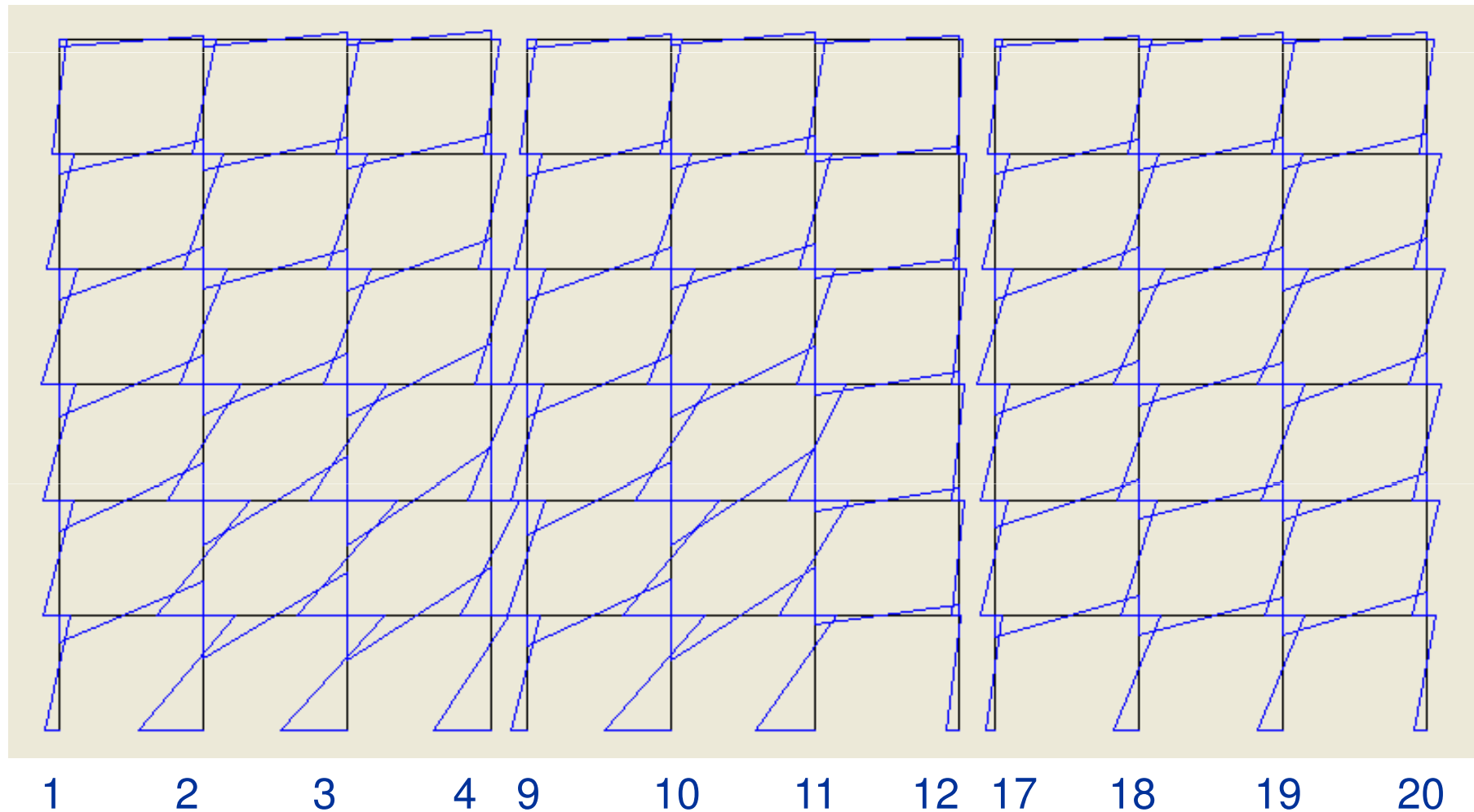
Momenti flettenti da q in condizioni sismiche

trave	piano	Msin (kNm)	Mdes (kNm)	Vsin (kN)	Vdes (kN)
17 - 9	6	-11.01	-11.21	17.29	-17.36
17 - 9	5	-24.07	-30.59	35.39	-37.76
17 - 9	4	-23.67	-31.58	35.14	-38.01
17 - 9	3	-23.00	-32.91	34.77	-38.38
17 - 9	2	-22.37	-34.82	34.31	-38.84
17 - 9	1	-18.87	-37.61	33.17	-39.98
9 - 1	6	-10.54	-8.43	16.17	-15.33
9 - 1	5	-28.34	-18.69	35.18	-31.32
9 - 1	4	-28.98	-18.56	35.33	-31.17
9 - 1	3	-31.32	-16.65	36.18	-30.32
9 - 1	2	-34.44	-13.99	37.34	-29.16
9 - 1	1	-35.38	-14.98	37.33	-29.17
18 - 10	6	-13.15	-14.31	15.19	-15.61
18 - 10	5	-14.06	-13.99	15.41	-15.39
18 - 10	4	-13.76	-14.14	15.33	-15.47
18 - 10	3	-13.84	-14.10	15.35	-15.45
					-15.43
					-15.47
					-13.63
					-13.94
					-13.86
					-13.85
					-13.84
					-13.83

Dallo stesso foglio di calcolo usato per il progetto simulato o dallo **schema con carichi verticali ridotti** si ottiene il momento flettente da carichi verticali in presenza di sisma

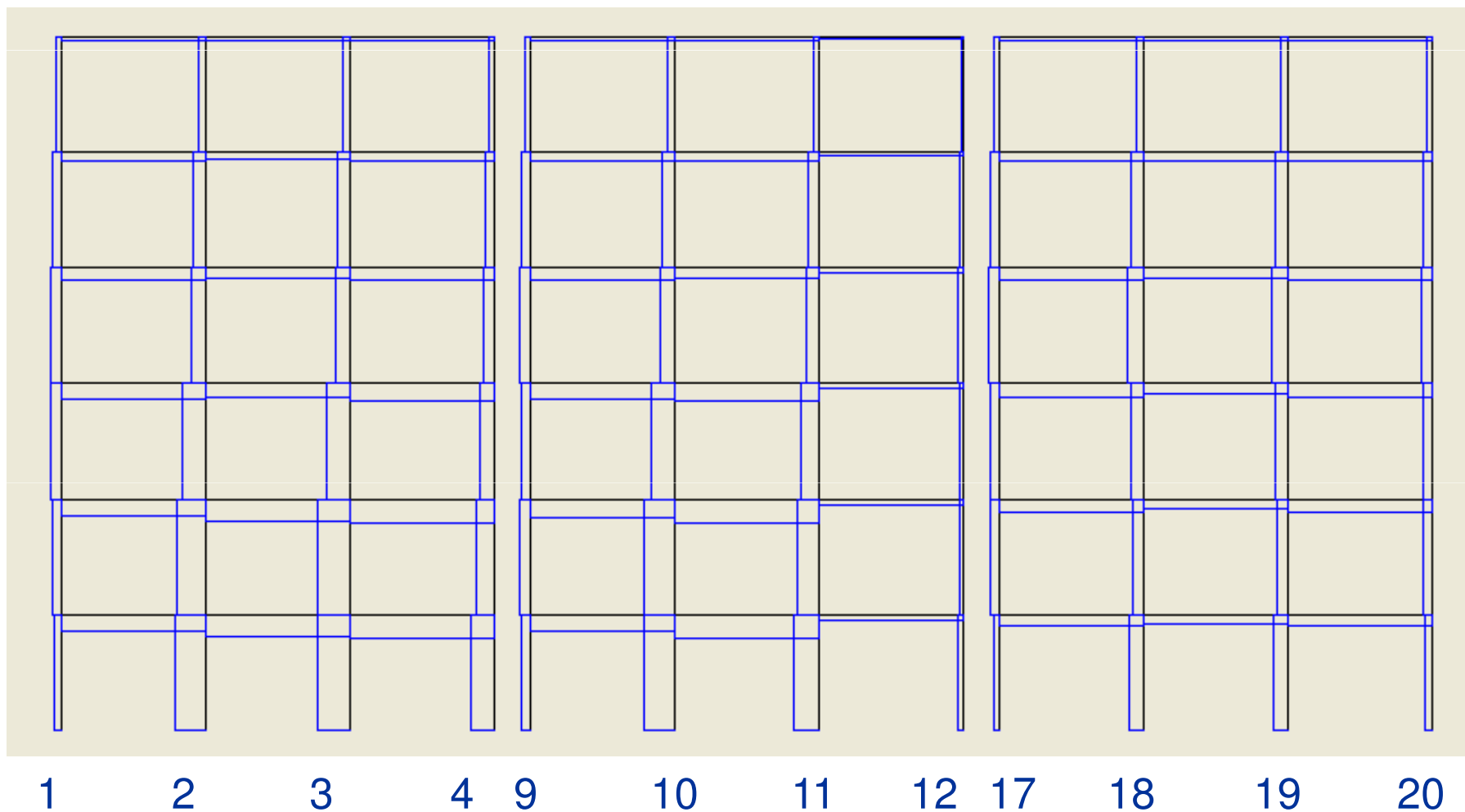
Sisma in direzione x

diagramma del momento flettente



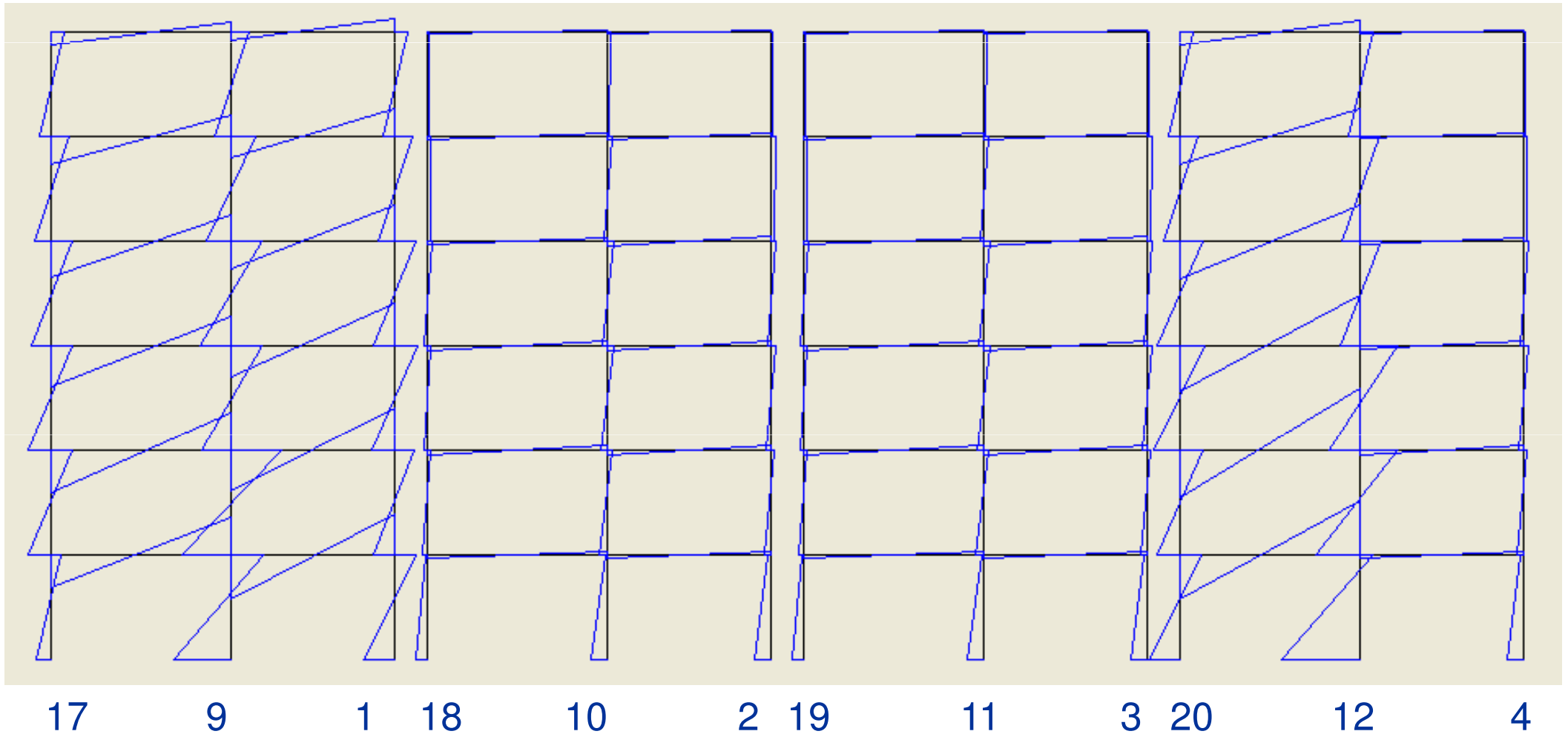
Sisma in direzione x

diagramma del taglio



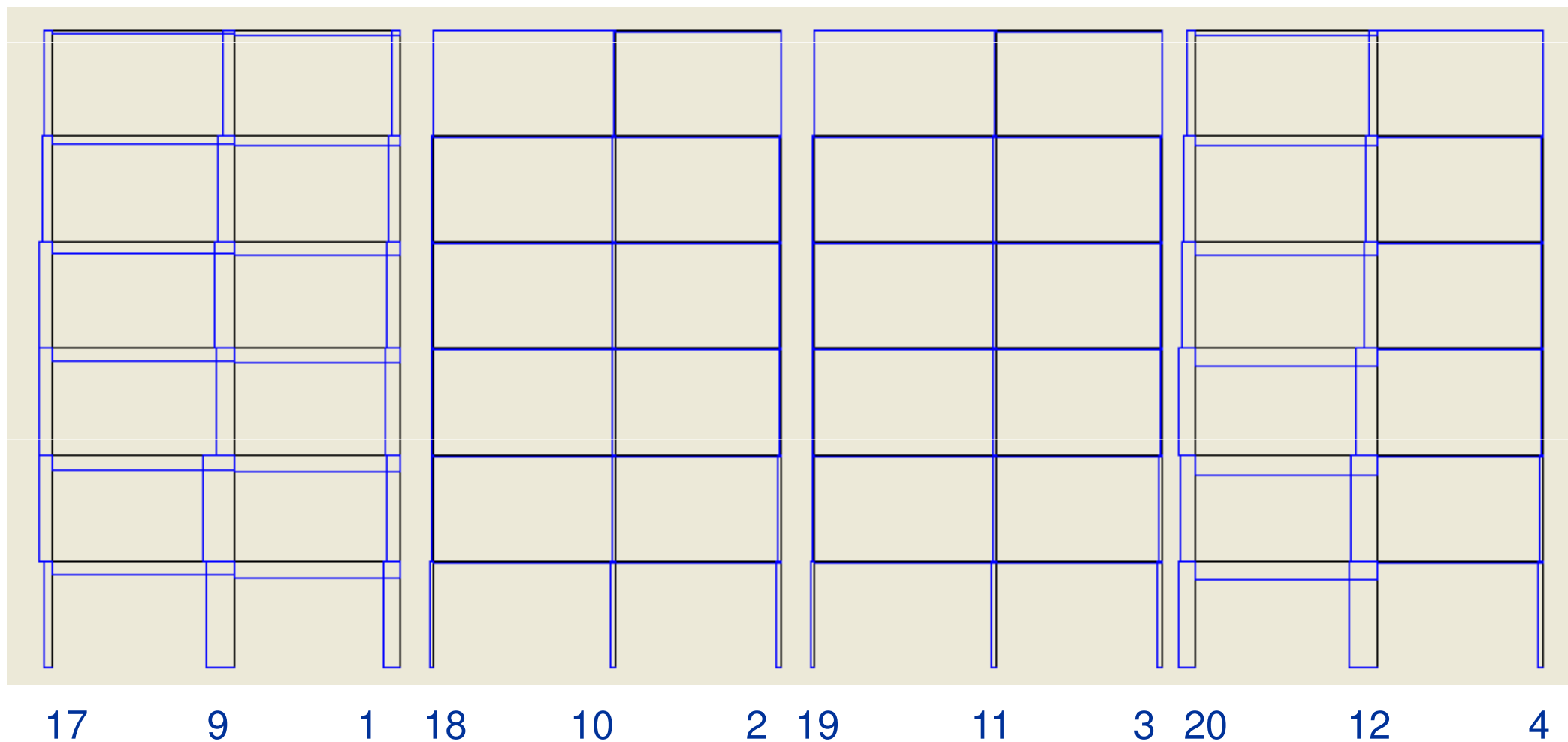
Sisma in direzione y

diagramma del momento flettente



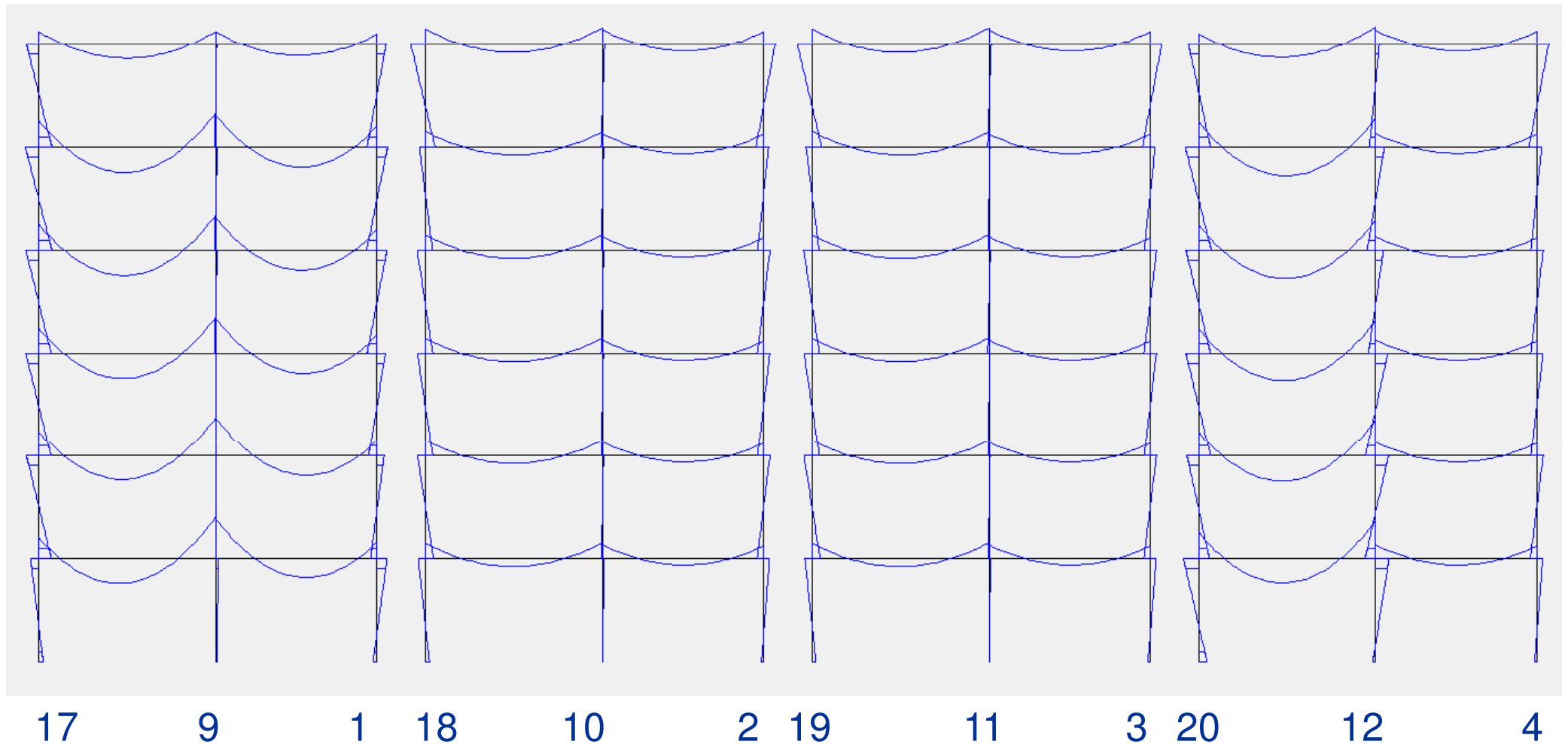
Sisma in direzione y

diagramma del taglio



Telai in direzione y, carichi verticali

diagramma del momento flettente



Risultati, con $a_g = 0.25 g$ pilastri, direzione x

pilastro	piano	momento sup. (kNm)	momento inf. (kNm)	taglio (kN)	sforzo normale (kN)	Nq
		analisi modale	q=1, $a_g/g=$	0.250		
1	6	89.92	-76.42	51.95	34.46	66.1
1	5	154.46	-143.43	93.02	129.85	163.7
1	4	200.86	-203.44	126.30	268.28	261.3
1	3	173.36	-184.94	111.93	430.07	358.9
1	2	166.28	-175.33	106.74	601.43	456.5
1	1	125.16	-152.73	86.84	759.04	556.4
2	6	130.59	-122.78	79.17	13.39	108.0
2	5	215.70	-211.50	133.49	18.66	244.0
2	4	263.48	-252.56	161.24	-30.36	380.0
2	3	426.34	-393.12	255.99	-32.93	518.2
2	2	514.65	-516.45	322.09	42.92	658.7
2	1	363.79	-722.63	339.43	108.46	801.4
3	6	131.79	-123.98	79.92	-12.69	108.0
3	5	216.58	-211.99	133.92	-18.88	244.0
3	4	265.58	-256.94	163.27	33.88	380.0
3	3	446.64	-417.48	269.97	58.91	518.2
3	2	565.63	-562.64	352.49	77.56	658.7
3	1	411.50	-746.51	361.81	92.62	801.4
4	6	91.61	-77.85	52.92	-35.52	108.0
4	5	156.77	-146.76	94.80	-132.80	244.0
4	4	193.03	-183.43	117.55	-271.21	380.0
4	3	280.40	-263.24	169.56	-459.92	518.2
4	2	318.81	-346.82	207.65	-706.08	658.7
4	1	200.06	-640.42	262.41	-948.23	801.4

Risultati, con $a_g = 0.25 g$ travi, direzione x

trave	piano	Msin (kNm)	Mdes (kNm)	Vsin (kN)	Vdes (kN)
		analisi modale	q=1, ag/g=	0.250	
1 - 2	6	89.92	-48.49	-34.46	-34.46
1 - 2	5	226.17	-159.29	-96.36	-96.36
1 - 2	4	335.62	-240.26	-143.97	-143.97
1 - 2	3	369.28	-326.74	-173.99	-173.99
1 - 2	2	348.80	-405.94	-188.68	-188.68
1 - 2	1	300.17	-389.86	-172.51	-172.51
2 - 3	6	84.75	-83.27	-42.01	-42.01
2 - 3	5	175.89	-174.33	-87.56	-87.56
2 - 3	4	227.56	-227.65	-113.80	-113.80
2 - 3	3	342.74	-334.29	-169.26	-169.26
2 - 3	2	492.06	-477.05	-242.28	-242.28
2 - 3	1	487.99	-476.95	-241.23	-241.23
3 - 4	6	50.98	-91.61	-35.52	-35.52
3 - 4	5	162.99	-229.90	-98.21	-98.21
3 - 4	4	242.67	-332.04	-143.68	-143.68
3 - 4	3	359.81	-453.70	-203.38	-203.38
3 - 4	2	496.53	-571.48	-267.00	-267.00
3 - 4	1	494.81	-543.93	-259.68	-259.68
9 - 10	6	93.13	-60.47	-38.40	-38.40
9 - 10	5	230.69	-165.89	-99.14	-99.14
9 - 10	4	339.26	-242.74	-145.50	-145.50
9 - 10	3	369.79	-325.42	-173.79	-173.79
9 - 10	2	379.77	-418.37	-199.54	-199.54
9 - 10	1	347.07	-409.28	-189.09	-189.09

Risultati, con $a_g = 0.25 g$ pilastri, direzione y

pilastro	piano	momento sup. (kNm)	momento inf. (kNm)	taglio (kN)	sforzo normale (kN)	Nq
		analisi modale	q=1, $a_g/g=$	0.250		
17	6	156.99	-132.89	90.49	48.94	50.5
17	5	211.16	-196.70	127.28	154.16	132.5
17	4	254.49	-245.74	156.11	287.25	214.5
17	3	264.22	-272.25	167.51	429.78	296.5
17	2	251.57	-277.50	165.28	585.98	378.5
17	1	130.86	-175.28	95.64	723.57	460.5
9	6	219.80	-207.93	133.66	4.47	94.6
9	5	308.88	-303.35	191.30	16.90	227.7
9	4	379.28	-378.55	236.81	33.84	360.8
9	3	376.25	-354.09	228.18	53.34	493.9
9	2	621.90	-598.26	381.22	75.00	629.3
9	1	414.39	-715.27	352.75	121.43	766.9
1	6	157.89	-135.63	91.64	-53.11	66.1
1	5	216.03	-202.52	130.64	-170.83	163.7
1	4	261.74	-253.56	160.85	-321.00	261.3
1	3	274.86	-284.94	174.82	-483.10	358.9
1	2	250.51	-260.23	159.53	-660.98	456.5
1	1	255.10	-387.99	200.92	-844.04	556.4
18	6	23.80	28.21	-10.79	8.46	76.8
18	5	52.87	37.19	22.49	20.93	181.6
18	4	54.07	-45.07	25.73	36.96	286.4
18	3	48.93	-45.90	25.31	54.12	391.2
18	2	33.89	-58.04	25.54	70.33	496.0
18	1	-22.91	-139.40	39.65	82.46	603.0

Risultati, con $a_g = 0.25 g$ travi, direzione y

trave	piano	Msin (kNm)	Mdes (kNm)	Vsin (kN)	Vdes (kN)
		analisi modale	q=1, ag/g=	0.250	
17 - 9	6	156.99	-112.20	-48.94	-48.94
17 - 9	5	332.30	-251.28	-106.10	-106.10
17 - 9	4	436.09	-329.30	-139.16	-139.16
17 - 9	3	493.94	-363.66	-155.93	-155.93
17 - 9	2	514.48	-469.98	-178.98	-178.98
17 - 9	1	406.07	-461.99	-157.83	-157.83
9 - 1	6	107.68	-157.89	-53.11	-53.11
9 - 1	5	254.60	-339.59	-118.84	-118.84
9 - 1	4	338.33	-449.04	-157.47	-157.47
9 - 1	3	377.47	-512.23	-177.94	-177.94
9 - 1	2	493.01	-526.82	-203.95	-203.95
9 - 1	1	539.08	-511.51	-210.12	-210.12
18 - 10	6	23.80	-22.71	-8.46	-8.46
18 - 10	5	35.09	-34.53	-12.66	-12.66
18 - 10	4	47.19	-46.11	-16.96	-16.96
18 - 10	3	53.08	-52.27	-19.15	-19.15
18 - 10	2	52.14	-51.68	-18.88	-18.88
18 - 10	1	39.73	-39.59	-14.42	-14.42
10 - 2	6	24.80	-25.90	-10.14	-10.14
10 - 2	5	37.86	-38.42	-15.25	-15.25
10 - 2	4	50.53	-51.60	-20.43	-20.43
10 - 2	3	57.57	-58.56	-23.23	-23.23
10 - 2	2	57.06	-57.78	-22.97	-22.97
10 - 2	1	43.90	-44.42	-17.66	-17.66

Risultati, con $a_g = 0.25 g$ spostamenti orizzontali

direzione x

traverso	spostamento assoluto (mm)	spostamento relativo (mm)
6	119.282	14.166
5	107.605	23.586
4	86.782	29.592
3	58.958	25.488
2	33.862	21.890
1	11.999	11.999

direzione y

traverso	spostamento assoluto (mm)	spostamento relativo (mm)
6	186.828	24.020
5	168.573	34.794
4	139.495	42.222
3	100.923	43.966
2	58.236	38.905
1	19.508	19.508