

Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura

Progetto di costruzioni in zona sismica
A.A. 2024/2025

21 – GIUDIZIO SULLA STRUTTURA: ANALISI MODALE

Edoardo M. Marino, Università degli Studi di Catania

Preliminarmente cosa guardare nell'analisi modale?

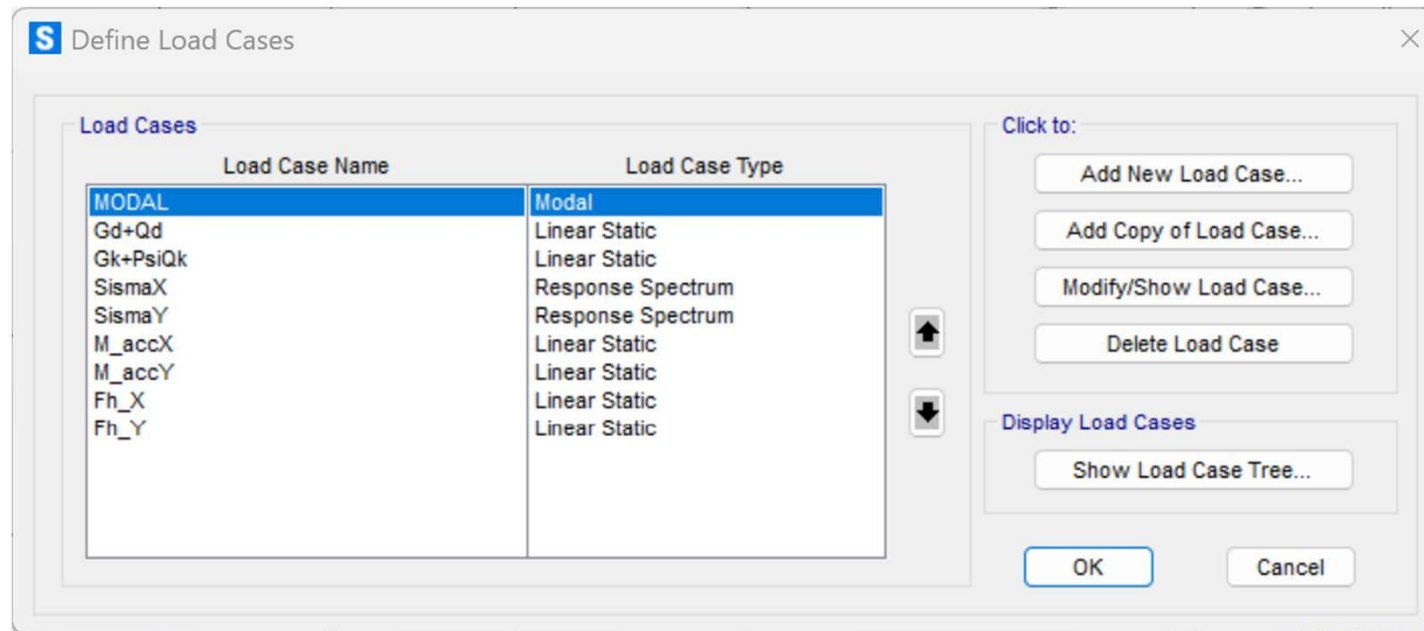
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
Sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior contributo
Prevale un solo modo, o più di uno?
- Esaminare i periodi dei modi predominanti
Corrispondono alle previsioni o no?

Preliminarmente cosa guardare nell'analisi modale?

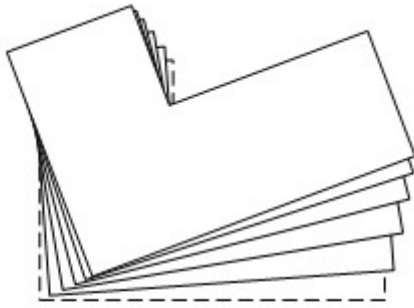
- Esaminare le deformate modali (indipendentemente dalla direzione del sisma)
Sono disaccoppiate oppure accoppiate?
- Esaminare le masse partecipanti (per ciascuna direzione del sisma) per vedere quali modi danno maggior contributo
Prevale un solo modo, o più di uno?
- Esaminare i periodi dei modi predominanti
Corrispondono alle previsioni o no?
- Esaminare l'involuppo degli spostamenti modali, per le due direzioni del sisma
 - spostamenti analoghi nelle due direzioni o molto diversi?
 - solo traslazione, rotazione dell'impalcato modesta oppure forte?
- Esaminare i momenti massimi nei pilastri e nelle travi
Rispettano le previsioni o no?

Risultati analisi modale

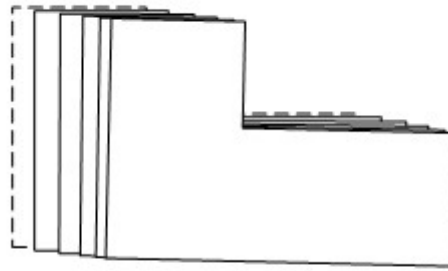
Sono contenuti nell'output del Load Case «MODAL»



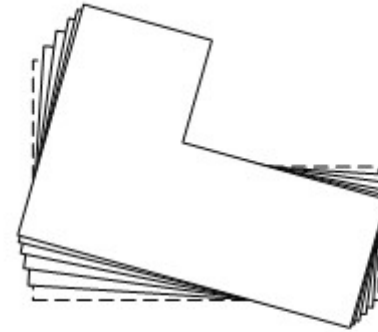
Modi di vibrazione



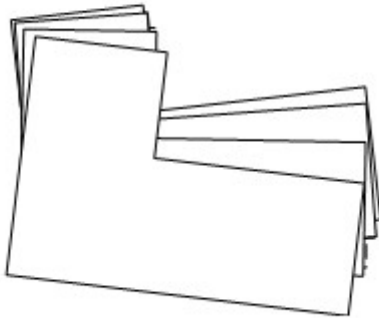
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



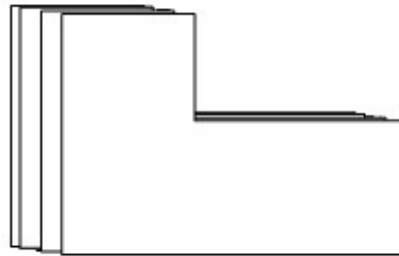
Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.468 \text{ s}$



Modo 4 $T = 0.201 \text{ s}$



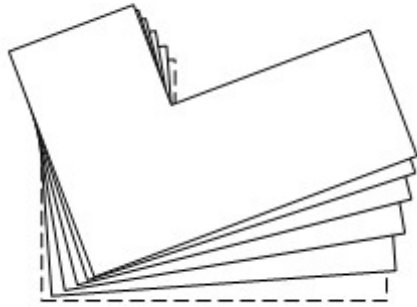
Modo 5 $T = 0.191 \text{ s}$



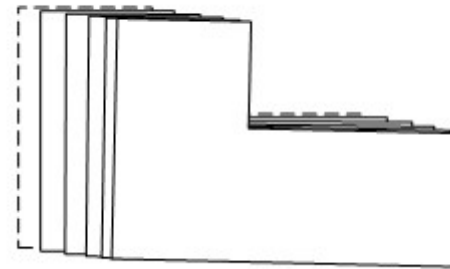
Modo 6 $T = 0.159 \text{ s}$

Modi di vibrazione

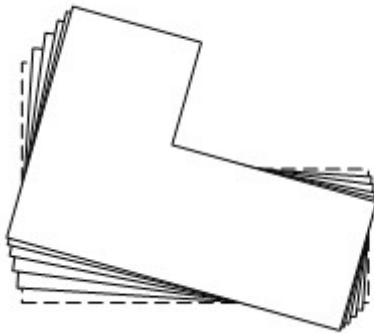
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.468 \text{ s}$

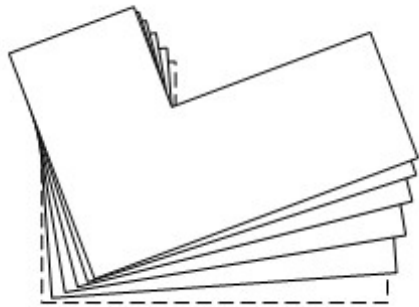


Il modo 2 è sostanzialmente di traslazione secondo x

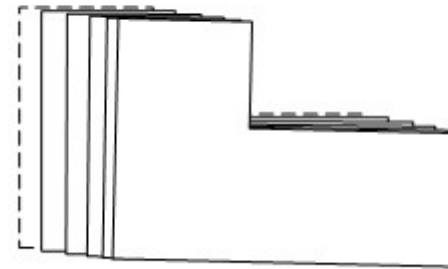
I modi 1 e 3 sono accoppiati (traslazione secondo y e rotazione)

Modi di vibrazione

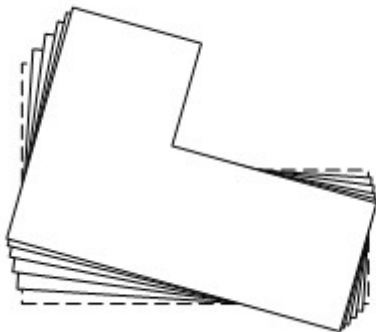
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.468 \text{ s}$



La struttura è torsionalmente rigida?

Direzione X

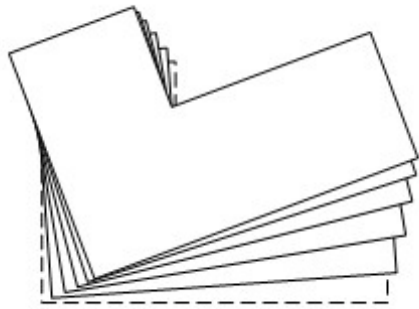
$$\frac{T_x}{T_\theta} = \frac{0.561}{0.468} = 1.20$$

Direzione Y

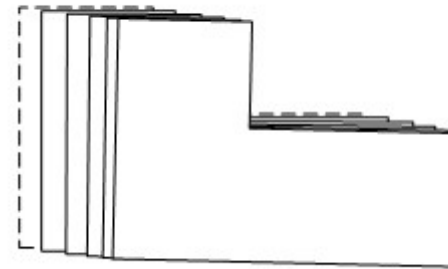
$$\frac{T_y}{T_\theta} = \frac{0.607}{0.468} = 1.30$$

Modi di vibrazione

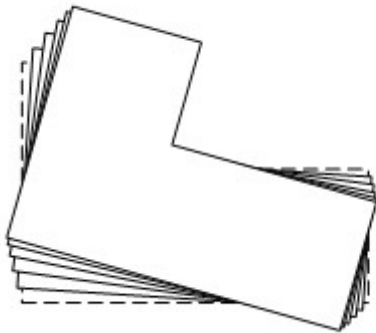
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.468 \text{ s}$

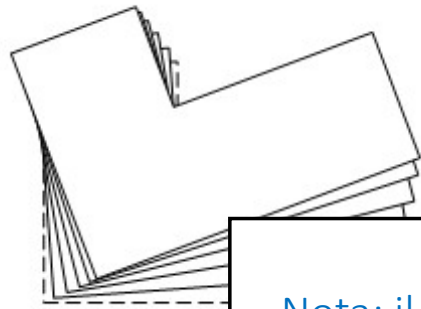


La struttura è torsionalmente rigida perché il rapporto tra periodo traslazionale e rotazionale è maggiore di 1

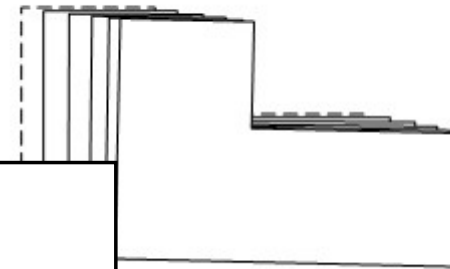
Le NTC18 penalizzano la struttura (con un q basso) se il rapporto è ≤ 1.0

Modi di vibrazione

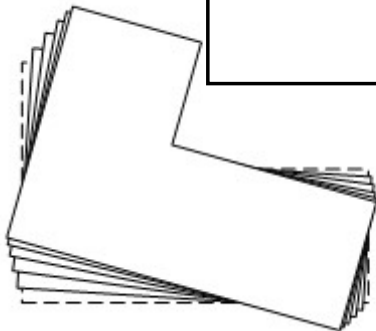
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T =$



Nota: il confronto dovrebbe
essere fatto con riferimento ai
modi disaccoppiati

rsionalmente rigida
to tra periodo

traslazionale e rotazionale è maggiore di 1

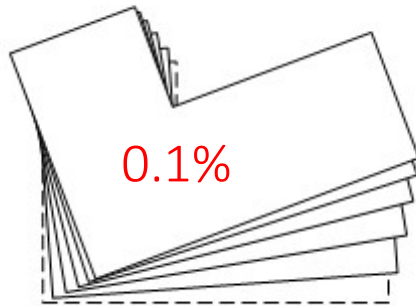
Le NTC18 penalizzano la struttura (con un
q basso) se il rapporto è ≤ 1.0

Masse partecipanti

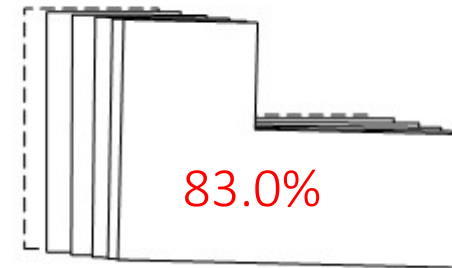
TABLE: Modal Participating Mass Ratios								
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.606965	0.08%	60.0%	0	0.00	0.60
MODAL	Mode	2	0.561218	83.00%	0.1%	0	0.83	0.60
MODAL	Mode	3	0.468025	0.00%	23.0%	0	0.83	0.83
MODAL	Mode	4	0.201514	0.05%	9.2%	0	0.83	0.92
MODAL	Mode	5	0.190927	11.00%	0.1%	0	0.94	0.92
MODAL	Mode	6	0.158665	0.04%	2.0%	0	0.94	0.94
MODAL	Mode	7	0.127013	1.44%	0.1%	0	0.96	0.94
MODAL	Mode	8	0.123555	0.05%	2.0%	0	0.96	0.96
MODAL	Mode	9	0.104276	0.04%	0.1%	0	0.96	0.96
MODAL	Mode	10	0.094352	0.50%	1.1%	0	0.96	0.97
MODAL	Mode	11	0.093499	1.89%	0.2%	0	0.98	0.98
MODAL	Mode	12	0.081316	0.01%	0.8%	0	0.98	0.98

Masse partecipanti sistema X

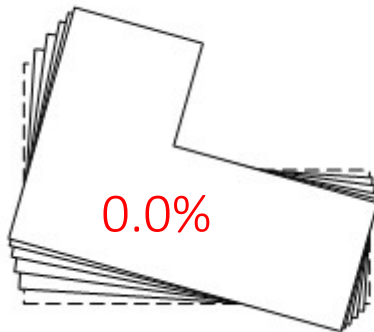
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.468 \text{ s}$

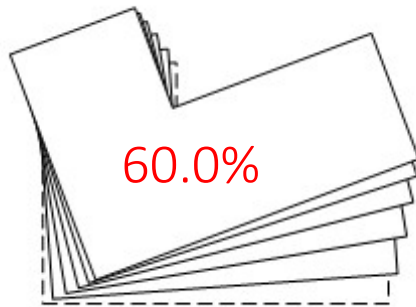


Il modo 2 dà il contributo massimo

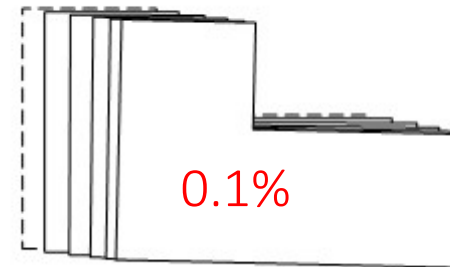
Il modo 5, di traslazione x con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (11.0%)

Masse partecipanti sistema Y

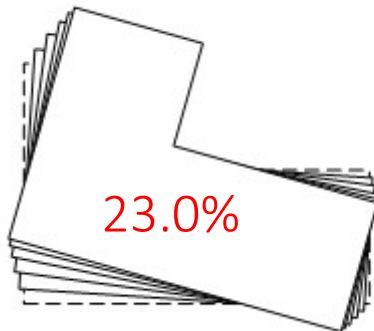
Modo 1 $T = 0.607 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.468 \text{ s}$



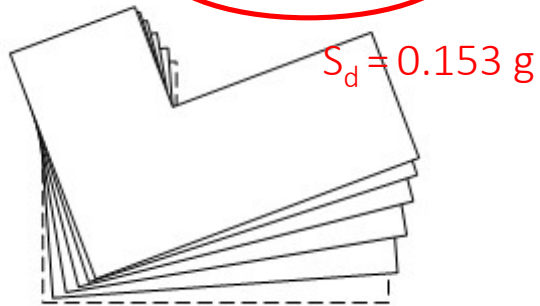
I modi 1 e 3 danno il contributo massimo

Il modo 4, di traslazione y e rotazione con spostamenti nei due versi, dà un ulteriore contributo (9.2%)

Periodi dei modi predominanti

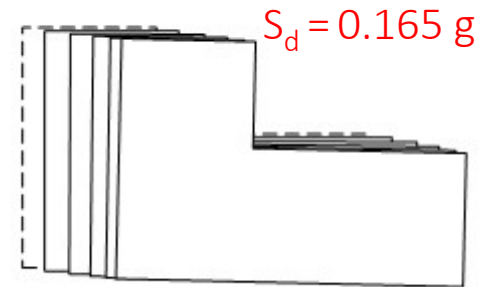
Modo 1

$T = 0.607 \text{ s}$



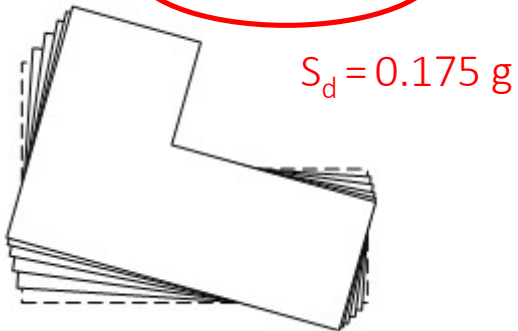
Modo 2

$T = 0.561 \text{ s}$



Modo 3

$T = 0.468 \text{ s}$



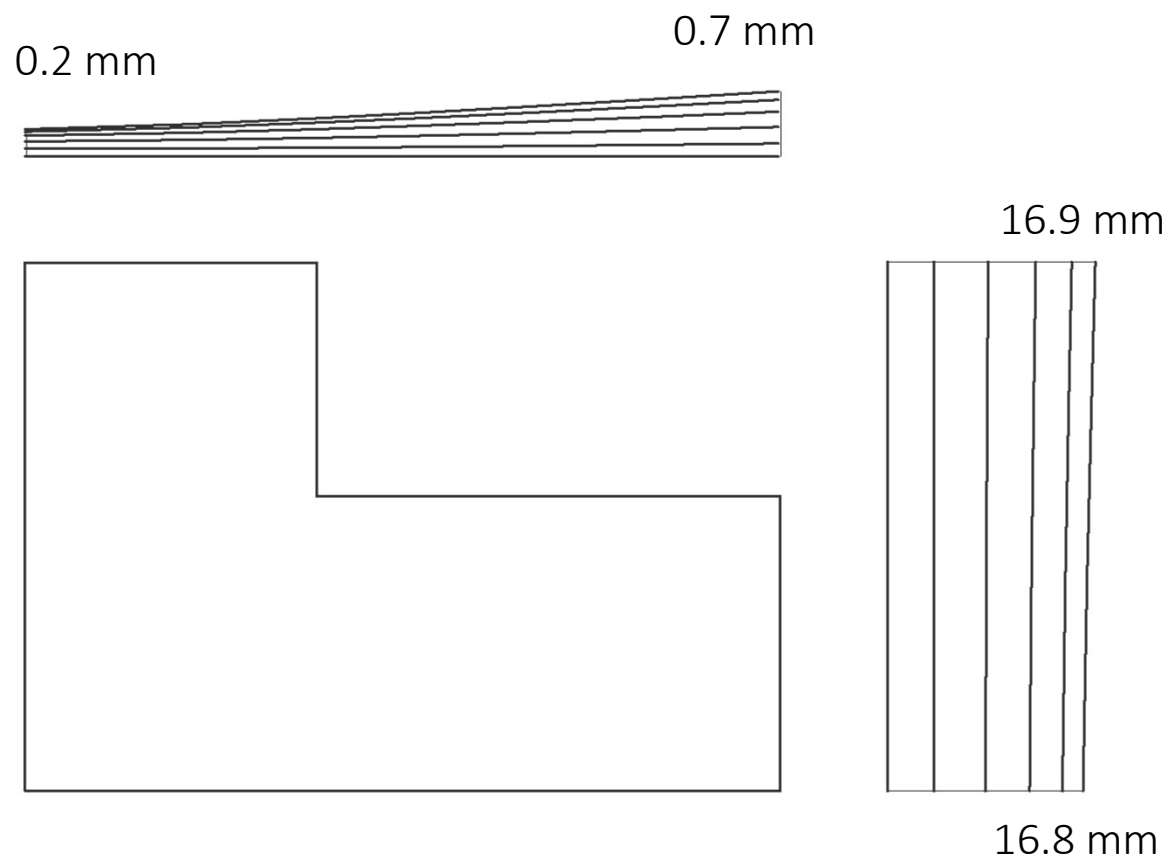
Periodi stimati: 0.608 s

$S_d = 0.153 \text{ g}$

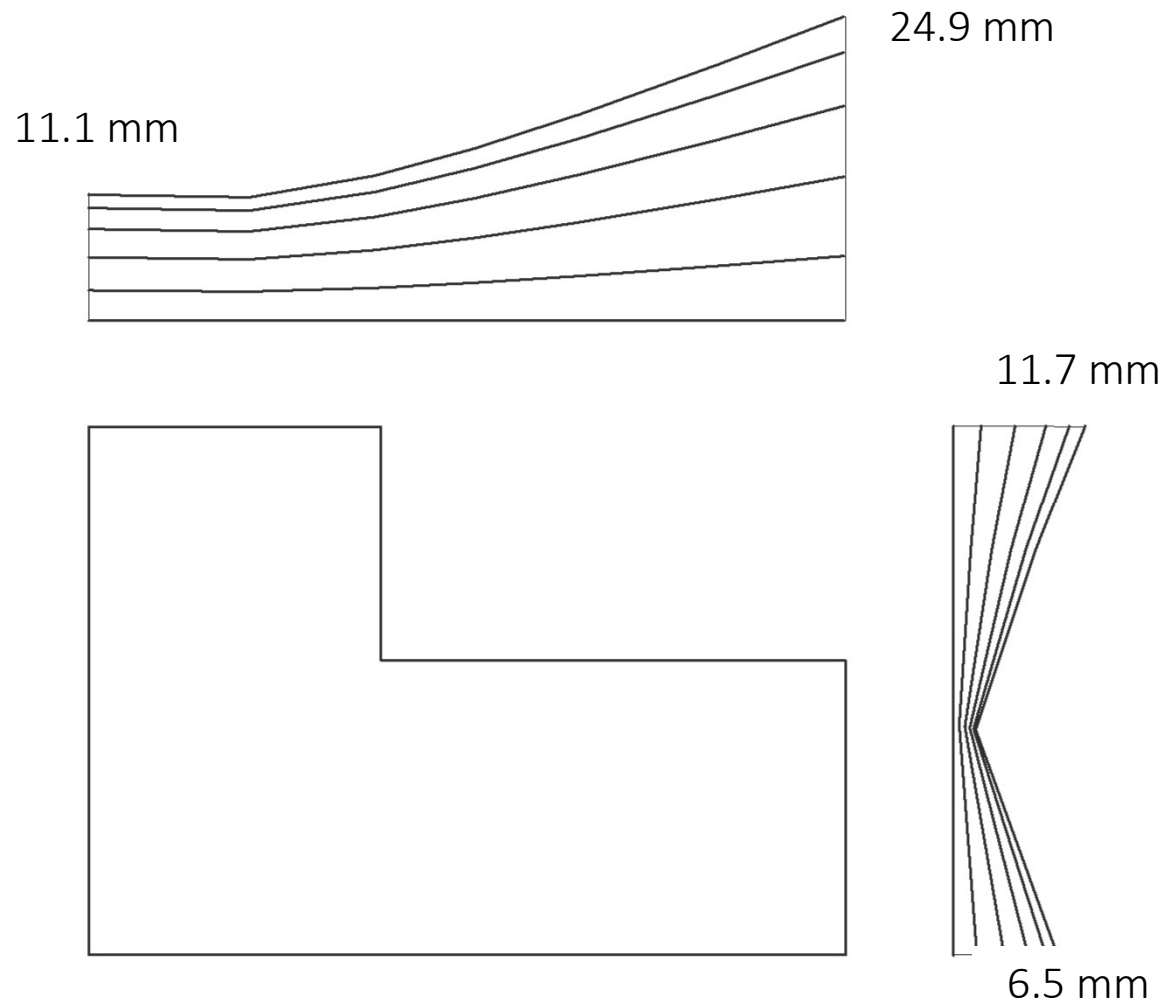
Il periodo è un po' più piccolo
direzione x

L'ordinata spettrale è quindi un po'
più grande

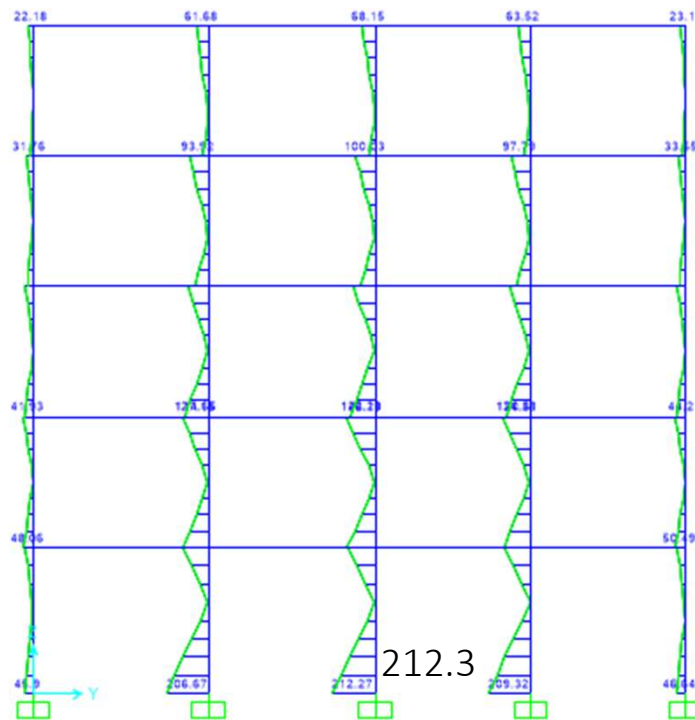
Inviluppo degli spostamenti massimi sisma X



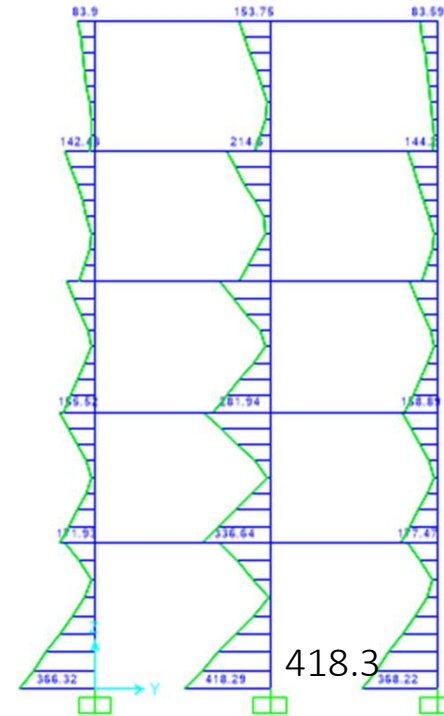
Inviluppo degli spostamenti massimi sisma Y



Massimo momento flettente dei pilastri

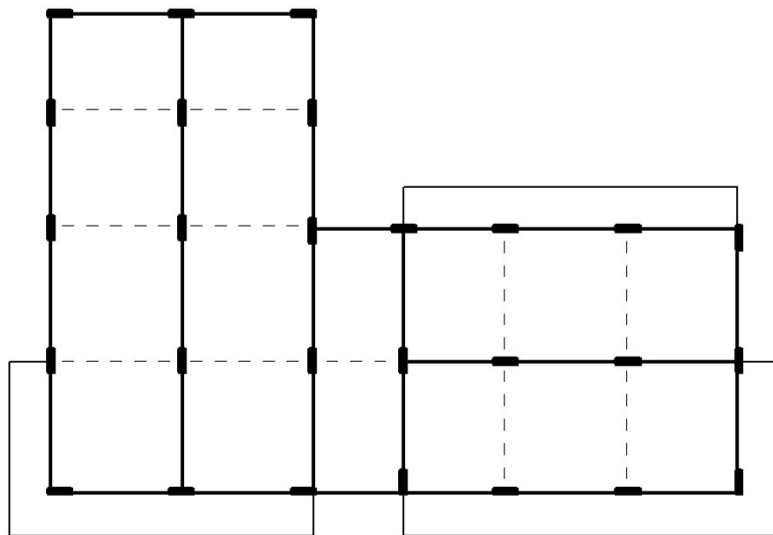
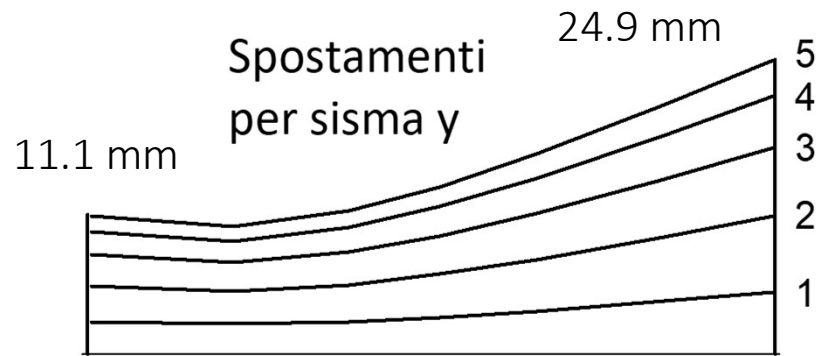


Telaio 1y

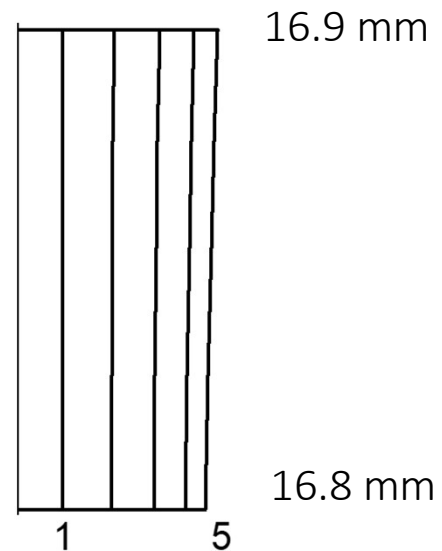


Telaio 7y

Inviluppo degli spostamenti massimi



Spostamenti
per sisma x

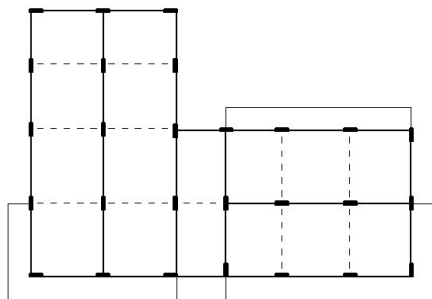


Inviluppo degli spostamenti massimi

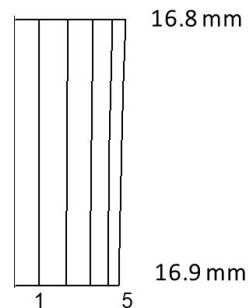
Rotazione non trascurabile
per sisma y (spostamenti
dovuti ai modi 1 e 3)



La parte destra andrebbe
irrigidita



Spostamenti
per sisma x



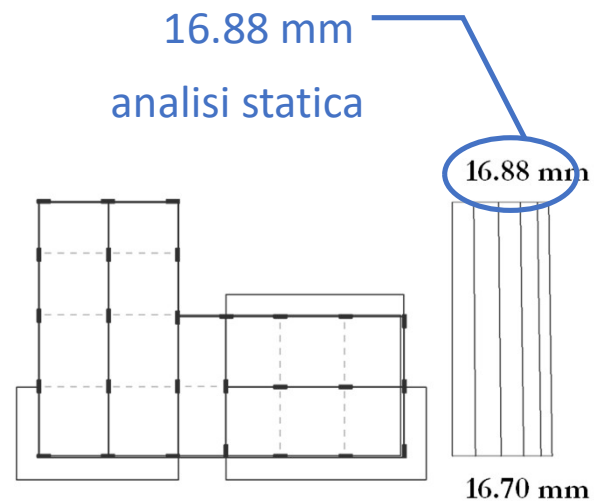
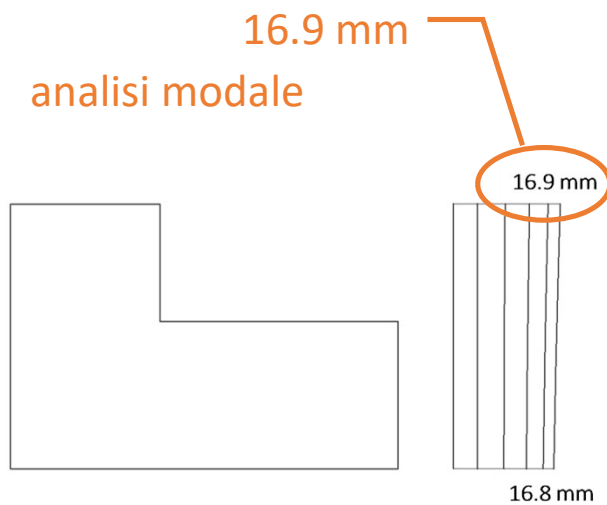
gli spostamenti massimi per
sisma y sono maggiori di circa il
50% rispetto a quelli per sisma x

Spostamenti per sisma x
uniformi
(vicini a quelli del modo 2)

Confronto tra analisi modale e analisi statica – sisma X

Spostamenti orizzontali

Sisma x: analisi modale – spostamenti uguali



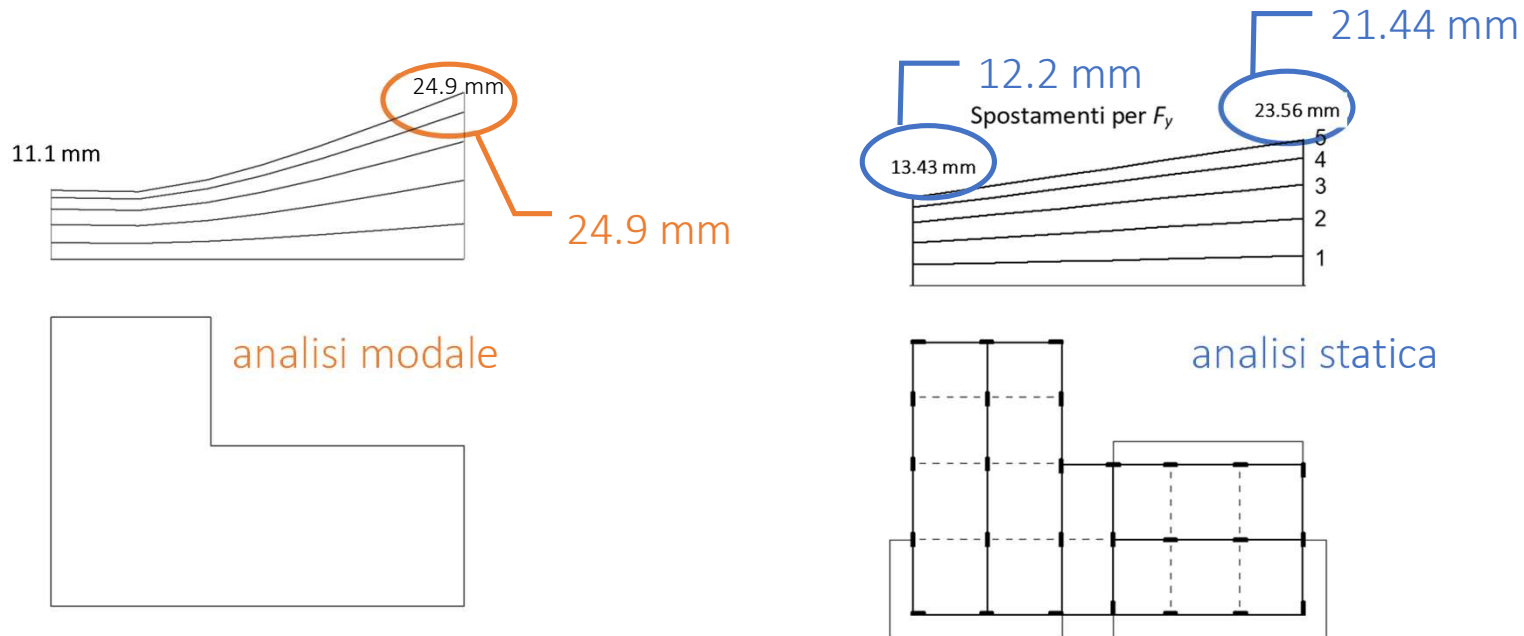
Confronto tra analisi modale e analisi statica – sisma Y

Spostamenti orizzontali

Sisma y: l'analisi modale accentua la rotazione

lato destro – spostamenti maggiori (16%)

lato sinistro – spostamenti minori



Confronto tra analisi modale e previsione – sisma X

Taglio dei pilastri

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio An. modale (kN)
5	44.0	55.5
4	79.9	87.9
3	109.7	122.7
2	133.4	150.5
1	138.0	146.5

Il taglio massimo è
abbastanza uniforme

Previsione ed analisi
modale forniscono
valori sostanzialmente
uguali

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma X

Momento flettente dei pilastri

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	70.3	115.6
4	127.8	160.7
3	175.5	208.4
2	213.4	241.7
1 testa	192.7	206.7
piede	289.0	320.9

Il momento massimo è abbastanza uniforme

Previsione e analisi modale forniscono valori sostanzialmente uguali

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma X

Momento flettente delle travi

Travi emergenti in direzione X

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	35.2	64.8
4	99.1	112.6
3	151.6	155.2
2	194.4	229.3
1	203.0	230.0

Il momento massimo è abbastanza uniforme

Previsione e analisi modale forniscono valori sostanzialmente uguali

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma Y

Taglio dei pilastri – lato destro

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio An. modale (kN)
5	42.9	71.5
4	77.9	115.2
3	106.3	164.4
2	128.5	205.9
1	134.1	185.05

Il taglio varia molto in base
alla posizione in pianta, a
causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono
maggiori di quelli previsione

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma Y

Momento flettente dei pilastri – lato destro

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	68.6	153.8
4	124.7	214.6
3	170.1	281.9
2	205.7	336.6
1 testa	187.2	248.0
piede	280.9	418.3

Il taglio varia molto in base alla posizione in pianta, a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono maggiori di quelli della previsione

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma Y

Momento flettente delle travi – lato destro

Travi emergenti dei telai in direzione Y

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	34.3	76.5
4	96.7	144.0
3	147.4	200.0
2	187.9	304.2
1	196.5	296.3

Il momento varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono maggiori di quelli della previsione

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma Y

Taglio dei pilastri – lato sinistro

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Taglio previsto (kN)	Taglio An. modale (kN)
5	42.9	31.6
4	77.9	53.9
3	106.3	73.8
2	128.5	88.6
1	134.1	96.0

Il taglio varia molto in base
alla posizione in pianta, a
causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono
minori di quelli della previsione

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma Y

Momento flettente dei pilastri – lato sinistro

Pilastri allungati in questa direzione

Piano	Momento previsto (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	68.6	68.1
4	124.7	100.0
3	170.1	126.2
2	205.7	142.3
1 testa	187.2	133.3
piede	280.9	212.3

Il taglio varia molto in base alla posizione in pianta, a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono minori di quelli della previsione

Confronto tra analisi modale e previsione – sisma Y

Momento flettente delle travi – lato sinistro

Travi emergenti dei telai in direzione Y

Pianoe	Momento previsto (kNm)	Momento An. modale (kNm)
5	34.3	34.8
4	96.7	67.0
3	147.4	93.0
2	187.9	137.7
1	196.5	142.0

Il momento varia in base alla posizione in pianta a causa della rotazione

I valori dell'analisi modale sono inferiori di quelli della previsione

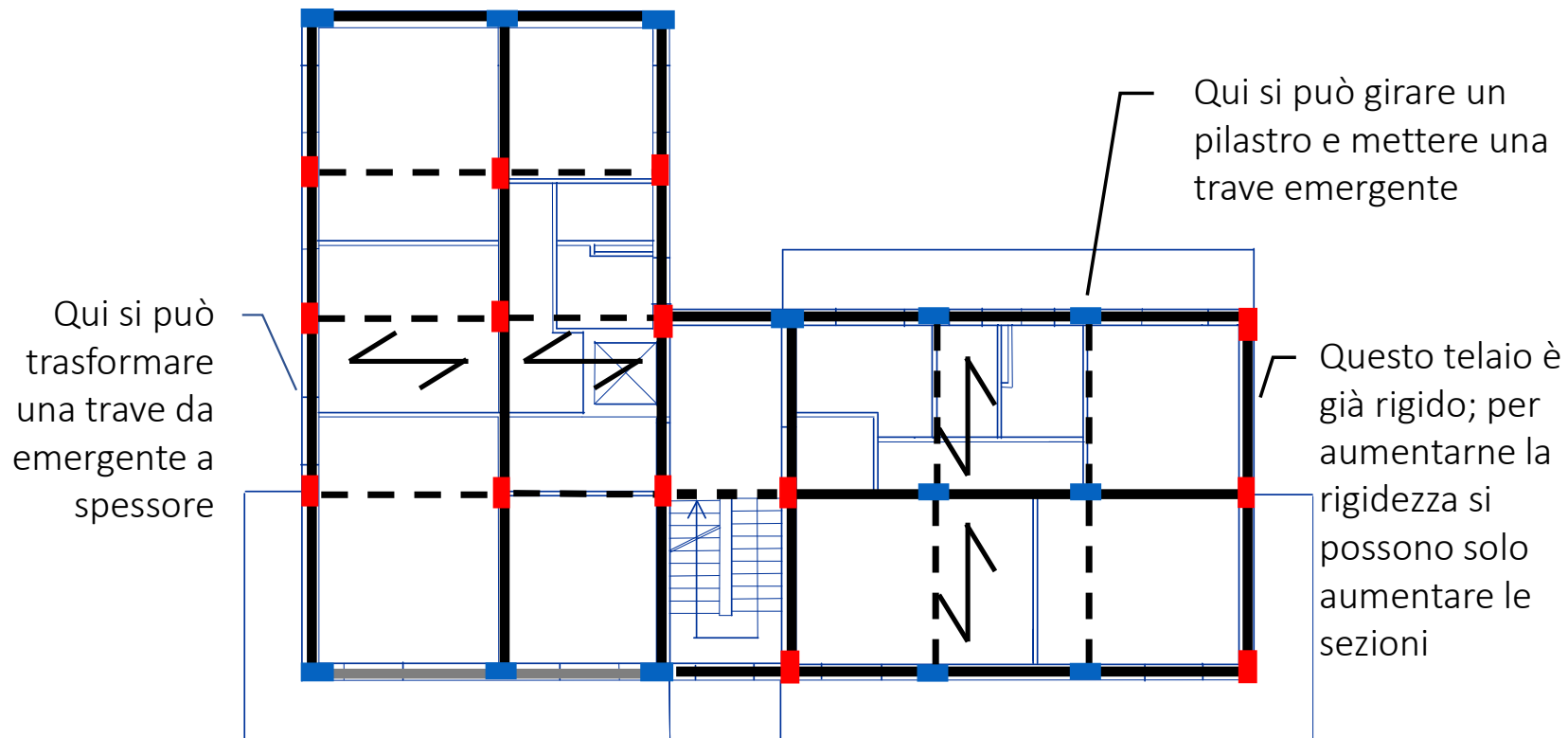
Commento dei risultati

La struttura, così come attualmente dimensionata, presenta un **comportamento rotazionale non accettabile** (nettamente non bilanciato).

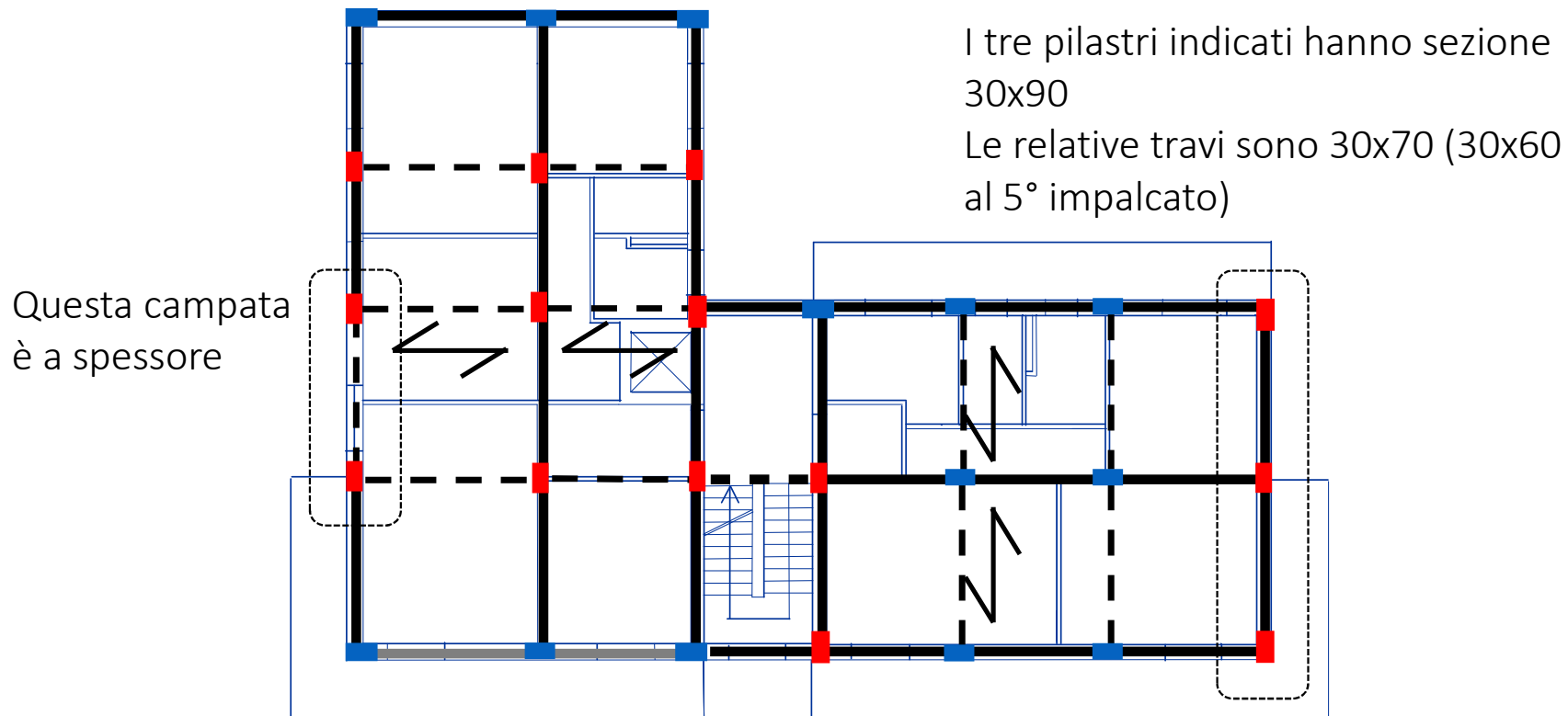
Anziché andare avanti con il suo esame, si dovrebbe fin d'ora pensare a come modificarla per **bilanciarla**:

- È indispensabile intervenire sulla struttura in modo da renderla bilanciata anche per sisma Y, stando attenti a non rovinare il bilanciamento già conseguito per sisma X
- Per farlo si deve irrigidire la parte destra dell'edificio, girando alcuni pilastri o aumentando le dimensioni di alcuni elementi, e/o indebolire la parte sinistra

Bilanciamento della struttura

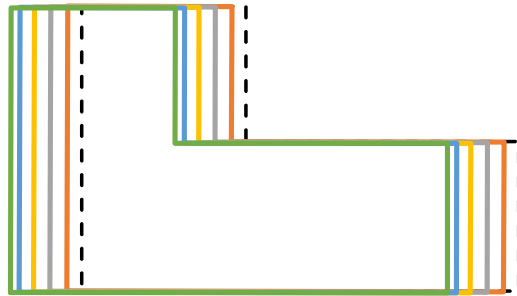


Bilanciamento della struttura

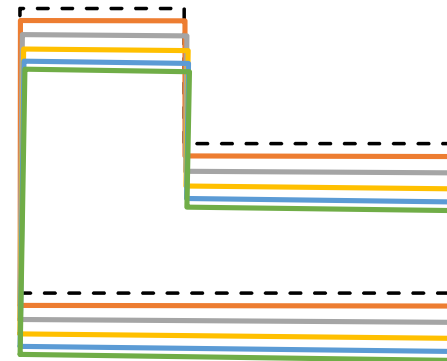


Modi di vibrazione

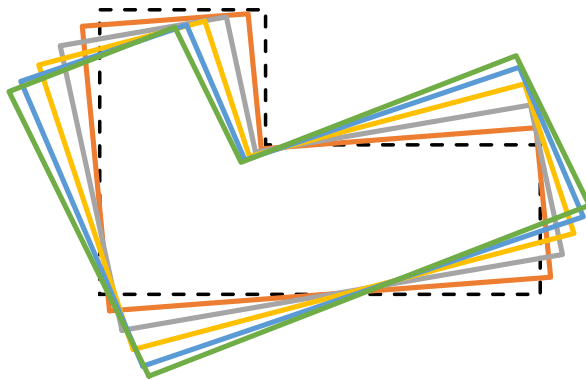
Modo 1 $T = 0.558 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.535 \text{ s}$



Modo 3 $T = 0.459 \text{ s}$

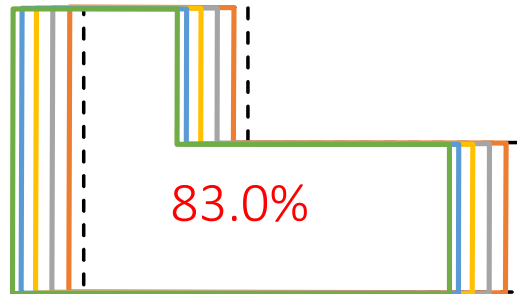


I modi sono perfettamente disaccoppiati

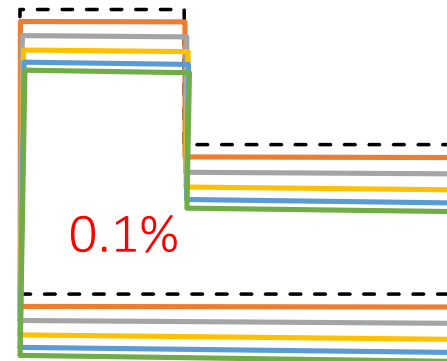
La struttura è torsionalmente rigida

Masse partecipanti sisma X

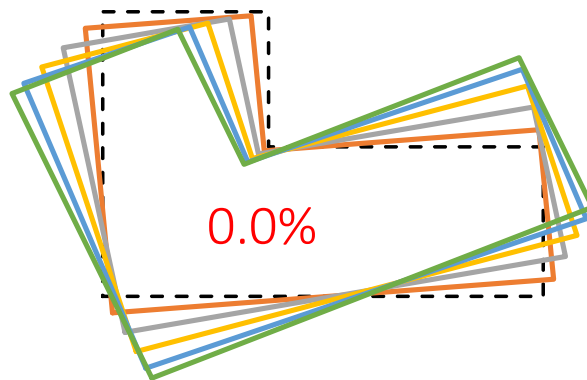
Modo 1 $T = 0.558$ s



Modo 2 $T = 0.535$ s



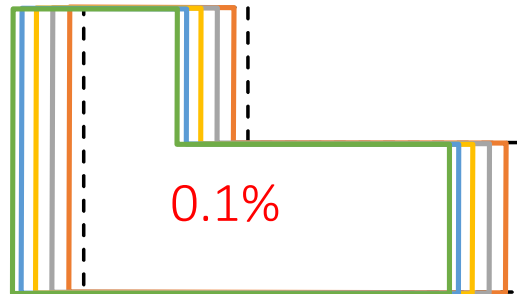
Modo 3 $T = 0.459$ s



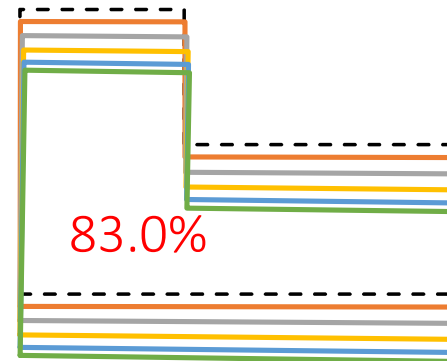
Il quarto modo fornisce una
massa partecipante di 11%

Masse partecipanti sisma Y

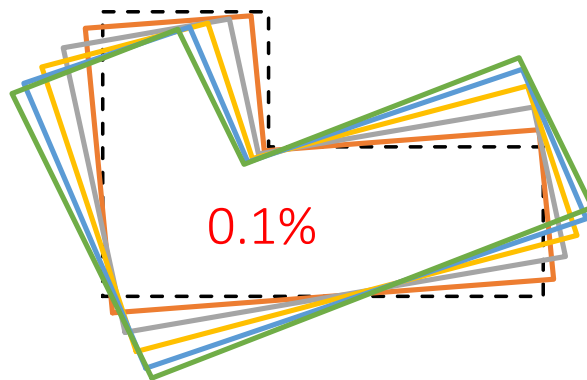
Modo 1 $T = 0.558 \text{ s}$



Modo 2 $T = 0.535 \text{ s}$



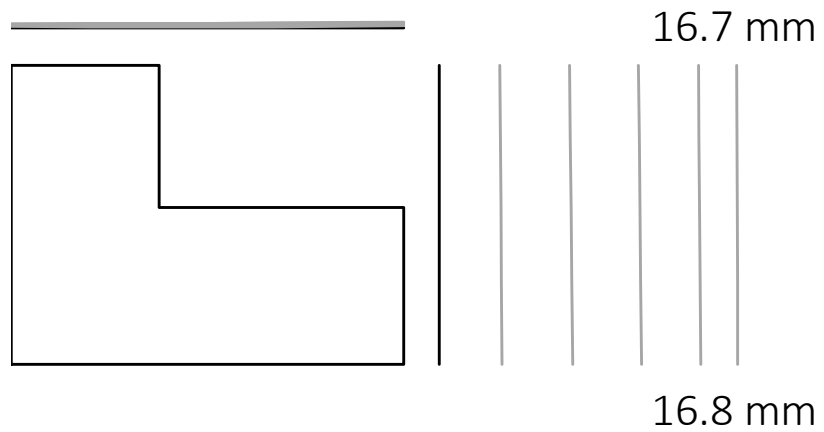
Modo 3 $T = 0.459 \text{ s}$



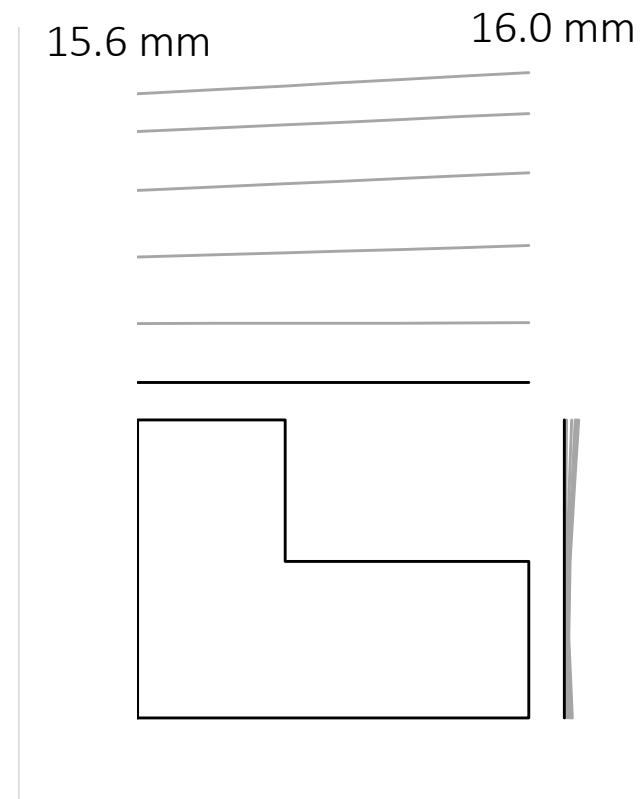
Il quinto modo fornisce una
massa partecipante di 11%

Inviluppo degli spostamenti massimi

Sisma X

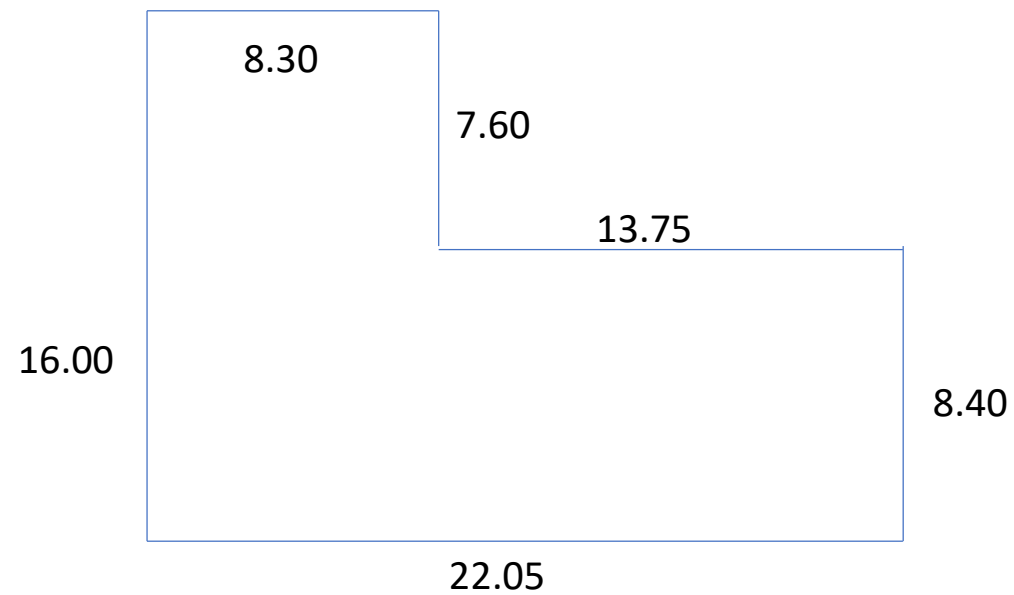


Sisma Y



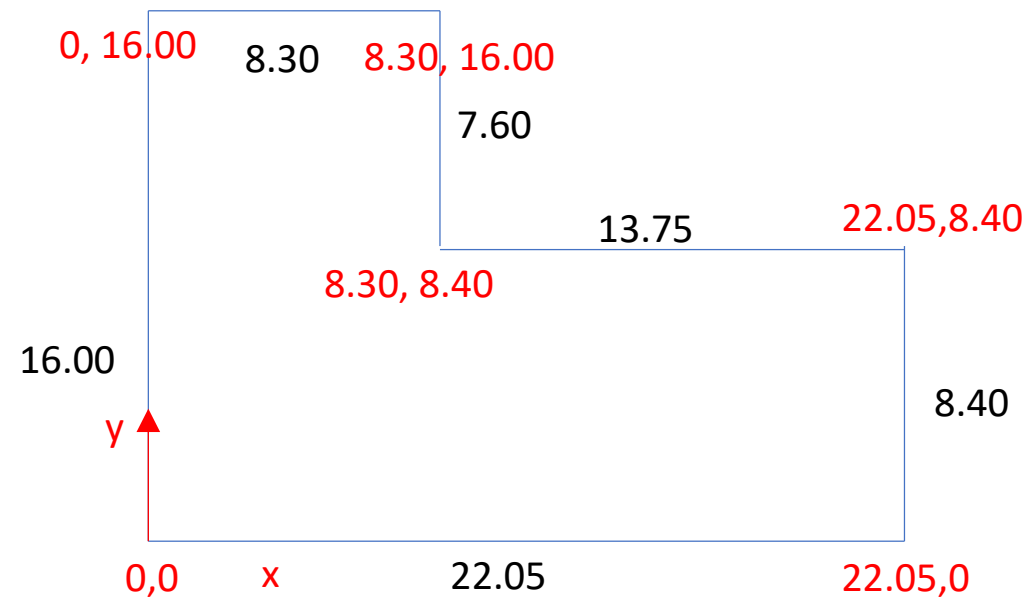
Suggerimenti operativi

Guardate il contorno del vostro edificio



Suggerimenti operativi

Guardate il contorno del vostro edificio



Definite le coordinate dei vertici (in questo caso 6) rispetto alla vostra origine di riferimento

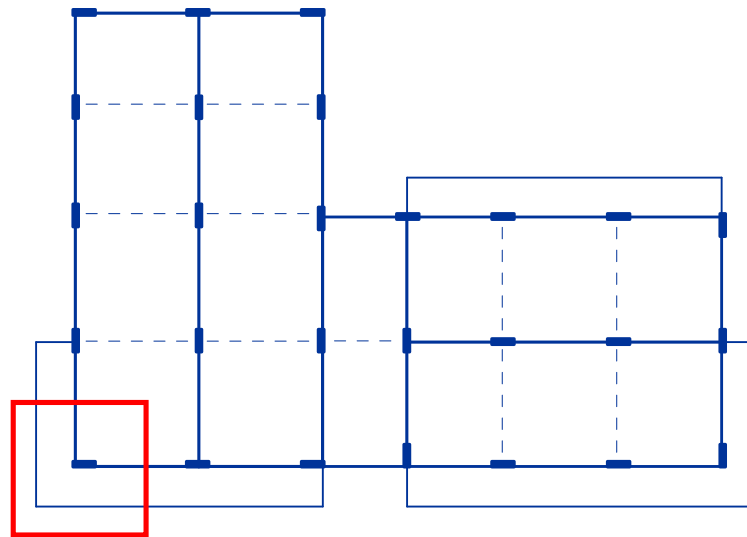
Suggerimenti operativi (09_Deformate modali.xlsx)

Indicate nel foglio Dati il vostro contorno e la posizione dei telai

Geometria							
n Piani	5			n Modi	12		
Lx	22.05 m						
Ly	16 m						
n vertici	6						
n.	x	y					
1	0.00	0.00					
2	22.05	0.00					
3	22.05	8.40					
4	8.30	8.40					
5	8.30	16.00					
6	0.00	16.00					

Suggerimenti operativi

- Selezionare il nodo dello spigolo in basso a sinistra del modello numerico a tutti i piani (escludete il torrino scala)



101, 201, 301, ...

Suggerimenti operativi

- Selezionare il nodo dello spigolo in basso a sinistra del modello numerico a tutti i piani (escludete il torrino scala)
- Mediante il comando «display table» esportare su excel gli spostamenti dei nodi selezionati e incollarli nella scheda «modale»

TABLE: Joint Displacements										
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	StepNum	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	Unitless	mm	mm	mm	Radians	Radians	Radians
101	MODAL	LinModal	Mode	1	2.682563	1.660252	0.195507	-0.00021	0.000847	0.000418
101	MODAL	LinModal	Mode	2	-7.45747	0.308784	-0.3338	0.000018	-0.00225	-1.1E-05
101	MODAL	LinModal	Mode	3	-4.4182	11.76172	0.235989	-0.00139	-0.00133	-0.00075
101	MODAL	LinModal	Mode	4	7.426759	7.118402	-0.18106	-0.00058	0.002	0.001023
101	MODAL	LinModal	Mode	5	-19.9722	1.436796	0.225972	-0.00014	-0.00504	0.000022
101	MODAL	LinModal	Mode	6	-12.0603	31.32159	-0.22629	-0.0027	-0.00315	-0.00224
101	MODAL	LinModal	Mode	7	-15.1655	-2.07972	0.116934	0.000107	-0.00296	-0.00011
101	MODAL	LinModal	Mode	8	2.599085	-16.8793	0.096939	0.000996	0.00059	-3.4E-05
101	MODAL	LinModal	Mode	9	-11.3147	6.817372	-0.09398	-0.00049	-0.00201	-0.00128
101	MODAL	LinModal	Mode	10	-3.79473	5.11051	0.035355	0.000137	-7.6E-05	0.001536
101	MODAL	LinModal	Mode	11	-29.684	-3.49963	-0.16136	-1.7E-05	-0.00355	-0.00053
101	MODAL	LinModal	Mode	12	16.70643	-48.3802	-0.02367	0.001	0.002698	0.003003
201	MODAL	LinModal	Mode	1	6.022816	3.343449	0.317533	-0.00024	0.000858	0.00096
201	MODAL	LinModal	Mode	2	-15.8395	0.452808	-0.5364	0.000052	-0.00212	-3.7E-07

Suggerimenti operativi

Preparate il modello con le seguenti condizioni di carico:

F_x forze in direzione x

F_y forze in direzione y

Sisma X (analisi modale con spettro di risposta per dir. X)

Sisma Y (analisi modale con spettro di risposta per dir. Y)

M_{accX}

M_{accY}

Suggerimenti operativi

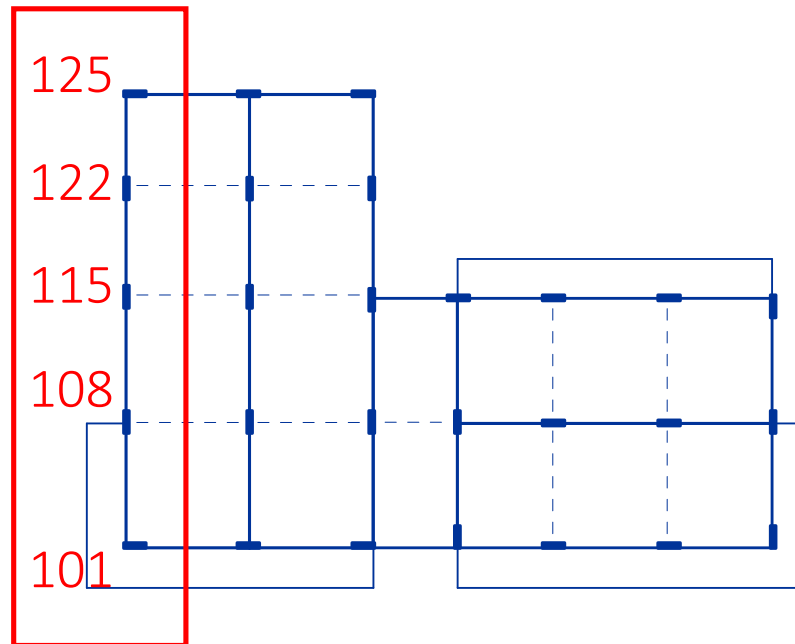
- Selezionare a tutti i piani i nodi di un telaio allungato in direzione Y
- Mediante il comando «display table» esportare su excel gli spostamenti dei nodi selezionati e incollarli nella scheda «OutSAP_X»

TABLE: Joint Displacements									
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	Radians	Radians	Radians
101	Fx	LinStatic		3.39	-0.07	0.16	0.00	0.00	0.00
101	Fy	LinStatic		0.40	2.67	0.12	0.00	0.00	0.00
101	SismaX	LinRespSpecMax		3.55	0.14	0.16	0.00	0.00	0.00
101	SismaY	LinRespSpecMax		0.86	1.45	0.07	0.00	0.00	0.00
101	M_accX	LinStatic		0.19	-0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
101	M_accY	LinStatic		0.31	-0.45	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: per una visualizzazione corretta dei risultati i nodi nel modello devono essere con numerazione crescente con la coordinata x.

Suggerimenti operativi

TABLE: Joint Displacements						
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm
101	Fx	LinStatic		3.39	-0.07	0.16
101	Fy	LinStatic		0.40	2.67	0.12
101	SismaX	LinRespSpeMax		3.55	0.14	0.16
101	SismaY	LinRespSpeMax		0.86	1.45	0.07
101	M_accX	LinStatic		0.19	-0.28	0.00
101	M_accY	LinStatic		0.31	-0.45	0.00
108	Fx	LinStatic		3.36	-0.07	0.04
108	Fy	LinStatic		0.11	2.67	0.04
108	SismaX	LinRespSpeMax		3.51	0.14	0.03
108	SismaY	LinRespSpeMax		0.26	1.45	0.02
108	M_accX	LinStatic		0.05	-0.28	0.00
108	M_accY	LinStatic		0.09	-0.45	-0.01
115	Fx	LinStatic		3.32	-0.07	0.03
115	Fy	LinStatic		-0.17	2.67	0.02
115	SismaX	LinRespSpeMax		3.48	0.14	0.03
115	SismaY	LinRespSpeMax		0.34	1.45	0.01
115	M_accX	LinStatic		-0.08	-0.28	0.00
115	M_accY	LinStatic		-0.13	-0.45	0.00
122	Fx	LinStatic		3.30	-0.07	0.04
122	Fy	LinStatic		-0.42	2.67	-0.05
122	SismaX	LinRespSpeMax		3.44	0.14	0.04
122	SismaY	LinRespSpeMax		0.87	1.45	0.02
122	M_accX	LinStatic		-0.20	-0.28	0.00
122	M_accY	LinStatic		-0.33	-0.45	0.00
125	Fx	LinStatic		3.27	-0.07	0.16
125	Fy	LinStatic		-0.68	2.67	-0.16
125	SismaX	LinRespSpeMax		3.41	0.14	0.16
125	SismaY	LinRespSpeMax		1.41	1.45	0.09
125	M_accX	LinStatic		-0.32	-0.28	0.00
125	M_accY	LinStatic		-0.53	-0.45	-0.01
201	Fx	LinStatic		7.17	-0.06	0.26



Suggerimenti operativi

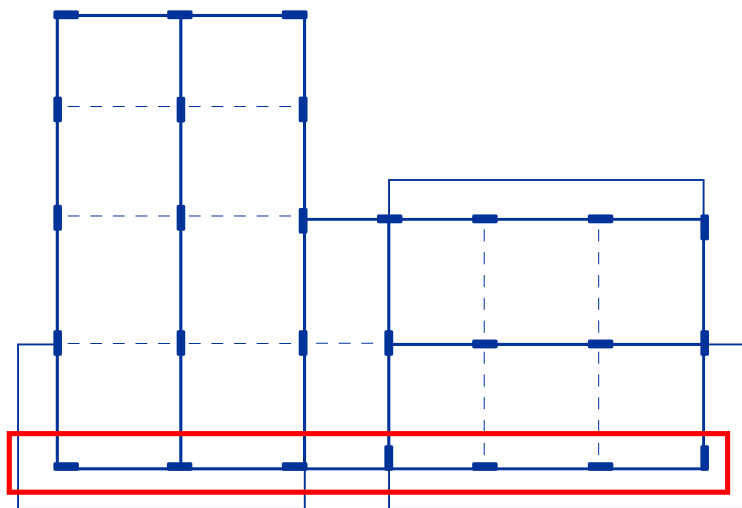
- Selezionare a tutti i piani i nodi di un telaio allungato in direzione X
- Mediante il comando «display table» esportare su excel gli spostamenti dei nodi selezionati e incollarli nella scheda «OutSAP_Y»

TABLE: Joint Displacements									
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	Radians	Radians	Radians
101	Fx	LinStatic		3.39	-0.07	0.16	0.00	0.00	0.00
101	Fy	LinStatic		0.40	2.67	0.12	0.00	0.00	0.00
101	SismaX	LinRespSpecMax		3.55	0.14	0.16	0.00	0.00	0.00
101	SismaY	LinRespSpecMax		0.86	1.45	0.07	0.00	0.00	0.00
101	M_accX	LinStatic		0.19	-0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
101	M_accY	LinStatic		0.31	-0.45	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: per una visualizzazione corretta dei risultati i nodi nel modello devono essere con numerazione crescente con la coordinata y.

Suggerimenti operativi

TABLE: Joint Displacements						
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm
101	Fx	LinStatic		3.39	-0.07	0.16
101	Fy	LinStatic		0.40	2.67	0.12
101	SismaX	LinRespSpec	Max	3.55	0.14	0.16
101	SismaY	LinRespSpec	Max	0.86	1.45	0.07
101	M_accX	LinStatic		0.19	-0.28	0.00
101	M_accY	LinStatic		0.31	-0.45	0.00
102	Fx	LinStatic		3.39	-0.03	0.03
102	Fy	LinStatic		0.40	2.96	0.12
102	SismaX	LinRespSpec	Max	3.55	0.11	0.03
102	SismaY	LinRespSpec	Max	0.86	1.50	0.06
102	M_accX	LinStatic		0.19	-0.13	0.00
102	M_accY	LinStatic		0.31	-0.22	0.00
103	Fx	LinStatic		3.39	0.00	-0.01
103	Fy	LinStatic		0.40	3.23	0.13
103	SismaX	LinRespSpec	Max	3.55	0.10	0.01
103	SismaY	LinRespSpec	Max	0.86	1.75	0.07
103	M_accX	LinStatic		0.19	-0.01	0.00
103	M_accY	LinStatic		0.31	-0.01	0.00
104	Fx	LinStatic		3.39	0.02	-0.01
104	Fy	LinStatic		0.40	3.43	0.16
104	SismaX	LinRespSpec	Max	3.55	0.10	0.02
104	SismaY	LinRespSpec	Max	0.86	2.02	0.09
104	M_accX	LinStatic		0.19	0.09	0.00
104	M_accY	LinStatic		0.31	0.15	0.01
105	Fx	LinStatic		3.39	0.05	0.06
105	Fy	LinStatic		0.40	3.66	0.06



101 102 103 104 105 106 107