

Progettazione di un edificio isolato sismicamente alla base con IperSpace

Caso studio realizzato con il software di calcolo strutturale IperSpace, di un edificio isolato sismicamente alla base ed i relativi benefici derivanti dall'utilizzo dei dispositivi elastomerici.

L'obiettivo del presente focus è quello di valutare i benefici derivanti dalla progettazione di un edificio isolato sismicamente, confrontando i risultati ottenuti su una stessa struttura, dapprima **progettata a base fissa e successivamente isolata**, attraverso dispositivi elastomerici.

La modellazione e l'analisi strutturale di entrambi le tipologie strutturali sono state effettuate attraverso il software **IperSpace BIM**, una suite completa per il calcolo strutturale agli elementi finiti che consente il calcolo, la verifica e il disegno di strutture in calcestruzzo, acciaio e legno, isolate e non. Nel presente lavoro si fa riferimento alle Norme Tecniche delle Costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018, in particolare al **Capitolo §7.10.**, all'interno del quale sono contenute tutte le indicazioni necessarie per la scelta, il dimensionamento, la verifica e il collaudo degli apparecchi di isolamento.

L'edificio di partenza, a base fissa, è costituito da una struttura intelaiata in cemento armato che si estende per 4 piani fuori terra. Poiché la struttura immediatamente al di sopra del piano di fondazione è costituita da pilastri e pareti, questa può considerarsi come una struttura scatolare rigida; pertanto, ai fini delle analisi sismiche, deve essere progettata con comportamento non dissipativo (Capitolo 7.2.1 NTC 2018) e la struttura in elevazione di riferimento è quella soprastante la scatolare. Le dimensioni di tutti i pilastri della sovrastruttura sono pari a 30x50 cm e tutte le travi, escluse quelle del vano scala, hanno sezione rettangolare 30x50 cm; le altezze di interpiano sono di 3 metri ed è presente un vano ascensore costituito da pareti in calcestruzzo armato che si estendono per tutta l'altezza dell'edificio.

Nel caso di struttura a base fissa, la platea del vano ascensore è vincolata alla fondazione; al contrario, nel caso della struttura isolata, questa risulta essere sospesa, in modo da renderla indipendente dal sistema di isolamento.

Per il calcolo della forza sismica il fattore di comportamento è assunto pari a 3.12 considerando la struttura regolare in pianta e irregolare in altezza ($K_R=1$).

I parametri sismici, valutati per un periodo di ritorno di 475 anni, utilizzati per la costruzione dello spettro sono i seguenti:

- accelerazione al bedrock: 0.26 g;
- massimo fattore di amplificazione orizzontale: 2.3;
- inizio del tratto a velocità costante dello spettro: 0.37;
- categoria di suolo: B;
- categoria topografica: T1.

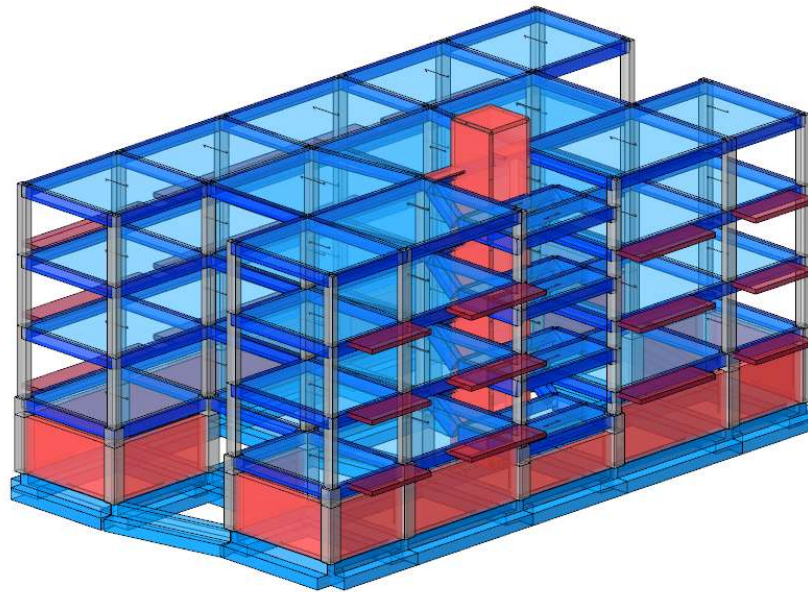
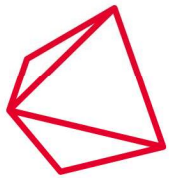


Figura 1: *Struttura non isolata*

Nella *tabella 1* si riportano i risultati dell'analisi dinamica; si noti che il valore del primo periodo di vibrazione è relativo all'asse y, a conferma che la struttura risulta essere più deformabile in tale direzione.

L'edificio, a causa della presenza del vano ascensore, è da considerarsi come irregolare: considerando i primi tre modi di vibrare, infatti, si raggiunge solo il 70% dell'intera massa partecipante.

Tabella 1: *Risultati dell'analisi dinamica*

Modi	T(s)	Coeff. Partecipazione		Masse Modali [kgm*g]		Percentuali	
		Dir=0°	Dir=90°	Dir=0°	Dir=90°	Dir=0°	Dir=90°
1	0.49	-63.627	303.683	39701	904403	2.39	54.40
2	0.43	-187.839	-177.997	346011	310704	20.81	18.69
3	0.37	282.892	-50.042	784805	24558	47.21	1.48

Come si evince dalla *tabella 2*, la struttura, oltre ad essere più rigida in direzione x, è anche torsionalmente deformabile in quanto il rapporto r^2/I_s^2 è per alcuni piani minore dell'unità.

r è il raggio torsionale, cioè il rapporto tra la rigidezza torsionale rispetto al centro di rigidezza laterale e la maggiore tra le rigidezze laterali; I_s è, per ogni piano, il rapporto fra il momento d'inerzia polare della massa del piano rispetto ad un asse verticale passante per il centro di massa del piano e la massa stessa del piano.

Tabella 2: *Rigidità della struttura e valutazione del rapporto r^2/I_s^2*

Piano	Kx [daN/m]	Ky [daN/m]	r^2/I_s^2
1	6.696906E08	2.673909E08	1.664
2	8.067552E07	5.724056E07	0.782
3	3.311742E07	2.409054E07	0.766
4	1.809310E07	1.286445E07	0.844

La scelta del sistema di isolamento

L'isolamento sismico consiste nello sconnettere l'edificio dal terreno attraverso l'introduzione di isolatori, caratterizzati da **un'elevata deformabilità tagliante e un'elevata rigidezza in direzione verticale**, tali da disaccoppiare il moto del terreno da quello della struttura.

Gli obiettivi dell'isolamento sono principalmente due:

- **elongazione del periodo fondamentale della struttura**, rendendola più deformabile e quindi soggetta ad accelerazioni sismiche minori;
- **incremento dello smorzamento viscoso** tale da ridurre gli spostamenti, che inevitabilmente aumentano all'aumentare del periodo proprio.

L'aumento dello smorzamento, a differenza dell'allungamento del periodo che diminuisce le accelerazioni ma fa aumentare gli spostamenti, ha un effetto di ridurre contemporaneamente i tagli alla base e i massimi spostamenti della struttura. Gli spostamenti maggiori, indotti dal sisma, sono concentrati nel sistema di isolatori data la loro ridotta rigidezza tagliante; la struttura, quindi, trasla rigidamente con essi **riducendo al massimo gli spostamenti interpiano**.

Ai fini della modellazione del comportamento di una struttura isolata si individuano due componenti: l'isolamento sismico direttamente vincolato alle fondazioni e la sovrastruttura. L'assunzione che gli spostamenti relativi di quest'ultima siano pressoché nulli, fa sì che nell'analisi dinamica possa essere considerata come una massa direttamente applicata al sistema di isolamento. Di conseguenza, il periodo di traslazione vale:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{si}}}$$

in cui M è la massa della sovrastruttura e K_{si} la rigidità equivalente del sistema di isolamento, che assumendo un modello lineare, è pari alla somma delle rigidità dei singoli dispositivi.

Il sistema di isolamento è costituito da una superficie di separazione posta tra la sovrastruttura e la sottostruttura (scatola rigida) che include la fondazione ed è, quindi, rigidamente connessa al terreno.



Figura 2: *Sovrastruttura e sottostruttura*

La scelta degli isolatori avviene dopo avere determinato il valore di K_{si} , nota la massa della struttura e fissato il periodo. Il valore di T viene fissato in modo tale che il rapporto di isolamento (*Isolation Ratio IR*, definito come il rapporto tra il periodo della struttura isolata e quello della struttura a base fissa) sia maggiore di 3.

Il sistema di isolamento, inoltre, deve essere tale da sostenere, senza rotture, gli spostamenti indotti dall'azione sismica, valutata allo SLV, da valutare come:

$$d_{de} = \frac{M}{K_{si}} \cdot S_e(T, \xi_{si}) = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_e(T, \xi_{si})$$

dove $S_e(T, \xi_{si})$ è l'accelerazione corrispondente allo spettro elastico di progetto per un dato periodo e un fissato smorzamento, definito per il sito geografico in cui ricade l'edificio e la categoria di sottosuolo appropriata.

Per la scelta del sistema più appropriato si sono considerati **quattro spettri di risposta**, valutati rispettivamente per smorzamenti del 5, 10, 15 e 20%, e tre diversi periodi (1.5, 2 e 2.5 secondi) in modo da ottenere dodici possibili combinazioni e altrettanti valori di spostamenti indotti dal sisma sugli isolatori.

Per un'analisi immediata, gli spettri sono stati valutati nel piano ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*), in cui, per un dato periodo di vibrazione e un dato valore dello smorzamento viscoso equivalente, si riportano in ascissa lo spostamento massimo e in ordinata la massima pseudo-accelerazione.

L'inclinazione delle rette passanti per l'origine è legata al periodo di vibrazione attraverso l'espressione:

$$\frac{S_e(T, \xi_{si})}{S_d(T, \xi_{si})} = \frac{4\pi^2}{T}$$

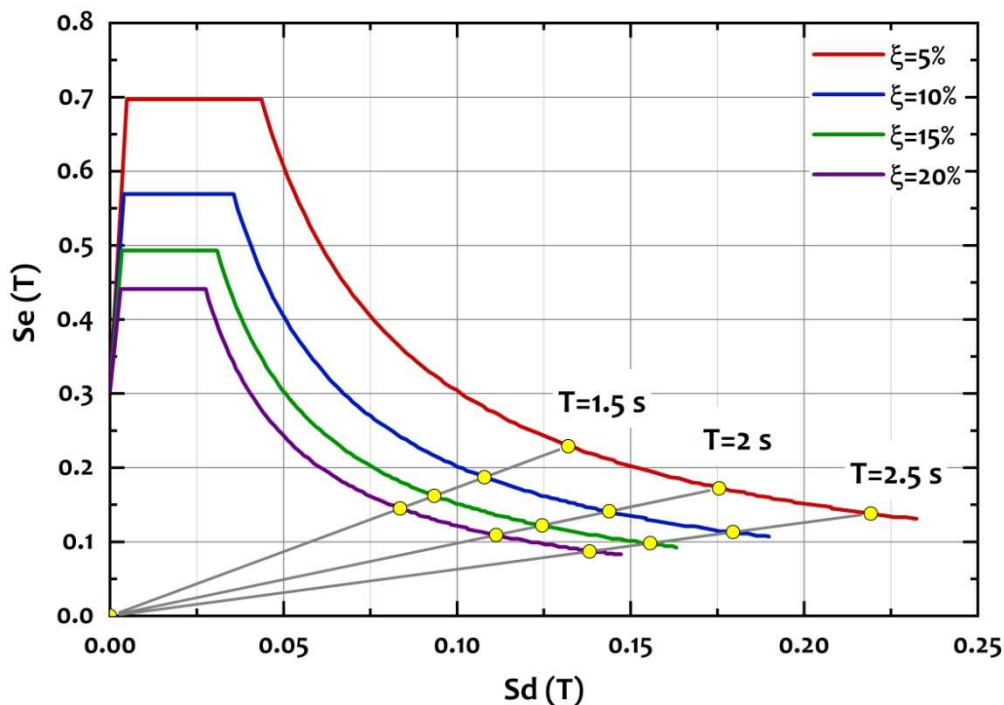
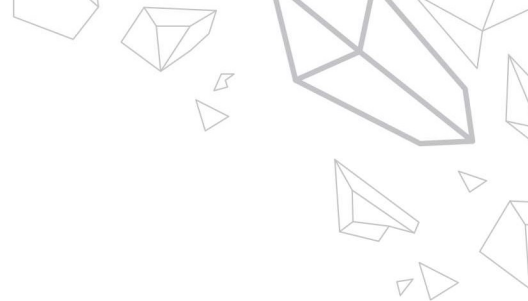


Figura 3: Piano ADRS



Nella *tabella 3* sono riportati i valori di progetto dello spostamento del centro di rigidità del sistema isolato.

Tabella 3: *Spostamento del centro di rigidità*

ξ [%]	T [s]		
	1.5	2	2.5
5	0.132	0.175	0.219
10	0.108	0.144	0.180
15	0.093	0.124	0.156
20	0.084	0.111	0.138

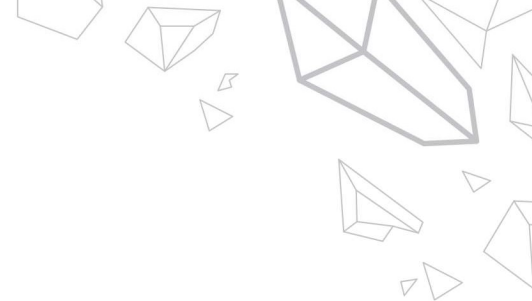
Per ogni periodo si è valutata la rigidità equivalente del sistema di isolamento, sempre nell'ipotesi che la sovrastruttura trasli rigidamente rispetto al piano di isolamento.

$$K_{si} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot M$$

La massa M della sovrastruttura, fissato il piano di isolamento al di sopra della scatola rigida a piano terra, è stata calcolata a partire dai risultati dell'analisi della struttura a base fissa. La seguente tabella riporta le masse sismiche dei vari piani della struttura; è stata ottenuta dall'analisi della struttura una volta definite le geometrie degli elementi e i carichi verticali in combinazione sismica. Si tenga presente che le masse sismiche della sovrastruttura sono uguali a quelle della struttura non isolata.

Tabella 4: *Peso sismico e massa sismica di piano*

Piano	Peso sismico [daN]	Massa sismica [Kg]
0	0	0
1	425773	425773
2	464853	464853
3	464387	464387
4	307426	307426
	TOT.	1662439



Successivamente, come riportato in tabella 5, si riportano i valori della rigidezza equivalente dell'intero sistema per i diversi valori di periodo, e quella del singolo isolatore. Il numero di isolatori, la tipologia e la loro distribuzione deve essere tale da **minimizzare gli effetti torsionali**, cioè in modo da ridurre l'eccentricità tra la proiezione del baricentro delle masse della sovrastruttura sul piano di isolamento e il centro di rigidezza dei dispositivi. A tal fine si è scelto di prevedere due tipologie di isolatori e disporli su tutti i ventiquattro pilastri della struttura, data la sua simmetria in pianta.

Tabella 5: *Rigidezza equivalente e del singolo isolatore in funzione del periodo*

T	K_{eq, is}	k_{is}
[s]	[kN/mm]	[kN/mm]
1.5	29.14	1.21
2	16.39	0.68
2.5	10.49	0.44

La scelta effettuata è stata quella di aumentare il periodo della struttura a 2 secondi e portare lo smorzamento al valore del 15%; pertanto lo spostamento da utilizzare in fase di calcolo è di 124 mm e la rigidezza è 16.39 kN/mm.

Questa scelta progettuale fornisce un giusto compromesso, come si vedrà in seguito, tra la riduzione dell'accelerazione sismica rispetto alla struttura a base fissa e il massimo spostamento orizzontale. Inoltre, poiché in fase di pre-analisi non si è considerata la contemporaneità dell'azione sismica nelle due direzioni, lo spostamento di progetto è stato incrementato del 30%.

Dal calcolo è emerso che il singolo isolatore deve essere in grado di tollerare uno spostamento di 0.162 m (0.124 + 30%) e deve essere dotato di una rigidezza orizzontale equivalente di 0.68 kN/mm. Si è scelto di utilizzare due tipologie di isolatori elastomerici (spostamento ammissibile di 200 mm e smorzamento equivalente del 15%), i cui requisiti, richiesti dal calcolo, sono stati identificati nel catalogo FIP INDUSTRIALE: 20 isolatori dalla sigla SI-S 500/102 e 4 isolatori 550/105. Le caratteristiche geometriche e tecniche sono riportate nella tabella seguente.

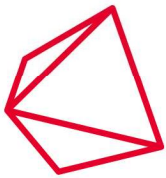


Tabella 6: Scheda tecnica isolatori SI-S 500/102 e SI-S 550/105

SI-N	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 300/100	210	1350	0.57	457	300	100	188	238	350	100
SI-N 350/100	510	2100	0.77	597	350	100	178	228	400	128
SI-N 400/100	1180	3720	1.01	912	400	100	178	228	450	166
SI-N 450/102	1810	4990	1.25	1082	450	102	190	240	500	220
SI-N 500/102	2840	7780	1.54	1494	500	102	190	240	550	270
SI-N 550/105	3660	9650	1.81	1683	550	105	187	237	600	316
SI-N 600/104	4470	10310	2.18	1953	600	104	180	230	650	362
SI-N 650/108	5520	10830	2.46	2143	650	108	181	231	700	418
SI-N 700/100	6230	11370	3.08	2617	700	100	177	237	750	535
SI-N 800/100	10090	14990	4.02	3934	800	100	177	237	850	694
SI-N 900/108	13350	21220	4.71	4377	900	108	190	250	950	905
SI-N 1000/112	16780	22590	5.61	5000	1000	112	200	280	1050	1327
SI-N 1100/112	21190	27460	6.79	6667	1100	112	200	280	1150	1600
SI-N 1200/112	22700	28700	8.08	7631	1200	112	196	276	1250	1865

La struttura e la sovrastruttura sono state modellate come **systemi a comportamento elastico lineare** aventi rigidità corrispondente al comportamento strutturale non dissipativo (fattore di comportamento q unitario). Inoltre, poiché il rapporto tra la rigidità verticale degli isolatori K_v e la rigidità equivalente orizzontale K_e è maggiore di 800, non si è portato in conto la deformabilità verticale del sistema di isolamento (Capitolo 7.10.5.2 NTC 2018).

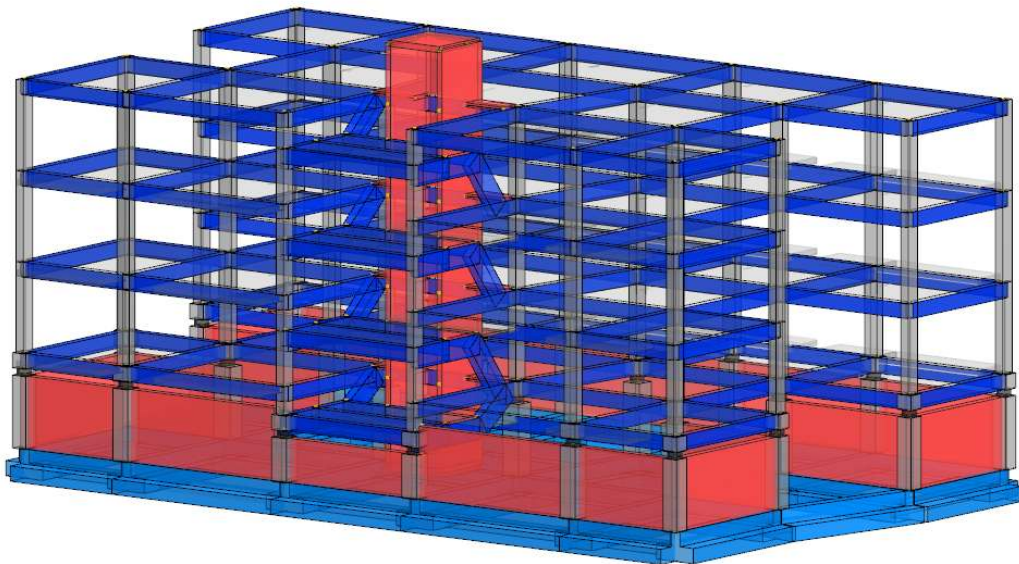


Figura 4: Modello strutturale con gli isolatori realizzato con IperSpace

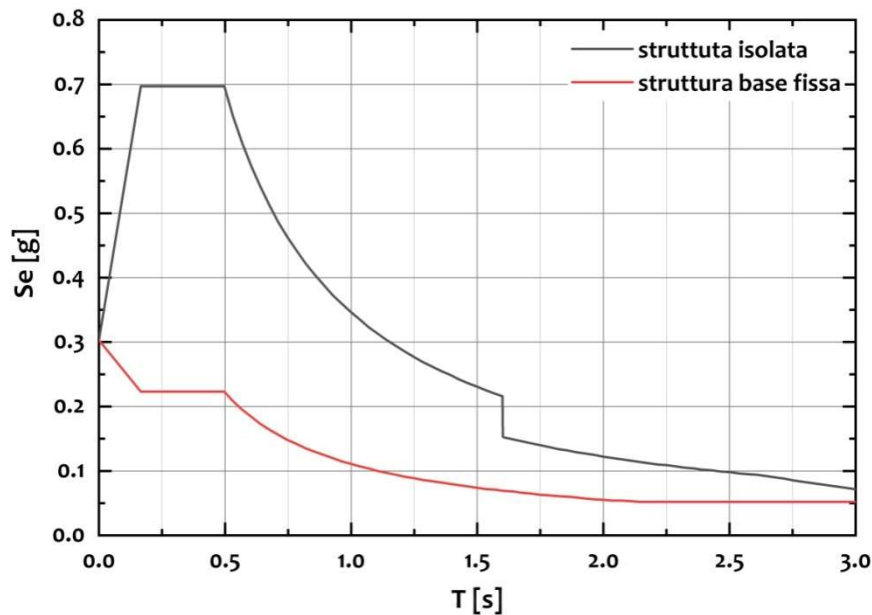
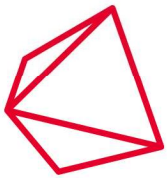


Figura 4: Spettro struttura isolata ed a base fissa

Secondo le indicazioni suggerite dalle NTC 2018, lo spettro relativo alla struttura isolata, si ottiene riducendo lo spettro elastico per tutto il campo di periodi $T \geq 0.8 T_{is}$, assumendo per il coefficiente riduttivo η il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del sistema di isolamento. Nel caso in esame si deve ridurre lo spettro per valori del periodo maggiori di 1.6 secondi, attraverso uno smorzamento del 15%.

Il primo periodo di vibrazione della struttura a base fissa è inferiore a 0.5 secondi; le corrispondenti accelerazioni spettrali, valutate adottando un fattore di struttura pari a 3.12, sono pari a 0.223g in corrispondenza della parte piatta dello spettro. Per la struttura isolata, con un periodo di progettazione pari a 2 secondi, l'accelerazione spettrale è di 0.122 con una riduzione poco inferiore al 50%. Si noti, confrontando i due spettri relativi alle due tipologie di strutture, che la riduzione dell'accelerazione della struttura a base fissa, per effetto dell'aumento del periodo e dello smorzamento, è superiore rispetto alla riduzione dello spettro elastico attraverso il fattore della struttura, sfruttando le riserve di duttilità.

Analisi dei risultati

Nella tabella che segue sono riportati i risultati dell'analisi dinamica. Si può osservare che il primo modo di vibrare effettivo della struttura coincide con il periodo atteso utilizzato in fase di progettazione ($T=2$ s). Il secondo differisce del 4%; tale differenza è dovuta al fatto che la rigidezza del singolo isolatore è superiore a quella calcolata dall'analisi degli spostamenti, effettuata preliminarmente.

Tabella 7: Risultati dell'analisi dinamica

Modi	T(s)	Coeff. Partecipazione		Masse Modali [kgm*g]		Percentuali	
		Dir=0°	Dir=90°	Dir=0°	Dir=90°	Dir=0°	Dir=90°
1	1.99	-173.229	341.985	294279	1146927	17.67	68.87
2	1.92	-364.248	-191.684	1301112	360322	78.13	21.64
3	1.60	83.802	-126.238	68870	156279	4.14	9.38

Si noti dalla tabella 8 come la presenza degli isolatori regolarizzi la distribuzione di rigidzze della struttura nelle due direzioni, tanto che il rapporto r^2/Is^2 assume sempre valori unitari. La struttura può considerarsi torsionalmente indeformabile.

Tabella 8: Rigidezze di piano della struttura

Piano	Kx [daN/m]	Ky [daN/m]	r^2/Is^2
1	1.840315E06	1.832020E06	1.440
2	1.793430E06	1.776258E06	1.404
3	1.719363E06	1.681828E06	1.376
4	1.627042E06	1.562306E06	1.364

La figura seguente mostra la deformata della struttura per effetto della combinazione sismica, con sisma prevalente in direzione X. I relativi spostamenti degli isolatori sono riportati in tabella 9.

Si tenga presente che il progetto della struttura in elevazione deve essere effettuato considerando un comportamento non dissipativo, assumendo un fattore di comportamento pari a 1.5 in modo da portare comunque in conto le capacità di dissipazione che una struttura in cemento armato intrinsecamente possiede. Poiché per il progetto degli isolatori si è utilizzato uno spettro elastico (q pari a 1), le sollecitazioni della sovrastruttura devono essere deamplicate di un fattore pari a $1/1.5$.

Tabella 9: Spostamento degli isolatori per sisma in direzione X

ISOLATORE	DTx [cm]	DTy [cm]	DTz [cm]	ISOLATORE	DTx [cm]	DTy [cm]	DTz [cm]
1	9.43	4.51	-0.02	13	10.90	4.57	-0.02
2	9.45	3.63	-0.07	14	10.92	3.52	-0.08
3	9.40	2.56	-0.06	15	10.89	2.59	-0.10
4	9.42	2.27	-0.10	16	10.95	2.26	-0.10
5	9.53	-2.73	-0.07	17	11.06	-2.89	-0.08
6	9.53	-3.50	-0.04	18	11.06	-3.91	-0.04
7	10.08	4.51	-0.02	19	11.80	4.58	-0.02
8	10.08	3.60	-0.09	20	11.85	3.46	-0.07
9	10.04	2.51	-0.09	21	11.86	2.51	-0.08
10	10.13	2.24	-0.15	22	11.90	2.16	-0.08
11	10.25	-2.80	-0.08	23	11.89	-2.93	-0.07
12	10.23	-3.49	-0.04	24	11.91	-3.91	-0.03

Inoltre, il massimo spostamento assoluto della struttura, per sisma in direzione X, è 12.8 centimetri, di poco superiore a quello stabilito in fase di progetto degli isolatori e comunque, inferiore a 25 cm.

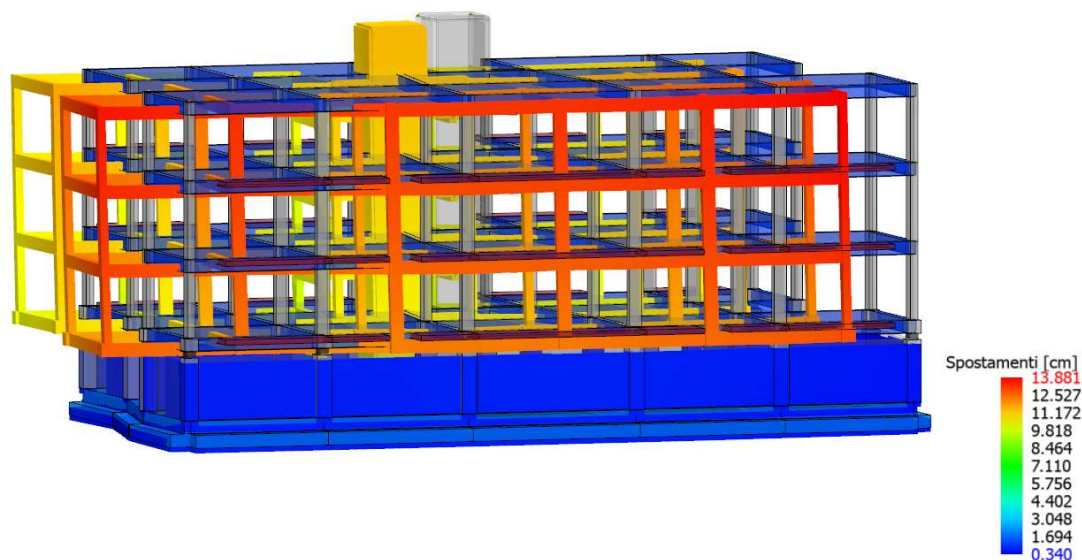


Figura 5: Spostamento sovrastruttura

Un confronto tra i taglianti alla base, relativi al sisma in direzione x, tra la struttura a base fissa e quella isolata è riportato nella tabella seguente.

Tabella 10: Confronto struttura isolata e non isolata

Piano	STRUTTURA ISOLATA		STRUTTURA NON ISOLATA	
	Fx [daN]	Fy [daN]	Fx [daN]	Fy [daN]
0	-13719	-10580	-148498	-39640
1	153350	15914	473154	65973
2	15976	5798	-5770	-17474
3	25532	-125	19183	19103
4	46571	5145	72361	9784

In conclusione la modellazione della struttura con isolamento alla base con IperSpace risulta essere semplice ed intuitiva. Confrontando i periodi di predimensionamento e quelli ottenuti dal software al termine dell'analisi, gli stessi risultano pressoché uguali tra loro a conferma che la modellazione ed il calcolo sono stati effettuati correttamente. In linea generale si evidenzia come l'utilizzo di dispositivi elastomerici possa abbattere notevolmente l'azione sismica a cui è soggetta la struttura. Per effettuare un confronto immediato, le dimensioni degli elementi strutturali dell'edificio a base fissa e di quello a base isolata sono state le stesse; nella realtà progettuale la struttura isolata avrebbe dovuto avere dimensioni ridotte, date le sollecitazioni più basse, nell'ottica di una progettazione volta a garantire contemporaneamente la migliore prestazione ed economicità allo stesso tempo

Acquista [IperSpace BIM](#), il software di calcolo strutturale BIM oriented aggiornato alle NTC 2018 e alla Circolare esplicativa. Per info contattaci allo 0824.874.392 oppure scrivici a info@soft.lab.it