

Isolamento alla base in zone a bassa sismicità ed elevati standard abitativi

M. Battaini¹ ■

Sommario

L'idea di realizzare un edificio privato con sistema d'isolamento sismico a Milano è nata nell'autunno del 2008, ancor prima che l'effetto del terremoto de L'Aquila, rendesse la tematica molto più nota e interessante per progettisti ed acquirenti.

Molteplici sono le applicazioni dell'isolamento sismico già effettuate in Italia per opere sia pubbliche sia private, ma situate in zone ad elevata pericolosità sismica; mentre la realizzazione di un edificio per privata abitazione in una zona a basso rischio come quella di Milano, sembrava all'inizio uno dei tanti studi di fattibilità destinati ad esaurirsi all'atto della valutazione economica dell'intervento. In questo caso, invece, lo scopo del costruttore era quello di realizzare un edificio ad alto contenuto tecnologico che abbinasse le più moderne tecnologie quali impianto fotovoltaico, "classificazione A" in termini di risparmio energetico, isolamento acustico alla sicurezza strutturale dell'opera in caso di terremoto eliminando il rischio di danni strutturali importanti ed interventi di

1. Introduzione

Il presente articolo descrive il progetto, l'analisi dinamica del condominio "Rainbow", situato in via Besenhanica a Milano, dotato di sistema d'isolamento sismico alla base progettato e fornito dalla società Agom International S.r.l ed anche le prove sperimentali sugli isolatori effettuate presso il laboratorio Eucentre di Pavia.

Lo scopo del documento è mostrare il comportamento dinamico della struttura soggetta al sisma di progetto per la zona ed il tipo di terreno in cui essa è situata, confrontando la risposta del sistema isolato e a base fissa per evidenziare come anche in una zona di modesta sismicità, l'impiego dell'isolamento sismico risulti efficace e permetta di evitare qualsiasi danno strutturale in caso di sisma.

Dall'analisi strutturale si possono evidenziare le seguenti informazioni:

- confronto tra risposta sismica dell'edificio con e senza sistema d'isolamento;

manutenzione post sisma che comporterebbero oneri economici e disagio per i residenti.

Apprezzabile e lungimirante è quindi stata la volontà del costruttore di fornire un prodotto ad elevate prestazioni da inserire in un mercato immobiliare caratterizzato da standard qualitativi elevati.

L'impiego della tecnologia dell'isolamento sismico, oltre a garantire la sicurezza della struttura, permette anche una notevole riduzione dell'accelerazione percepita ai piani durante l'evento sismico; ciò garantisce tranquillità e comfort agli occupanti minimizzando, inoltre, il rischio di danneggiamenti secondari (quali caduta oggetti, armadi, ecc) all'interno dell'abitazione, fenomeni che, pur non interessando la sicurezza dell'edificio, provocano comunque disagi nel caso essi accadano.

Si è passati, quindi, dall'analisi di fattibilità alla fase operativa con la progettazione del sistema d'isolamento sismico ed il coordinamento con progettista strutturale dell'edificio per la definizione di tutti i dettagli necessari all'installazione dei dispositivi di protezione sismica.

- valutazione dei parametri progettuali della struttura: tagli e momenti sui piastri;
- valutazione dello spostamento relativo tra struttura e terreno e definizione dei parametri progettuali di isolatori ed appoggi scorrevoli.

Si prevede un sistema di isolamento sismico alla base dell'edificio, i cui dispositivi di protezione sismica sono collocati al livello del piano terra, in modo tale che essi siano facilmente accessibili ed ispezionabili dai box interrati. Il vano ascensore e la scala comune sono appoggiati a livello del piano box su appoggi scorrevoli per semplificarne la costruzione.

Il sistema d'isolamento è quindi realizzato su due livelli: il piano terra dell'edificio (collocato sopra i box parcheggio) e quello di calpestio dei box parcheggio, limitatamente ai supporti del vano ascensore e scala comune.

I dispositivi impiegati per il sistema d'isolamento sono i seguenti:

- isolatori in elastomero e nucleo dissipativo in

¹ Agom International srl, Milano - ✉ mbattaini@agom.it

piombo: essi permettono di sostenere il carico verticale e di avere una risposta elastica nel piano orizzontale con conseguente dissipazione d'energia;

- appoggi scorrevoli multidirezionali: essi permettono di sostenere il carico verticale e lo scorrimento libero nel piano orizzontale.

L'impiego di isolatori ed appoggi scorrevoli si rende necessario per ottimizzare la risposta sismica dell'edificio isolato garantendo la miglior coincidenza tra il baricentro delle masse e quello delle rigidità in modo tale da disaccoppiare i primi due modi di vibrare della struttura, evitando l'innescarsi di modi torsionali globali. Al momento della definizione del progetto l'input sismico applicabile era definito in accordo all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri OPCM n. 3431 e successive modifiche. In particolare lo spettro del sito in cui l'opera è costruita è definito dai seguenti parametri:

- terreno di tipo B, fattore $S = 1.25$;
- classificazione in zona 4 quindi accelerazione = 0.05 g ;
- coefficiente di importanza $\gamma_I = 1.1$. In accordo alla normativa il coefficiente d'importanza per edifici di uso abitativo è pari a 1, in questo progetto si è impiegato il valore 1.1 quindi con il 10% in più di azione sismica per evidenziare come l'impiego del sistema d'isolamento possa garantire una protezione della struttura in grado di mantenerla ela-

2. Descrizione dell'edificio

L'edificio è costituito da 5 piani fuori terra più un terrazzo, la copertura ed un piano interrato ad uso parcheggio e cantine. La struttura è un telaio in CA con un vano scala e ascensore posto in posizione centrale rispetto al lato lungo ma decentrato rispetto a quello corto.

Si tratta di una soluzione ricorrente nell'edilizia ad uso residenziale e quindi si vuole mettere in luce come l'impiego della tecnica dell'isolamento sismico sia fattibile e semplice da realizzare anche per "classici" edifici ad uso abitativo.

Per lo studio del comportamento dinamico dell'opera si considera la struttura come posizionata su un piano rigido che rappresenta il terreno ed appoggiata su supporti le cui caratteristiche riproducono quelli degli isolatori e degli appoggi scorrevoli.

È stata effettuata una modellazione ad elementi finiti dell'opera, impiegando elementi trave per pilastri e travi di piano, elementi shell per le solette e la copertura, e elementi elastici per simu-

stica senza danni anche con terremoti superiori a quelli massimi nel sito.

Per la progettazione del sistema d'isolamento sismico sono state effettuate le seguenti analisi strutturali:

- analisi dinamica a spettro di risposta della struttura isolata e a base fissa nelle diverse condizioni di carico statiche e dinamiche con sisma allo stato limite ultimo (periodo di ritorno 475 anni) e frequente (periodo di ritorno 50 anni);
- analisi dinamica al passo per valutare la storia temporale dell'accelerazione e dello spostamento dell'edificio durante un evento sismico, il cui segnale è stato generato artificialmente e compatibile con lo spettro di progetto del terreno.

I risultati che verranno evidenziati sono ovviamente congrui con la classificazione sismica considerata; essendo oggi in vigore la nuova norma NTC2008, anche il corrispondente input sismico deve essere aggiornato. In particolare per la progettazione del sistema di isolamento deve essere considerato lo spettro del terreno allo stato limite del collasso (SLC).

Pur essendo l'opera già costruita, è stata verificata a posteriori la risposta del sistema d'isolamento con i parametri della nuova norma NTC2008 e dai risultati si conclude che il sistema d'isolamento sismico installato soddisfa le prestazioni richieste.

l'analisi della risposta di isolatori ed appoggi scorrevoli. Il progetto del sistema d'isolamento è stato eseguito abbinando isolatori ed appoggi scorrevoli in modo da:

- ottenere la miglior coincidenza possibile tra centro di massa e rigidità della struttura isolata;
- ottenere un adeguato periodo del sistema isolato e contemporaneamente ottimizzare il progetto dell'isolatore con adeguata rigidità, capacità di sopportare il carico verticale e garantire lo spostamento orizzontale dovuto al sisma;
- minimizzare il costo globale della protezione sismica;
- massimizzare la rigidità torsionale complessiva della struttura isolata.

Il risultato del progetto è stato un sistema composto da:

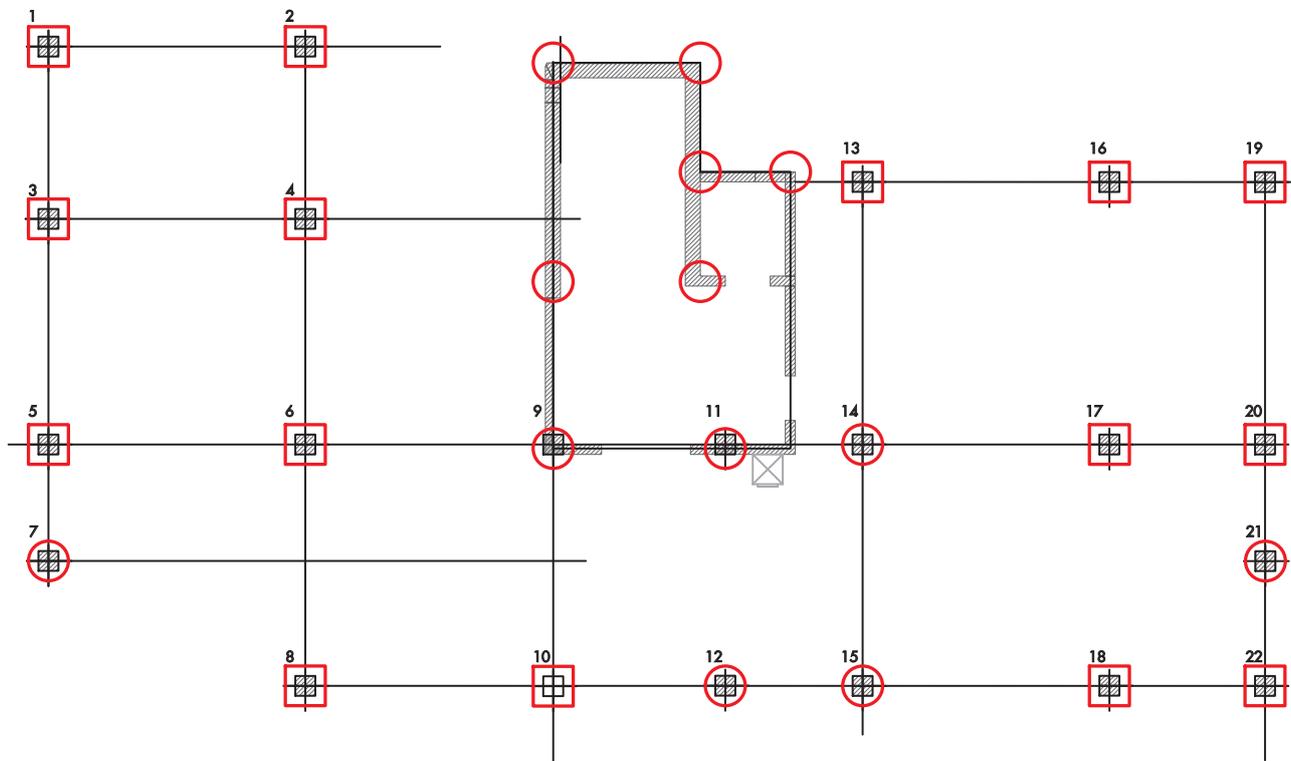
- n. 15 isolatori elastomerici con nucleo dissipativo in piombo
- n. 13 appoggi scorrevoli in tutte le direzioni del piano

Gli isolatori sono collocati lungo il perimetro esterno dell'edificio ed, in punti opportuni, all'interno mentre gli appoggi scorrevoli sono collocati nelle rimanenti posizioni dei supporti e sotto il vano ascensore e scala comune. Si evidenzia nella figura seguente la disposizione

in pianta di isolatori ed appoggi scorrevoli. I risultati dell'analisi modale mostrati nel paragrafo 4 dimostrano la buona coincidenza tra centro di massa e di rigidezza che si è ottenuta evitando così fenomeni di torsione globale dell'edificio in caso di sisma.



Figura 1
Disposizione in pianta degli isolatori e degli appoggi scorrevoli.



3. Input sismico

L'input sismico (Figure da 2 a 4) è rappresentato da:

- spettro di risposta del terreno elastico;
- accelerogramma (tempo-accelerazione) ottenuto artificialmente con opportuno software di simulazione numerica e compatibile con lo spettro di progetto.

Il sistema d'isolamento sismico impiegato è modellabile come lineare, quindi, nel rispetto della normativa, il comportamento sismico della struttura isolata può essere calcolato con la sola analisi dinamica lineare con spettro di risposta. In questo lavoro si è comunque ritenuto interessante anche effettuare l'analisi

dinamica con integrazione al passo per confrontare i risultati delle due simulazioni ed ottenere anche l'andamento temporale della risposta del sistema sia nella configurazione isolata che a base fissa.

Si è deciso di utilizzare un accelerogramma artificiale spettro compatibile opportunamente filtrato sia per ragioni di praticità sia perché il sito in cui è costruita l'opera non presenta particolari problematiche (alternanza di terreni, morfologia irregolare, vicinanza a faglie, ecc..) tali da giustificare un'accurata ricerca storica di accelerogrammi naturali che invece è necessaria per opere strategiche in zone ad elevata sismicità in presenza di situazioni critiche.

Figura 2
Spetro di progetto.

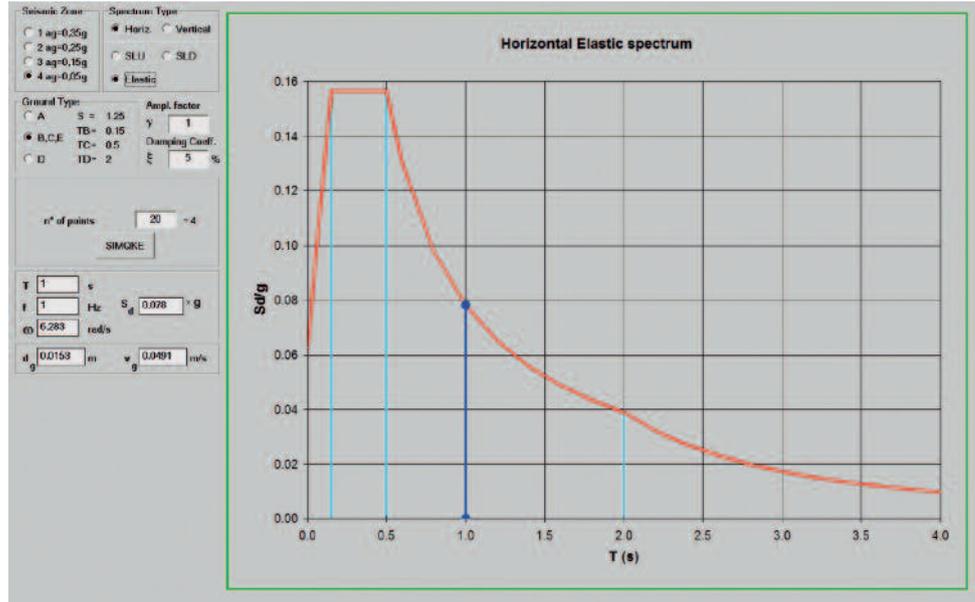


Figura 3
Confronto tra lo spettro di progetto e quello dell'accelerogramma artificiale.

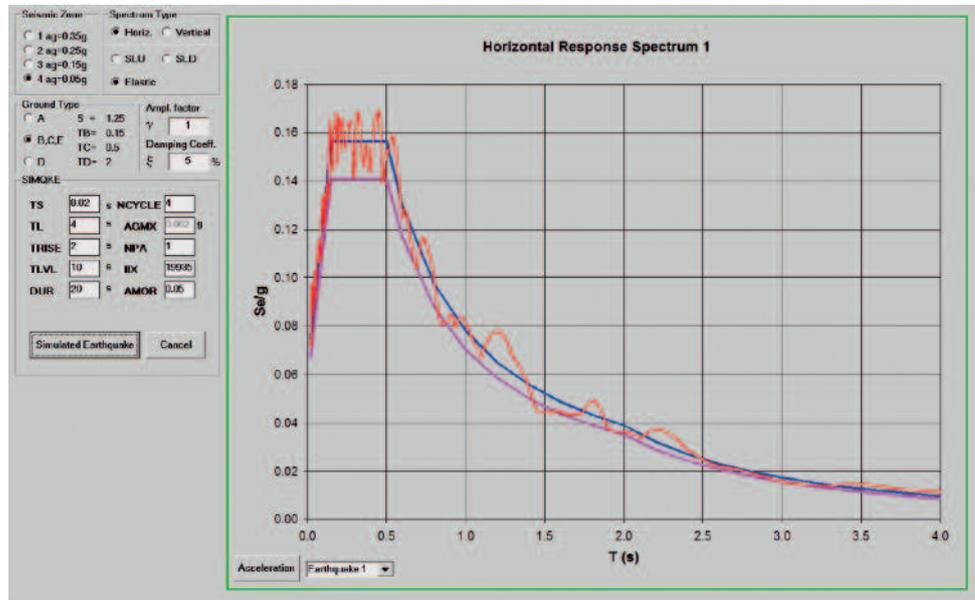
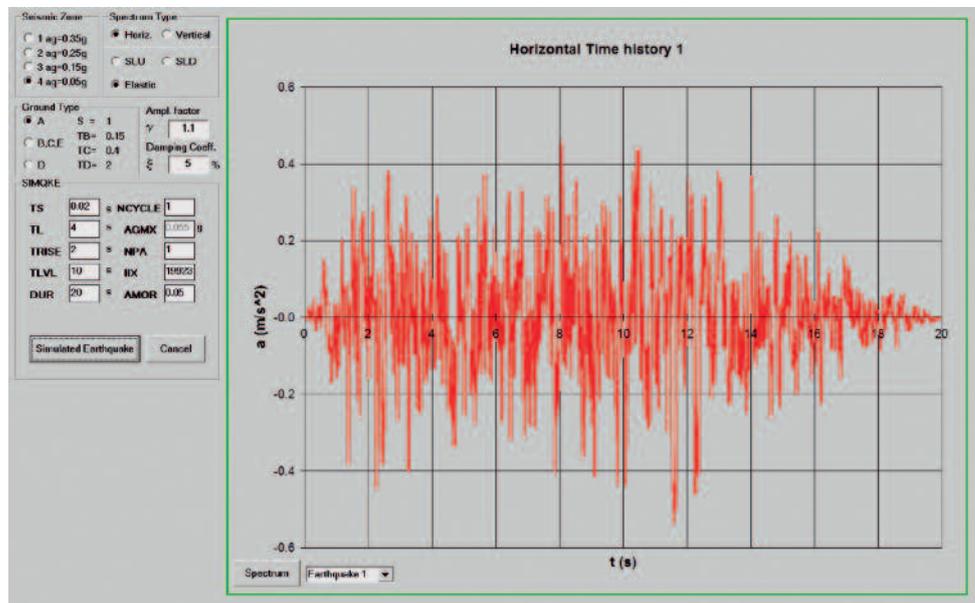


Figura 4
Accelerogramma sisma artificiale compatibile con lo spettro di progetto.



4. Analisi modale

L'analisi modale della struttura permette di valutare i modi di vibrare della struttura a base fissa e di quella a base isolata. Per quest'ultima, in particolare, l'analisi dei modi e dei fattori di partecipazione modale permette di definire la combinazione ottimale tra isolatori ed appoggi scorrevoli per disaccoppiare i modi principali. Nel modello si identifica come asse X quello parallelo al lato lungo dell'edificio, Y il suo ortogonale e Z quello verticale.

Tabella 1 - Primi 5 periodi e fattori di partecipazione modale per la struttura a base fissa

Modo	Periodo (sec)	F _x	F _y
1	0.47	41.2%	9.1%
2	0.31	25.4%	21.0%
3	0.30	10.6%	66.8%
4	0.16	7.1%	0.3%
5	0.12	0.0%	0.1%

La Tabella 1 evidenzia come i fattori di partecipazione modale (F_x lungo X e F_y lungo Y) mostrino che la percentuale di massa partecipante al moto in ogni modo è significativa sia in direzione X sia Y e che quindi i modi di vibrare sono accoppiati con effetto torsionale globale. Tale fenomeno è dovuto al fatto che l'edificio non è completamente simmetrico in quanto il vano ascensore e scala comune è decentrato rispetto

5. Analisi dinamica lineare

Sono state effettuate le analisi dinamiche dell'edificio a base fissa ed isolato con spettro di risposta per la valutazione delle azioni sulla struttura e per il progetto dei dispositivi; è stata inoltre svolta una simulazione con analisi al passo per valutare l'andamento temporale di spostamenti ed accelerazioni in caso di evento sismico significativo.

Nell'analisi strutturale sono state considerate le seguenti combinazioni dei carichi:

1. V-MAX-SLU = combinazione statica dei carichi allo stato limite ultimo. Tale combinazione permette di valutare le azioni verticali massime su isolatori ed appoggi scorrevoli per il loro dimensionamento;
2. V-MAX-SLS = combinazione statica dei carichi in esercizio;
3. SISMA-X-SLU = combinazione in presenza di sisma agente al 100% in direzione X e 30% in quelle Y. L'effetto del sisma è combi-

all'asse Y e collocato al perimetro.

Tabella 2 - Primi 5 periodi e fattori di partecipazione modale per la struttura isolata alla base

Modo	Periodo (sec)	F _x	F _y
1	2.08	98.7%	0.9%
2	2.07	0.9%	99.0%
3	1.61	0.3%	0.0%
4	0.27	0.0%	0.0%
5	0.18	0.0%	0.0%

Dalla Tabella 2 si vede che i primi due periodi di vibrazione dell'edificio isolato alla base sono identici e pari a circa 2.1 secondi: si ottiene quindi una notevole riduzione dell'accelerazione sismica in quanto l'ordinata dello spettro del terreno corrispondente al periodo del sistema isolato è decisamente minore rispetto a quella riferita alla struttura a base fissa.

I fattori di partecipazione modale (F_x lungo X e F_y lungo Y) mostrano che la percentuale di massa partecipante al moto nei primi 2 modi è pari al 99% di quella totale, l'edificio quindi vibra secondo le due direzioni principali X e Y senza alcun significativo effetto torcente globale.

Il disaccoppiamento dei modi è stato ottenuto cercando la miglior coincidenza possibile tra centro delle masse e delle rigidezze del sistema, come già precedentemente descritto.

nato allo stato limite ultimo con gli altri carichi come richiesto dalla normativa. Tale combinazione permette di valutare le azioni verticali massime e gli spostamenti di isolatori ed appoggi scorrevoli per il loro;

4. SISMA-Y-SLU = combinazione in presenza di sisma agente al 100% in direzione Y e 30% in quelle X. L'effetto del sisma è combinato allo stato limite ultimo con gli altri carichi come richiesto dalla normativa. Tale combinazione permette di valutare le azioni verticali massime e gli spostamenti di isolatori ed appoggi scorrevoli per il loro;
5. SISMA-X-SLS = combinazione in presenza di sisma frequente (sisma d'esercizio con periodo di ritorno pari a 50 anni) agente al 100% in direzione X e 30% in quelle Y;
6. SISMA-Y-SLS = combinazione in presenza di sisma frequente (sisma d'esercizio con periodo di ritorno pari a 50 anni) agente al 100% in direzione Y e 30% in quelle X.

6. Risultati dell'analisi strutturale

Di seguito (Tabelle da 4 a 6) si presentano i risultati delle analisi strutturali con il confronto tra edificio a base fissa ed edificio isolato alla base. Nelle tabelle seguenti il significato delle variabili per i pilastri è il seguente:

- N = azione assiale
- T2 = taglio in direzione X
- T3 = taglio in direzione Y
- M2 = momento intorno all'asse X
- M3 = momento intorno all'asse Y

Tabella 3 - Confronto risultati analisi strutturale - sollecitazioni sui pilastri PT (dal piano terra al primo)

condizione carico	edificio isolato					edificio a base fissa					differenza percentuale				
	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N	T2	T3	M2	M3
1 - V-MAX-SLU	-1883	-32	-29	-40	-45	-1730	-17	-19	-26	-22	8.8%	85.7%	53.6%	57.8%	99.9%
2 - SISMA-X-SLU	-1160	-24	-24	-33	-34	-1183	-37	-43	-58	-55	-1.9%	-33.2%	-45.1%	-43.3%	-38.0%
3 - SISMA-Y-SLU	-1181	-22	-25	-34	-31	-1275	-24	-30	-41	-34	-7.4%	-6.4%	-19.0%	-16.1%	-8.3%
4 - V-MAX-SLS	-1329	-23	-20	-28	-31	-1221	-12	-13	-18	-16	8.8%	85.8%	53.7%	57.9%	100.0%
5 - SISMA-X-SLS	-1197	-23	-21	-30	-32	-1158	-22	-25	-33	-29	3.3%	5.9%	-14.5%	-10.5%	7.1%
6 - SISMA-Y-SLS	-1213	-22	-23	-32	-30	-1237	-17	-21	-28	-23	-1.9%	27.0%	8.8%	14.1%	32.7%

Tabella 4 - Confronto risultati analisi strutturale - sollecitazioni sui pilastri P1 (dal primo piano al secondo)

condizione carico	edificio isolato					edificio a base fissa					differenza percentuale				
	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N	T2	T3	M2	M3
1 - V-MAX-SLU	-1179	-33	-28	-38	-45	-1325	-21	-18	-24	-28	-11.0%	55.0%	61.5%	62.2%	58.3%
2 - SISMA-X-SLU	-678	-25	-12	-16	-33	-913	-38	-25	-36	-51	-25.7%	-35.4%	-52.4%	-55.0%	-34.5%
3 - SISMA-Y-SLU	-707	-22	-21	-28	-30	-891	-26	-22	-29	-34	-20.7%	-13.1%	-5.2%	-3.9%	-11.6%
4 - V-MAX-SLS	-833	-23	-20	-27	-32	-936	-15	-12	-17	-20	-10.9%	55.0%	61.7%	62.4%	58.4%
5 - SISMA-X-SLS	-732	-23	-20	-27	-31	-885	-24	-17	-22	-32	-17.4%	-2.7%	16.9%	19.0%	-1.1%
6 - SISMA-Y-SLS	-731	-22	-20	-27	-30	-886	-20	-18	-24	-27	-17.5%	10.9%	10.6%	11.8%	13.1%

Tabella 5 - Confronto risultati analisi strutturale - sollecitazioni sui pilastri P3 (dal terzo piano al quarto)

condizione carico	edificio isolato					edificio a base fissa					differenza percentuale				
	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N	T2	T3	M2	M3
1 - V-MAX-SLU	243	19	9	23	35	229	15	8	17	28	6.0%	30.3%	11.0%	36.6%	23.6%
2 - SISMA-X-SLU	153	16	7	17	25	162	35	17	33	38	-5.5%	-52.5%	-61.9%	-50.1%	-32.5%
3 - SISMA-Y-SLU	154	14	7	17	24	166	24	14	27	31	-7.6%	-40.1%	-53.4%	-38.6%	-24.5%
4 - V-MAX-SLS	171	14	6	16	25	162	11	5	12	20	6.0%	30.4%	10.8%	36.6%	23.6%
5 - SISMA-X-SLS	157	14	6	16	24	158	22	11	22	28	-0.6%	-34.5%	-42.7%	-28.6%	-13.5%
6 - SISMA-Y-SLS	158	14	6	16	23	163	18	11	21	26	-2.8%	-24.2%	-40.8%	-22.2%	-11.2%

Tabella 6 - Confronto risultati analisi strutturale - sollecitazioni sui pilastri P5 (dal quinto piano al terrazzo)

condizione carico	edificio isolato					edificio a base fissa					differenza percentuale				
	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N kN	T2 kN	T3 kN	M2 kN x m	M3 kN x m	N	T2	T3	M2	M3
1 - V-MAX-SLU	-498	-17	-8	-11	24	-497	-15	-7	11	20	0.2%	18.2%	16.2%	-202.1%	17.5%
2 - SISMA-X-SLU	-283	-11	-6	-8	-15	-294	-15	-10	-14	-19	-3.8%	-24.9%	-46.7%	-45.9%	-24.3%
3 - SISMA-Y-SLU	-283	-11	-6	-8	-14	-294	-13	-9	-13	-17	-3.7%	-15.3%	-40.0%	-39.2%	-16.4%
4 - V-MAX-SLS	-354	-6	-6	9	17	-353	-10	-5	8	14	0.2%	-40.0%	16.0%	17.4%	17.5%
5 - SISMA-X-SLS	-292	-11	-5	-7	-14	-297	-12	-7	-10	-16	-1.7%	-5.7%	-26.4%	-25.5%	-6.7%
6 - SISMA-Y-SLS	-292	-11	-5	-8	-14	-299	-11	-7	-10	-15	-2.1%	-3.0%	-26.5%	-24.7%	-4.0%

Si deduce che l'impiego del sistema d'isolamento sismico permette di ottenere azioni alla base in condizioni sismiche molto simili a quelle statiche nelle condizioni d'esercizio e che quindi l'effetto del terremoto non rappresenti la condizione critica per la progettazione dell'opera. Per il progetto in esame, data la bassa intensità sismica del sito, ai fini del dimensionamento strutturale sono dominanti gli effetti statici dei carichi verticali, e questo giustifica il fatto che le azioni dovute ai due livelli di terremoti (stato limite ultimo ed esercizio) siano molto simili.

In ogni caso, è evidente che, nelle condizioni sismiche allo stato limite ultimo (SISMA-X-SLU e SISMA-Y-SLU) l'impiego del sistema d'isolamento permette un decremento tagli e momenti sui pilastri dell'ordine del 40%.

Si noti, inoltre, che per la struttura a base fissa la presenza di una zona molto rigida data da vano scala e ascensore permette di scaricare in tale area gran parte delle reazioni orizzontali con effetti di accoppiamento dei modi di vibrare e conseguenti effetti di torsione globale dell'edificio.

Nel caso di sistema isolato, invece, il vano rigido è scollato dal terreno e le reazioni orizzontali vengono distribuite in modo omogeneo su tutti gli isolatori evitando torsioni globali come evidenziato dall'analisi dei modi di vibrare.

In ogni caso, pur trascurando la reazione dei vani scala e ascensore, i tagli sui pilastri restano dello stesso ordine di grandezza ed in molti casi inferiori a quelli dell'edificio a base fissa.

Oltre a confrontare la risposta dell'edificio isolato e non isolato in termini di sollecitazioni trasmesse dal sisma alla struttura, è stata anche effettuata un'analisi dinamica al passo per valutare le accelerazioni ai vari piani durante l'evento sismico.

Tale informazione è utile in quanto elevate accelerazioni, pur essendo sopportabili dalla struttura, possono essere causa di danni al contenuto dell'edificio ad esempio apparecchi elettro-

nici, caduta oggetti, ecc.

Il grafico di Figura 5 mostra che l'edificio isolato si comporta come corpo rigido, in quanto l'accelerazione ai vari piani è praticamente identica e con un andamento nel tempo decisamente più attenuato rispetto a quello della struttura a base fissa (Figura 6); il valore massimo dell'accelerazione è pari a 0.29 m/sec^2 al verificarsi di un evento sismico allo stato limite ultimo con periodo di ritorno 475 anni.

Il grafico mostra di Figura 6 invece che l'edificio non isolato si comporta come da filtro per le accelerazioni, innescando vari modi di vibrare e con picchi di diversa intensità a seconda dei piani. Per lo stesso segnale sismico per il quale è stata valutata l'accelerazione di piano dell'edificio isolato, i valori massimi di accelerazioni ai vari piani per l'edificio a base fissa sono i seguenti (Tabella 7):

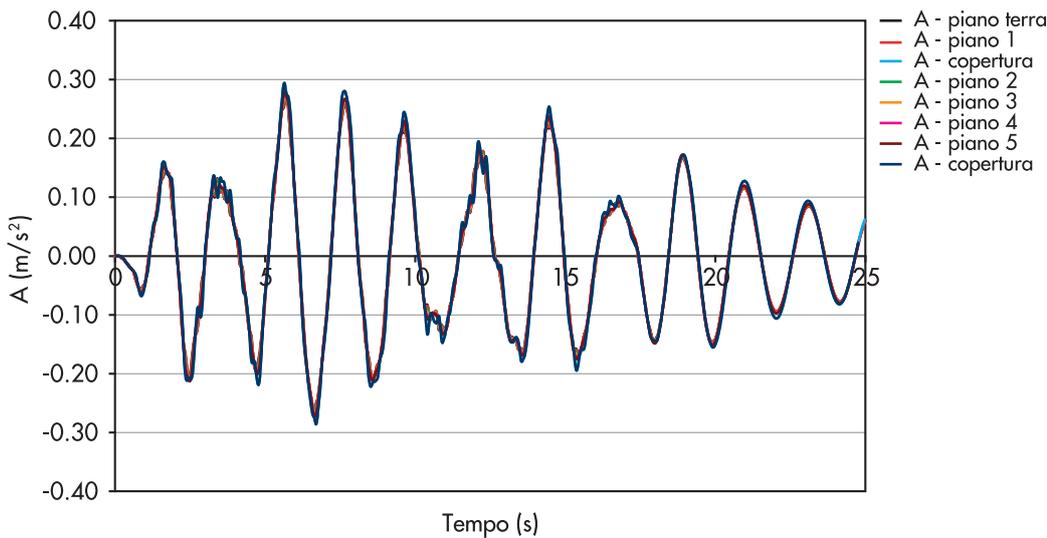


Figura 5
Edificio isolato:
Storia temporale
dell'accelerazione ai piani.

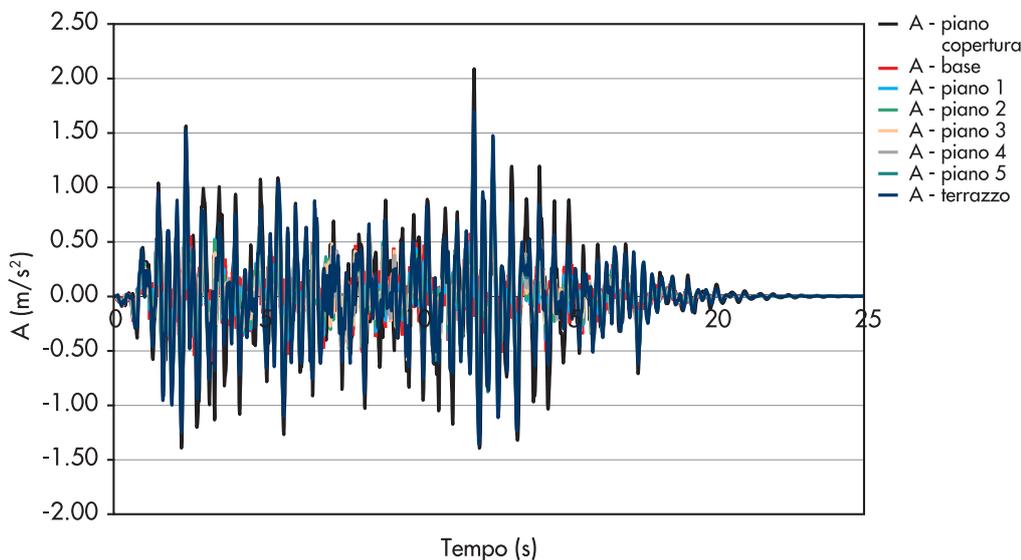


Figura 6
Edificio a base fissa:
Storia temporale
dell'accelerazione ai piani.

Tabella 7
Accelerazione massima ai piani dell'edificio a base fissa.

Piano	Accelerazione max (m/sec ²)
Base (accelerazione terreno)	0.61
Piano 1	0.70
Piano 2	0.87
Piano 3	1.01
Piano 4	1.08
Piano 5	1.28
Terrazzo	1.70
Copertura	2.08

Si noti come i valori di accelerazione di picco al piano siano ben superiori a quelli dell'edificio isolato il cui valore massimo è 0.29 m/sec², la percentuale di riduzione dell'accelerazione di piano dell'edificio isolato rispetto a quello a base fissa è mostrata nella seguente tabella:

Tabella 8
Percentuale di riduzione dell'accelerazione ai piani dell'edificio isolato rispetto a quello a base fissa.

Piano	Percentuale di riduzione
Base (accelerazione terreno)	-56.1%
Piano 1	-61.5%
Piano 2	-68.8%
Piano 3	-72.9%
Piano 4	-74.7%
Piano 5	-78.3%
Terrazzo	-83.3%
Copertura	-85.9%

7. Progetto del sistema di isolamento sismico

Il sistema d'isolamento è composto da isolatori elastomeri tipo LRB (gomma e piombo) ed appoggi scorrevoli di tipo multidirezionale progettati e costruiti dalla società Agom International S.r.l.

Per l'analisi dinamica del sistema isolato è stato impiegato lo spettro di risposta già descritto al punto 2 tenendo conto dello smorzamento di progetto degli isolatori pari al 10%.

Considerati i risultati, si nota che il sistema d'isolamento alla base riduce notevolmente il valore di picco dell'accelerazione ai piani e quindi anche i potenziali rischi di danni per terremoti di elevata intensità. Il comportamento globale dell'opera isolata, riconducibile con buona approssimazione a quello di un sistema a singolo grado di libertà, permette, inoltre, di minimizzare gli spostamenti orizzontali tra i vari piani quindi con conseguente eliminazione di danni in caso sia di sismi frequenti che di elevata intensità.

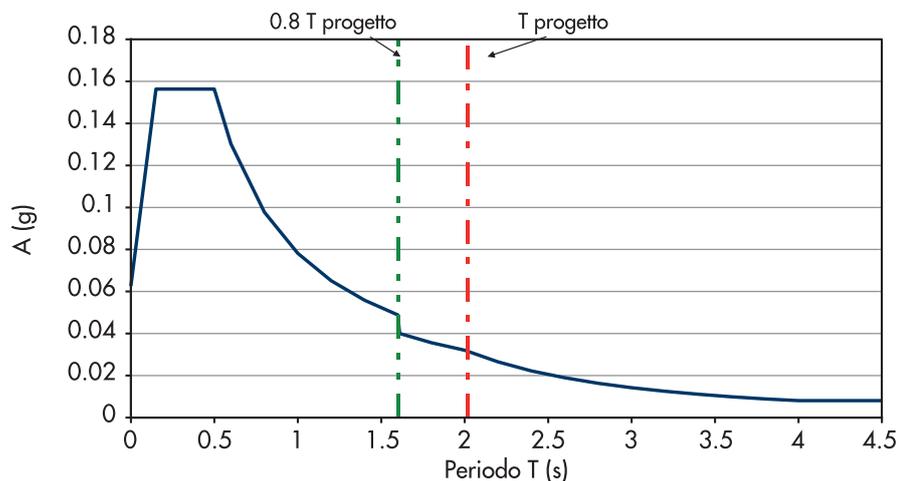
L'andamento temporale degli spostamenti dei piani è qualitativamente simile a quello delle accelerazioni, in particolare, per il sistema a base fissa il massimo spostamento di interpiano è circa 15 mm, mentre nel caso di sistema isolato il valore scende a circa 3 mm.

Mediante le analisi dinamiche sono state anche valutate le rotazioni dei dispositivi di vincolo (isolatori ed appoggi) per verificare che l'avere il piano di scorrimento su due livelli (piano isolatori e piano box sotto ascensore-scala) non generasse significative rotazioni globali della struttura isolata. Dall'analisi dei risultati si evince che in condizioni sismiche non si evidenziano valori di rotazioni anomale, e comunque essi sono sempre ampiamente entro i limiti progettuali dei dispositivi.

Come previsto dalla normativa, l'impiego di un sistema in grado di dissipare energia permette la riduzione delle ordinate spettrali a partire da un valore di ascissa pari a 0.8 T (dove T è il periodo del sistema isolato). Lo spettro di progetto per la struttura isolata è quindi quello rappresentato in Figura 7.

Il sistema d'isolamento è realizzato da 15 isolatori in gomma-piombo e 13 appoggi scorrevoli. In totale i punti d'appoggio della struttura sono 28. I 6 appoggi scorrevoli posizionati sotto il vano

Figura 7
Periodi di progetto di riferimento e corrispondente pseudo-accellerazione spettrale.



scala e ascensore sono al livello del piano interrato box, tutti gli altri dispositivi sono collocati alla quota di progetto, cioè in sommità del piano box, in modo da essere facilmente raggiungibili per le ispezioni in opera ed eventuale manutenzione. I risultati delle analisi dinamiche per la valutazione dello spostamento orizzontale dei dispositivi sono elencati in Tabella 9:

Condizione di carico	Spost. X (mm)	Spost. Y (mm)	Spost. combinato (mm)
SISMA-X-SLU	45	26	52
SISMA-Y-SLU	27	44	52
SISMA-X-SLS	18	12	21
SISMA-X-SLS	11	18	21

Come previsto dalla normativa, è stata inoltre considerata un'eccentricità del 10% della massa

8. Caratteristiche progettuali dei dispositivi AGOM

Isolatori tipo Agom H-Safe LRB

Isolatori in gomma armata e nucleo di piombo aventi le seguenti caratteristiche:

- carico verticale massimo statico in servizio SLS = 1300 kN;
- carico verticale massimo statico allo stato limite ultimo ULS = 1750 kN;
- carico verticale con sisma allo stato limite ultimo ULS = 1250 kN;
- rigidità orizzontale allo spostamento di progetto $K_h = 1.5 \text{ kN/mm}$;

9. Prove sperimentali sugli isolatori

Si è scelto di impiegare isolatori elastomerici con nucleo dissipativo in piombo, già omologati ai sensi della norma OPCM n. 3431, in modo da dover effettuare le sole prove di accettazione svolte su numero 4 isolatori. Tali prove sono state effettuate nel febbraio 2008 presso il laboratorio indipendente Eucentre di Pavia, in particolare sono stati svolti i seguenti test:



sismica per tener conto di eventuali incertezze sulla distribuzione delle masse che possono influenzare la risposta del sistema d'isolamento. Dalle analisi con massa eccentrica si è valutato un massimo incremento dello spostamento orizzontale dell'ordine del 15%, quindi il massimo spostamento dei dispositivi nella condizione peggiore di sisma allo stato limite ultimo con distribuzione eccentrica delle masse è pari a 60 mm. Ai fini del progetto dei dispositivi d'isolamento lo spostamento di calcolo viene amplificato del coefficiente 1.2, come previsto dalla normativa, conseguentemente lo spostamento di progetto è pari a 72 mm; si assume quindi il valore 75 mm per le verifiche strutturali dei dispositivi. Tale valore è compatibile con il giunto tra edificio e terreno circostante che consente un massimo spostamento relativo pari a 100 mm.

- smorzamento viscoso equivalente = 10%;
- spostamento orizzontale di progetto = 60 mm;
- spostamento orizzontale di verifica = 75 mm.

Appoggi scorrevoli multidirezionali tipo Agom AGPM:

- carico verticale massimo statico in servizio SLS = 2550 kN;
 - carico verticale massimo statico allo stato limite ultimo ULS = 3850 kN;
 - spostamento orizzontale di progetto = 75 mm.
- È da notare come si hanno i valori massimi dei carichi verticali per gli appoggi scorrevoli posizionati sotto i vani scala ed ascensore.

- valutazione della rigidità verticale;
- valutazione del modulo G (e quindi della rigidità orizzontale) e smorzamento viscoso equivalente. prova d'aderenza elastomero-acciaio.

In Figura 8 è mostrato il tipo di isolatore utilizzato, mentre in Figura 9 si può osservare una fase delle prove di validazione mediante pressa e tavola vibrante.



Tabella 9
Spostamenti orizzontali dei dispositivi ottenuti dalle analisi dinamiche.

Figura 8
Tipico isolatore utilizzato nel presente progetto (isolatore elastomerico con nucleo dissipativo in piombo).

Figura 9
Prove sperimentali sugli isolatori mediante pressa e tavola vibrante.

Tabella 10
Confronto fra dati e risultati sperimentali ottenuti dai test sugli isolatori.

	Valore progetto	Valore medio sperimentale statico	Valore medio sperimentale dinamico	Differenza percentuale statica	Differenza percentuale dinamica
Rigidezza orizzontale (KN/mm)	1.5	1.40	1.44	-7%	-4%
Smorzamento (%)	10	9.65	10.85	-3.5%	+8.5%

In Tabella 10 è mostrato il confronto tra i dati progettuali e quelli sperimentali medi ottenuti dalle prove sui 4 isolatori.

La rigidezza verticale media vale 1285 KN/mm, da cui il rapporto tra la rigidezza verticale e quella orizzontale vale 856 e quindi, essendo maggiore di 800 volte, non è stato considerato nell'analisi sismica il contributo del sisma verticale in accordo alla normativa.

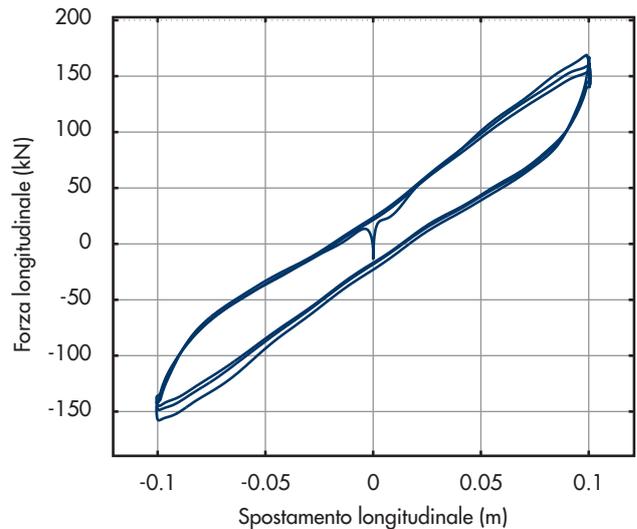
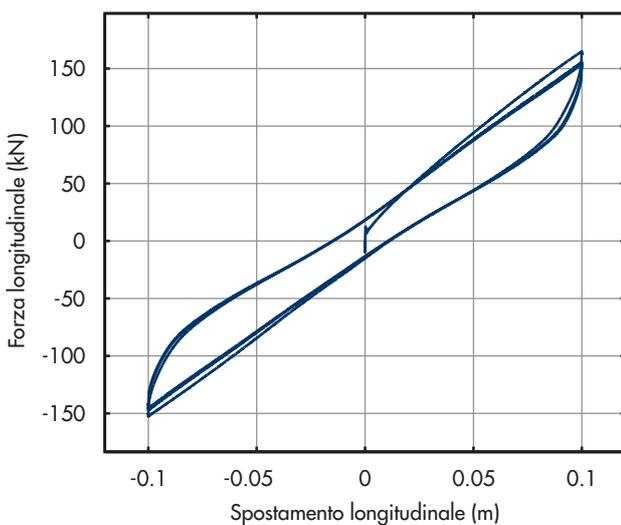
La Tabella 10 mostra come i parametri (rigidezza orizzontale e smorzamento) sperimentali siano molto aderenti a quelli progettuali. Le prove sono state svolte sia con la valutazione della rigidezza

orizzontale statica sia dinamica per verificare la differenza di risposta degli isolatori per una completa caratterizzazione dei dispositivi; in realtà, la norma per le prove di accettazione richiede solo la prova statica o dinamica.

La rimanente prova d'aderenza elastomero-acciaio è stata effettuata imponendo agli isolatori lo spostamento orizzontale di progetto verificando l'assenza di danni al dispositivo.

In Figura 10 è possibile osservare i dati ottenuti durante i test sperimentali per imposizione di una storia di spostamento ciclica finalizzati alla valutazione del modulo tangenziale statico G.

Figura 10
Confronto tra cicli d'isteresi ottenuti per la valutazione del modulo G statico (a sinistra) e dinamico (a destra).



10. Considerazioni sul comportamento del sistema d'isolamento

Essendo il sistema d'isolamento composto da isolatori ad alta dissipazione d'energia e da appoggi scorrevoli, risulta interessante, utilizzando anche i dati sperimentali ottenuti, esaminare i seguenti aspetti:

- abbassamenti differenziati tra isolatori elastomerici ed appoggi scorrevoli;
- influenza dell'attrito degli appoggi scorrevoli sulla risposta del sistema d'isolamento;
- verifica dell'assenza di forze di trazione su tutti i dispositivi in particolare nelle posizioni più critiche presso il vano scala-ascensore;

- stabilità degli isolatori in configurazione deformata.

1. Abbassamenti differenziati tra isolatori elastomerici ed appoggi scorrevoli.

Il comportamento a compressione degli isolatori è approssimabile con una risposta lineare con una rigidezza calcolata teoricamente e verificata durante le prove di accettazione.

Gli appoggi scorrevoli impiegati in questo progetto sono della tipologia a disco elastomerico incapsulato costituiti da piastra acciaio con un disco di elastomero confinato all'interno; la funzione del disco è quella di permettere le rotazioni mentre il movimento avviene su una superficie di PTFE a contatto

con acciaio inossidabile opportunamente ingrassata come richiesto dalla norma EN1337-2 relativa agli apparecchi d'appoggio.

Questa tipologia d'appoggio ha una rigidità a compressione maggiore rispetto a quella degli isolatori. Non appena l'appoggio viene caricato, infatti, si azzerano i giochi di assemblaggio ed il disco di elastomero, una volta compresso, è completamente confinato nella sua sede e non potendo spianciare lateralmente risulta più rigido a compressione rispetto all'elastomero dell'isolatore che è libero lateralmente. Per questo progetto non sono state effettuate prove di compressione sugli appoggi scorrevoli, comunque dai risultati ottenuti da varie prove su dispositivi simili, si è valutato che la rigidità a compressione degli appoggi scorrevoli è pari a tre volte più grande rispetto a quella degli isolatori qui impiegati. Nell'analisi numerica dell'edificio isolato le diverse rigidità dei dispositivi sono state considerate per valutare in fase statica e sismica la distribuzione delle forze verticali ed i conseguenti effetti (tagli e momenti) sulla struttura. Le analisi sono state effettuate in fase progettuale e poi ripetute con i dati sperimentali ottenuti dalle prove di accettazione sugli isolatori per verificare che la distribuzione dei carichi verticali sui dispositivi fosse congrua con il loro progetto. Nelle varie simulazioni la variabilità del carico verticale sui dispositivi del sistema d'isolamento sismico per effetto dei diversi valori delle rigidità verticali, è contenuta entro il 10% del valore di progetto.

È interessante anche evidenziare che la risposta a taglio degli isolatori elastomerici è in pratica indipendente dal carico verticale applicato; la variazione della forza di compressione non altera il comportamento dinamico della struttura. Questo significa che possibili cedimenti differenziali dei vincoli, ovviamente entro i limiti progettuali, hanno un'influenza trascurabile sulla risposta del sistema d'isolamento. Ciò non accade per altri dispositivi tipo quelli ad attrito dove la risposta dipende dal carico verticale applicato la cui possibile variabilità, quindi, deve essere tenuta in debita considerazione in fase progettuale.

2. Influenza dell'attrito degli appoggi scorrevoli sulla risposta del sistema d'isolamento. Nel progetto del sistema d'isolamento e nella simulazione numerica della sua risposta dina-

mica, l'attrito degli appoggi scorrevoli è stato trascurato. Tale ipotesi è dovuta al fatto che gli appoggi scorrevoli utilizzati hanno una superficie di scorrimento in PTFE ed acciaio inossidabile conforme a quanto previsto dalla norma EN1337-2; la superficie di PTFE ha delle nicchie riempite con grasso siliconico. L'impiego di nicchie e grasso permette di minimizzare l'attrito e di garantire la durabilità del PTFE nel tempo. Da varie prove sperimentali su appoggi simili a quelli qui impiegati, si deduce che il coefficiente d'attrito di primo distacco è circa 0.8 per cento e quello dinamico circa 0.5 per cento su appoggi nuovi testati prima di essere installati. Dai risultati è evidente che la forza di attrito degli appoggi scorrevoli è trascurabile ai fini del progetto della struttura ed inoltre non considerare il contributo di dissipazione d'energia degli appoggi scorrevoli massimizza la risposta degli isolatori elastomerici nel calcolo numerico il cui progetto risulta quindi a vantaggio di sicurezza.

3. Verifica dell'assenza di forze di trazione su tutti i dispositivi in particolare nelle posizioni più critiche presso il vano scala-ascensore. L'analisi del comportamento dinamico della struttura isolata ha permesso di verificare l'assenza di forze di trazione sui dispositivi a conferma del buon comportamento globale della struttura isolata. L'adeguata combinazione di isolatori elastomerici ed appoggi scorrevoli ha permesso un'ottima coincidenza tra il centro delle masse e quello delle rigidità che oltre a minimizzare gli effetti torcenti globali dell'opera permette anche di evitare forze di trazioni che possono verificarsi nella zone più critiche quali vani scala-ascensore.
4. Stabilità degli isolatori in configurazione deformata.

Un importante aspetto da considerare nel progetto e nella verifica sperimentale degli isolatori elastomerici è il rischio d'instabilità; questi ultimi infatti, in configurazione deformata, sono sottoposti a carico di compressione con contemporaneo effetto flettente dovuto all'eccentricità della forza verticale. In fase di progetto degli isolatori la norma prevede una verifica di carico critico in configurazione deformata. Le prove sperimentali prevedono un controllo del rischio d'instabilità mediante un opportuno test di compressione e taglio ripetuto con valori di compressione pari rispettivamente a 1.5 volte e 0.5 volte il carico verticale di progetto. Con

questa prova quindi la stabilità dell'isolatore è verificata con un'elevata variabilità del carico verticale (+/- 100% rispetto al valore di progetto) ben superiore a quella ottenuta nell'analisi dinamica della struttura.

Le prove di stabilità vengono effettuate in fase di qualificazione del dispositivo e non sono richieste nelle prove di accettazione, per garantire che l'isolatore sottoposto alle sole prove di accettazione non sia a rischio instabilità la norma prevede che quest'ultimo sia progettato con un fattore di forma secondario S2 maggiore di quello dell'isolatore di quello già qualificato.

La durabilità nel tempo degli isolatori e la variazione delle loro proprietà viene verificata mediante la prova di invecchiamento artificiale prevista tra le prove di qualificazione. La massima variazione ammessa del modulo G dell'elastomero nuovo e invec-

chiato è pari al 15%.

Nel progetto dell'edificio qui descritto è stata simulata anche la risposta degli isolatori invecchiati per valutarne l'influenza sul comportamento sismico, controllando in particolare: il periodo proprio di vibrazione, lo spostamento e forza di taglio. I risultati hanno confermato l'adeguatezza delle ipotesi progettuali.

Dall'analisi del comportamento dinamico della struttura isolata in caso di evento sismico di elevata intensità si conclude che tutti i dispositivi del sistema d'isolamento restano compressi; si ottiene, inoltre, una distribuzione omogenea delle forze orizzontali evitando la concentrazione delle forze dovute al sisma nelle zone più rigide della struttura (quali vani scala e setti d'irrigidimento) che si hanno per le strutture tradizionali a base fissa.

11. Cantiere

Il cantiere iniziato nella primavera 2009 con la demolizione dell'edificio esistente (discoteca "Rainbow") sul terreno in cui viene costruita la nuova struttura, ha permesso l'installazione degli isolatori nel settembre 2009, una volta terminato il piano interrato adibito a parcheggio e

gettati i pilastri al livello della prima soletta.

Si riportano qui di seguito alcuni particolari della posa degli isolatori ed appoggi scorrevoli (Figure 11, 12, 13). È da notare che Per ottenere il piano rigido al di sotto degli isolatori, sono state realizzate delle travi di collegamento in testa ai pilastri.

Figura 11
Dettagli isolatori posati (foto a sinistra) ed appoggio scorrevole al centro, (foto a destra).



Figura 12
Ulteriori dettagli degli isolatori (foto a sinistra) e dell'appoggio scorrevole (foto a destra) con la sovrastruttura in appoggio.





Figura 13
Dettagli delle travi di collegamento fra la testa dei pilastri.



Figura 14
Edificio in costruzione (foto a sinistra) rendering raffigurante l'edificio ultimato (a destra).

Attualmente la struttura dell'edificio è stata completata. Si sta procedendo con gli impianti e la consegna è prevista nell'autunno 2011.

In Figura 14 si può notare l'edificio in costruzione ed un rendering con l'aspetto finale ad opera terminata.

12. Manutenzione dei dispositivi d'isolamento e procedure per l'eventuale sostituzione

Interventi di manutenzione straordinaria e/o eventuale sostituzione degli isolatori devono essere effettuati solo in casi eccezionali in quanto gli isolatori sono progettati e costruiti per ridurre al minimo la manutenzione e non avere alcun danneggiamento significativo per il massimo sisma di progetto.

Per l'edificio in discussione il progettista strutturale ha previsto opportuni accorgimenti per l'eventuale sostituzione dei dispositivi; ove possibile, in prossimità dei dispositivi, sono state considerate zone di posizionamento dei martinetti idraulici per il sollevamento della struttura; in altri punti in cui non era possibile ricavare lo spazio per il posizionamento dei martinetti è stata studiata una struttura temporanea per il loro collocamento.

Gli isolatori impiegati nel progetto qui trattato sono rincentranti quindi non presentano spostamenti

residui significativi al termine del sisma; in fase progettuale, comunque, sono stati inseriti adeguati rinforzi nel muro perimetrale per l'eventuale posizionamento di martinetti in grado di riportare la struttura alla posizione antecedente al sisma.

Tutti i dispositivi del sistema d'isolamento hanno tirafondi ad essi collegati tramite bulloni. I tirafondi sono inghisati nel calcestruzzo. Nel caso in cui si debba sostituire un dispositivo è possibile rimuoverlo svitando i bulloni d'ancoraggio; i tirafondi rimangono in opera senza alcun danneggiamento e ad essi verranno nuovamente vincolati i bulloni del nuovo apparecchio.

Sono state previste, inoltre, contropiastre in acciaio interposte tra i dispositivi e la struttura: esse non hanno comportamento strutturale e quindi non devono essere removibili, ma permettono la sostituzione degli isolatori senza necessità di alcun intervento di ripristino alle superfici di calcestruzzo a contatto con gli apparecchi.

13. Conclusioni

L'articolo mostra come l'applicazione della tecnica dell'isolamento sismico ad una struttura privata ad uso abitativo sia di semplice realizzazione e permetta una notevole riduzione degli effetti del terremoto con conseguente sicurezza degli occupanti, assenza di danni strutturali o interventi di ripristino alle finiture interne (intonaco, serramenti, porte, ecc.) a sisma avvenuto. In zona ad alto rischio sismico, inoltre, il costo del sistema d'isolamento è compensato dal risparmio che si ottiene nella costruzione e quindi si abbina l'incremento delle prestazioni alla riduzione del costo globale degli edifici,

come già provato in varie applicazioni.

L'esperienza qui proposta dimostra che in fase sia di progettazione sia di costruzione, l'inserimento dei dispositivi di protezione sismica nell'edificio è alla portata di qualsiasi valido progettista ed impresa di costruzione.

Durante la costruzione di edifici isolati, si devono comunque curare alcuni dettagli quali, ad esempio, la realizzazione dell'opportuno varco tra edificio e terreno limitrofo per consentire lo spostamento orizzontale di progetto, i collegamenti flessibili degli impianti (gas, acqua) che sono fondamentali per il corretto funzionamento dell'opera in caso di sisma.

Ringraziamenti

Si ringraziano per la collaborazione e la disponibilità l'Avv. Stefano Pedroni della società Nero Mistrel pro-

prietaria dell'edificio, il Geom. Felice Bottiglieri della ditta Tassi Costruzioni che ha costruito l'opera ed il personale Eucentre per le prove sperimentali degli isolatori.

Bibliografia

Dolce M., Cardone D., Ponzo F.C., Di Cesare A. (2004)
- Progetto di Edifici con Isolamento Sismico. Iuss Press, Pavia.

Eurocode 8 (2006) - Design provisions for earthquake resistance of structures Part 1.3. General rules. Specific rules for various materials and elements. Eur.

Comm. For Standardisation, Brussels, Belgium.

Ordinanza Presidente del consiglio dei Ministri (2005)
- Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica OPCM n. 3431.

Programma di calcolo SAP2000 (2008).