

Gli isolatori a singola superficie di scorrimento per l'adeguamento sismico di strutture esistenti in c.a.: un caso studio

Marinella Fossetti

Università degli Studi di Enna "Kore", Facoltà di Ingegneria e Architettura. Cittadella Universitaria, 94100 Enna

Marcello Merlino, Giulio Ventura

Società Kaltha s.r.l. Viale Europa 145, 50126 Firenze

Carmelo Miragliotta

Libero Professionista, via Umberto I 174, 98063 Gioiosa Marea (ME)

INTRODUZIONE

L'impiego di sistemi per il "controllo passivo delle vibrazioni" di una struttura soggetta a sisma ha rappresentato negli ultimi anni una delle tecniche più diffuse per fronteggiare le conseguenze dei terremoti (Castaldo et al. 2016, Cossu et al. 2011, Di Stefano et al. 2017, Martelli et al. 2011, Theodore et al. 2011,). Tra i sistemi a "controllo passivo delle vibrazioni" rientra la tecnica dell'isolamento alla base che consente la riduzione dell'azione sismica sugli edifici attraverso un comportamento predefinito, senza adattarsi interattivamente al terremoto, ma subendolo passivamente.

Le installazioni di isolatori per la protezione sismica di strutture ed infrastrutture civili sono numerose nel mondo, in particolare, nelle aree ad elevata pericolosità sismica. In Italia invece, tale tecnica è stata recepita solo di recente con l'entrata in vigore delle NTC/2008 e non ha ancora trovato ampie applicazioni. Pertanto, tutto l'iter di progetto, dalla concezione del sistema d'isolamento alla sua posa in opera, comporta ancora oggi novità importanti (Martelli et al. 2009, Merlino et al. 2015, Trombetta et al. 2013).

L'installazione di sistemi di isolamento, per le nuove costruzioni, risulta più agevole rispetto all'impiego degli stessi dispositivi in edifici esistenti (*retrofit*), in quanto è necessario eseguire il taglio delle fondazioni o delle strutture portanti del piano più basso. Ciò nonostante, l'adeguamento sismico di edifici esistenti con isolatori, può risultare molto vantaggioso rispetto alle "tradizionali" tecniche di intervento, soprattutto in presenza di manufatti con importanti problemi di asimmetrie in pianta o in elevazione (Ciavettone et al. 2013, Colapietro et al. 2013, Landolfo et al. 2011).

Nel presente lavoro, viene mostrata una sintesi delle fasi operative che vanno dalla progettazione alla posa in opera di un intervento di adeguamento sismico per un edificio esistente in c.a., mediante l'impiego di isolatori a pendolo scorrevole (*friction pendulum system*).

IL CASO STUDIO

L'edificio presenta una struttura portante in c.a., è costituito da un piano interrato e da sei elevazioni fuori terra per un'altezza complessiva di circa 28.00 m e mostra una forma irregolare in pianta inscrivibile in rettangolo di dimensioni di circa 42.00 x 22.00 m. In Figura 1 e in Figura 2 si riporta una rappresentazione schematica della pianta del piano terra e di una vista prospettica fuori scala.

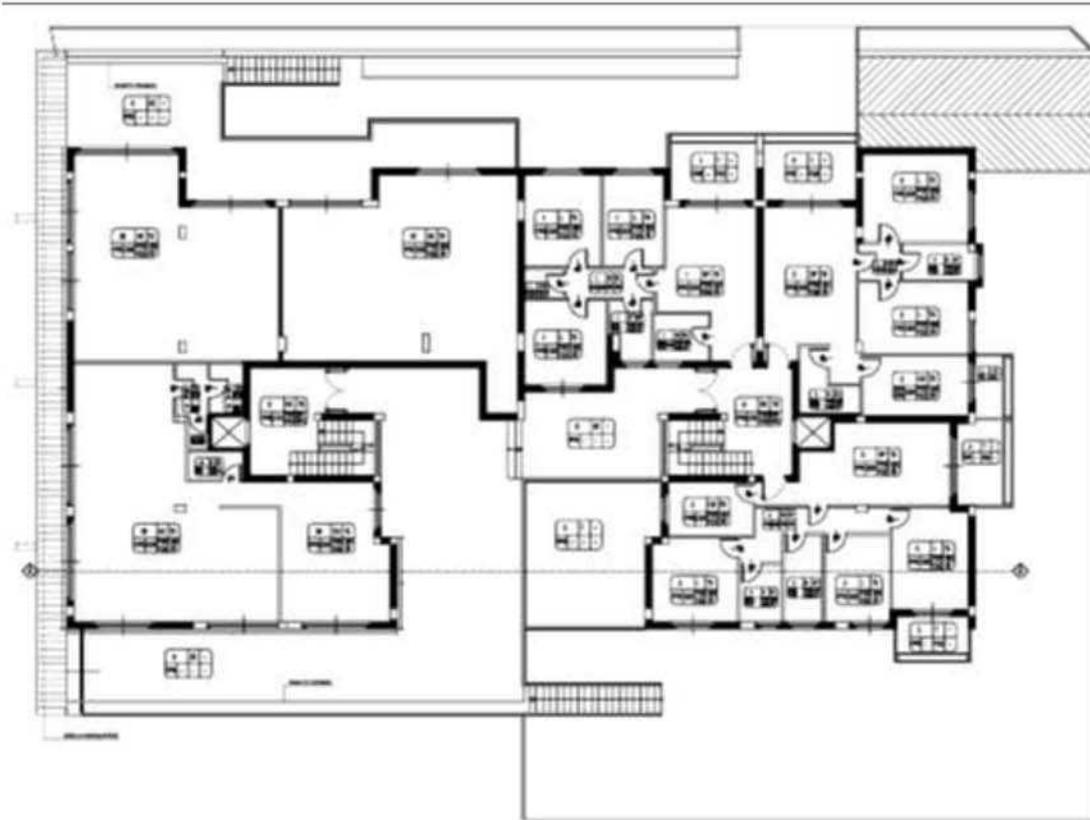


Figura 1 - Pianta piano terra (fuori scala).



Figura 2 - Prospetto laterale (fuori scala).

La conoscenza del manufatto è stata raggiunta attraverso analisi storiche e dell'evoluzione funzionale dell'edificio, effettuando rilievi geometrici e dei dettagli costruttivi, analizzando il quadro fessurativo e deformativo ed avendo eseguito indagini diagnostiche (non distruttive e distruttive) sulla struttura portante ed indagini geognostiche sul terreno di fondazione.

La tipologia ed organizzazione del sistema resistente è a telaio con travi disposte ortogonalmente all'orditura dei solai e collegamenti trasversali. Vi è la presenza di setti in c.a. che delimitano due nuclei scale ed ascensori posti in maniera pressoché simmetrica rispetto all'asse trasversale del corpo di fabbrica.

In generale, tutte le travi risultano emergenti con tre principali tipologie di sezione trasversale: 60 x 35 cm, 40 x 60 cm e 30 x 50 cm. I pilastri non presentano rastremazioni ed hanno quasi tutti una sezione trasversale di 60 x 40 cm. I solai sono realizzati in latero cemento con spessore di $h = 16+4$ cm ai vari impalcati ed $h = 20+4$ cm alla prima elevazione.

L'armatura è costituita da barre ad aderenza migliorata $\phi 14$ e $\phi 16$ per le travi e $\phi 16$ e $\phi 18$ per i pilastri. Nelle travi sono presenti alcune barre piegate a 45° in corrispondenza degli appoggi. Le staffe sono costituite da barre ad aderenza migliorata $\phi 6$, poste ad un passo di circa 20 cm nelle travi e di circa 25 cm nei pilastri. Non sono presenti staffe nei nodi trave-colonna.

Dalle prove sui materiali è stato individuato un calcestruzzo del tipo C20/25 e un acciaio per le barre di armatura del tipo FeB44k.

Le indagini conoscitive sono state condotte con l'obiettivo di acquisire tutte le informazioni necessarie ad una corretta interpretazione del comportamento strutturale dell'edificio e quindi con l'obiettivo di ottimizzare l'analisi strutturale per la valutazione della capacità degli elementi resistenti. Dalla quantità e qualità delle informazioni acquisite è stato individuato un livello di conoscenza adeguato e un fattore di confidenza $FC=1.20$.

PROGETTO DEL SISTEMA DI ISOLAMENTO PER L'ADEGUAMENTO SISMICO DEL CASO STUDIO

Per valutare la vulnerabilità sismica dell'edificio nello stato attuale è stata eseguita una analisi pushover mettendo a punto il modello numerico mostrato in Figura 3. Il software agli elementi finiti utilizzato è il codice di calcolo Straus7 Version 2.2.3 ©HSH s.r.l.

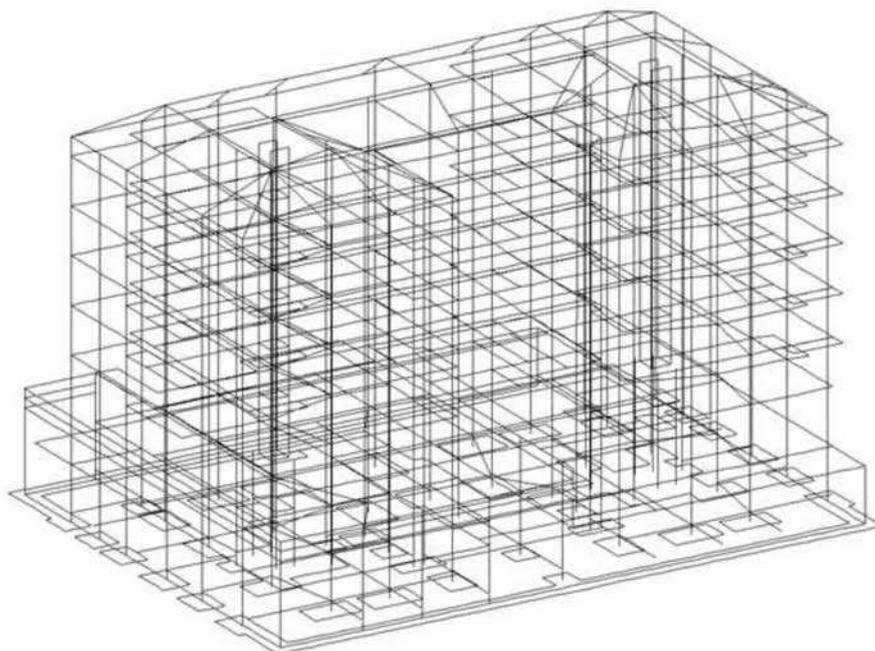


Figura 3 - Modello wireframe 3D dell'edificio nello stato attuale.

L'accelerazione di picco di moto al suolo (PGA) è stato il parametro scelto per definire il livello di inadeguatezza della struttura nei confronti dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). I risultati dell'analisi pushover nello stato attuale dell'edificio hanno confermato la necessità di procedere all'adeguamento del corpo di fabbrica in quanto la capacità sismica dell'edificio (PGA pari a 0.1637g) risultava inferiore alla domanda richiesta (PGA pari a 0.2608g).

Il progetto dell'intervento di adeguamento basato sull'impiego di un *friction pendulum system*, ha richiesto uno studio iniziale, fondamentale e nel contempo delicato, consistente nella scelta del piano di isolamento. In particolare, il piano di isolamento è stato definito tenendo in considerazione i seguenti fattori: (i) presenza di un locale con destinazione d'uso idonea per le operazioni di installazione e manutenzione dei dispositivi; (ii) tipologia costruttiva delle fondazioni esistenti; (iii) presenza di vani scala ed ascensore; (iv) tecnica scelta per il trasferimento temporaneo del carico verticale durante le operazioni di installazione dei dispositivi. Dai risultati dello studio condotto, si è previsto, di collocare gli isolatori in testa ai pilastri del piano interrato.

Prima di eseguire le analisi strutturali non lineari di dettaglio (analisi dinamiche *time history*) è stato eseguito una predimensionamento di massima del sistema di isolamento attraverso una analisi iterativa semplificata monodimensionale in spettro di risposta. Tale analisi preliminare costituisce uno strumento di fondamentale importanza nella progettazione del sistema d isolamento in quanto consente di ricavare dei parametri di controllo sui risultati che derivano delle analisi dinamiche *time history*.

Il software agli elementi finiti utilizzato per le analisi dinamiche non lineari è stato il codice di calcolo Straus7 Version 2.2.3 ©HSH s.r.l. In Figura 4 si riporta una rappresentazione schematica di ubicazione dei dispositivi in pianta mentre, in Figura 5 viene mostrato il modello numerico agli elementi finiti dell'edificio con isolatori.

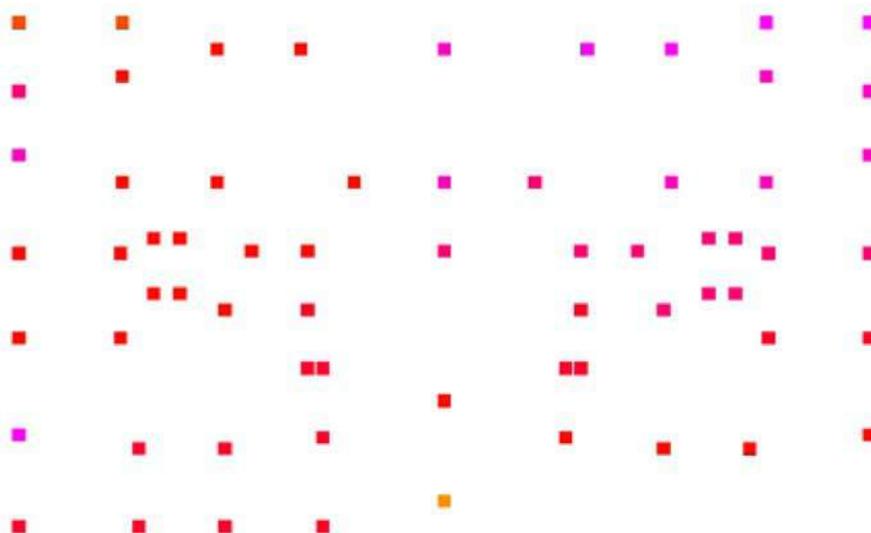


Figura 4 - Pianta dei dispositivi (fuori scala).

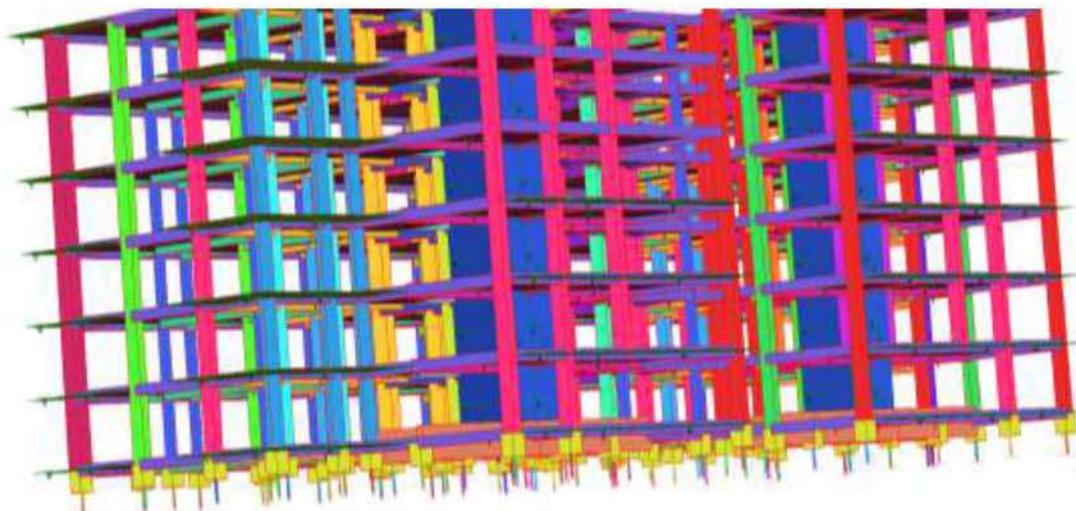


Figura 5 - Stralcio del Modello 3D della struttura con isolatori.

Si evidenzia che la presenza di una maglia dei pilastri molto fitta in corrispondenza dei due vani scala (vedi Figura 1), ha creato delle condizioni di criticità nelle verifiche sismiche dell'edificio. Per ovviare a tale inconveniente è stata adottata la soluzione di sospendere ogni vano scala su due travi alte (40 x 150 cm) appoggiate su quattro isolatori (Figura 6).

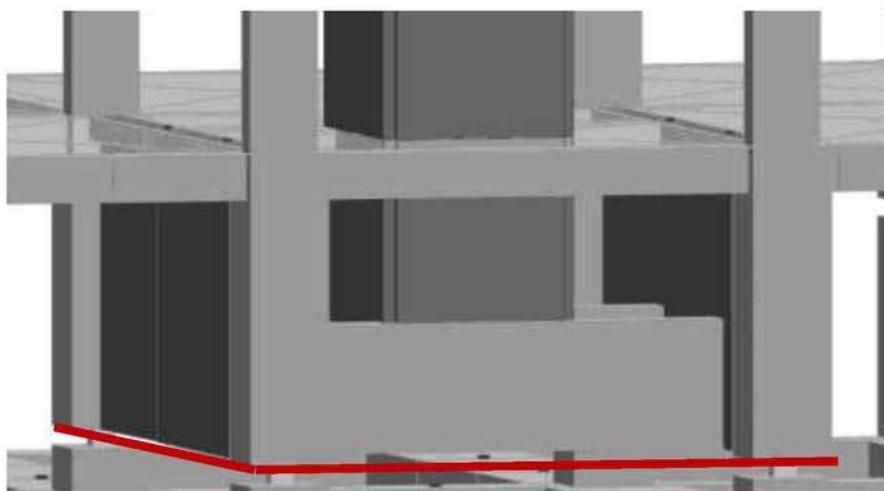


Figura 6 - Dettaglio trave alta di sostegno dei vani scala.

Il dispositivo è stato modellato mediante l'elemento "Connection" di Straus7 con comportamento di tipo non lineare per riprodurre la legge fissata fra la rigidità orizzontale dell'isolatore, il carico verticale agente e lo spostamento sismico. Nello specifico, il singolo isolatore è stato schematizzato con un legame caratterizzato da una rigidità variabile in funzione del carico verticale agente e dello spostamento in atto.

Le verifiche negli elementi strutturali sono state condotte, in accordo a quanto indicato nelle NTC/2008, considerando i valori massimi degli effetti più sfavorevoli delle analisi dinamiche non lineari (analisi *time history* con integrazione al passo) ottenute assegnando le tre coppie di accelerogrammi spettrocompatibili mostrate in Figura 7.

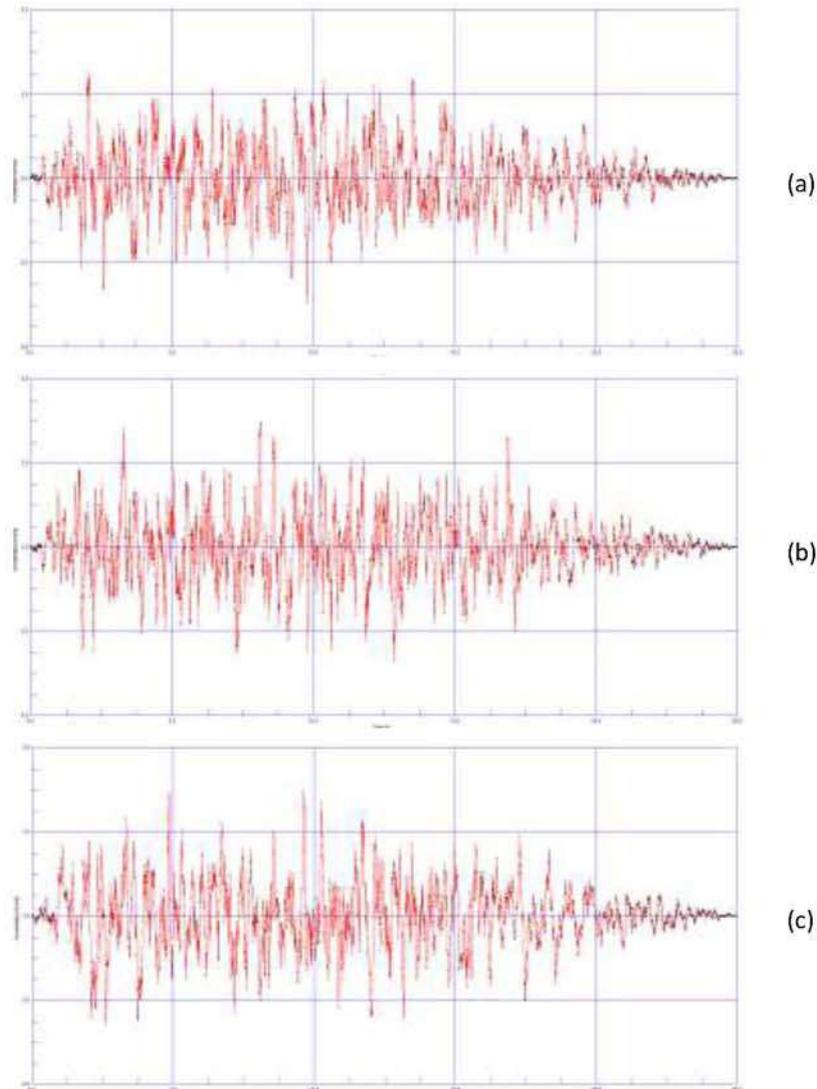
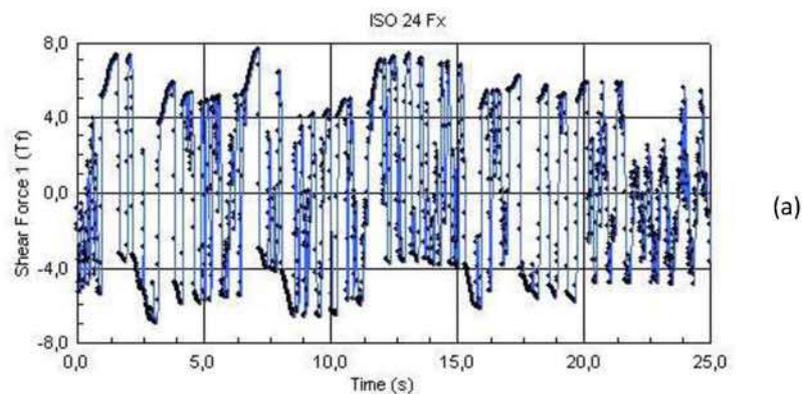


Figura 7 - Accelerogrammi utilizzati per l'analisi time history: (a) gruppo 1; (b) gruppo 2; (c) gruppo 3.

Le analisi numeriche hanno compreso lo studio del comportamento dinamico dei dispositivi in presenza dell'evento sismico. A titolo di esempio, per un isolatore del sistema progettato, si riporta in Figura 8 e in Figura 9 l'andamento del tagliante e dello spostamento in funzione del tempo, per entrambe le direzioni X, ed Y di ingresso del sisma.



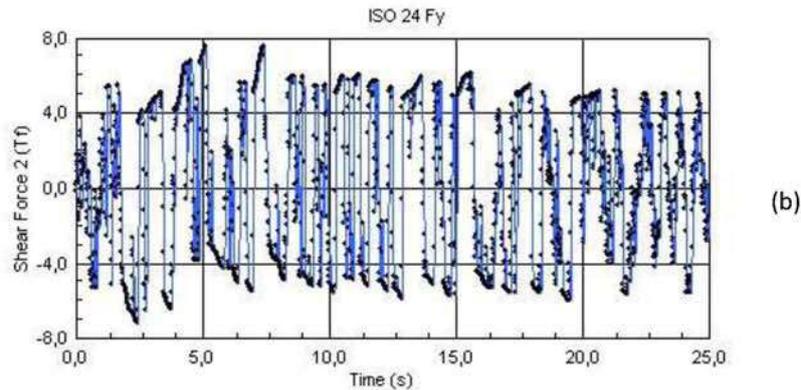


Figura 8 - Andamento del tagliante in funzione del tempo: (a) direzione X; (b) direzione Y.

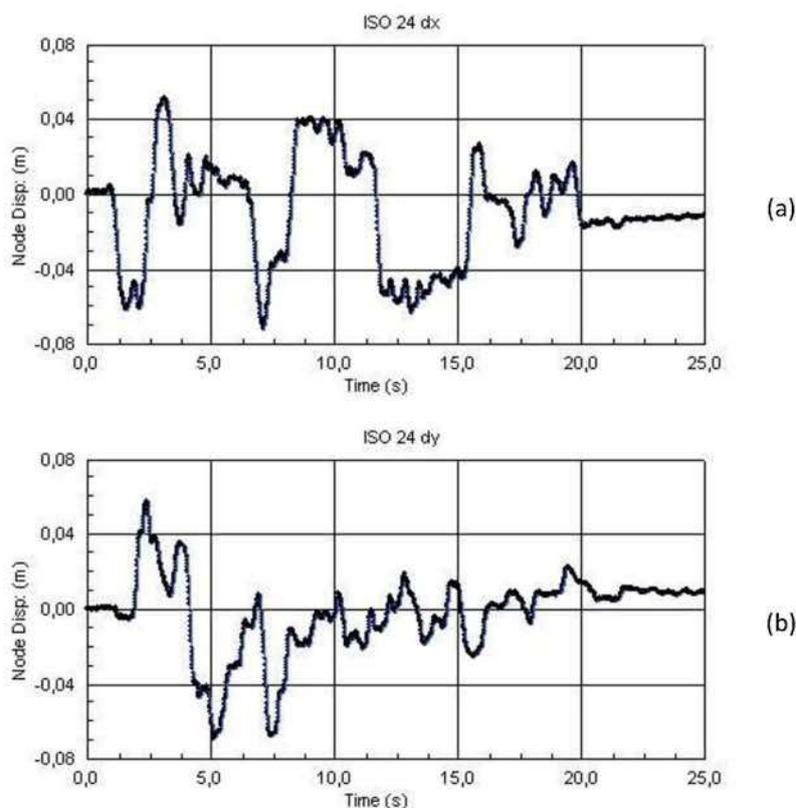


Figura 9 - Andamento dello spostamento in funzione del tempo: (a) direzione X; (b) direzione Y.

Dalle analisi numeriche sono state così ricavate tutte le informazioni necessarie per la costruzione del ciclo d'isteresi dell'isolatore, con l'obiettivo di ricavare l'energia dissipata dal dispositivo per effetto dell'attrito all'interfaccia di scorrimento durante l'evento sismico. A titolo di esempio, si riporta in Figura 10 a, un ciclo di isteresi di un isolatore.

Le dimensioni minime in pianta dell'isolatore sono state determinate considerando l'involuppo degli spostamenti assunti dal dispositivo in entrambe le direzioni durante l'evento sismico così come mostrato nella Figura 10 b, c, d. Tenendo in considerazione anche le azioni sollecitanti, è stato possibile definire le seguenti caratteristiche del dispositivo: raggio di curvatura pari a 4000 mm, coefficiente di attrito nominale pari a 0.038% e spostamento massimo pari a 200 mm.

Dimensionato il dispositivo, l'analisi numerica è stata conclusa eseguendo le verifiche di resistenza degli elementi strutturali secondo quanto indicato nelle NTC/2008.

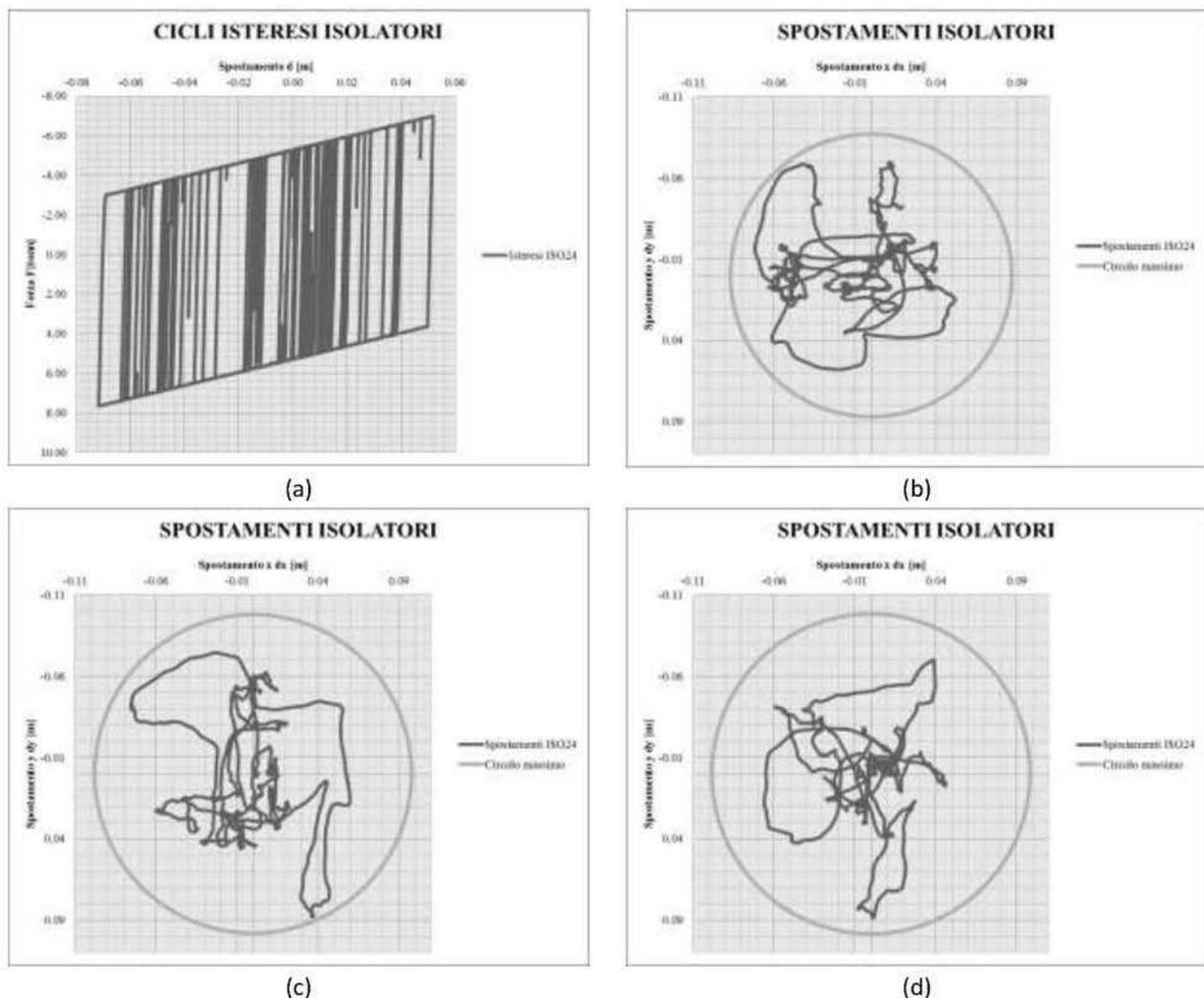


Figura 10 – (a) Esempio di un ciclo di isteresi di un isolatore. Curve $\delta x - \delta y$ per accelerogrammi: (b) gruppo 1; (c) gruppo 2; (d) gruppo 3

Per evidenziare i benefici in termini economici che possono derivare dall'utilizzo dell'isolamento sismico con dispositivi a scorrimento, è stata eseguita un'analisi comparativa con un progetto di adeguamento sismico dell'immobile concepito con tecniche "tradizionali".

Tra le tecniche "tradizionali" di adeguamento sismico, è stata presa in considerazione una delle tipologie di intervento maggiormente diffusa nella pratica progettuale, ossia l'incamiciatura in calcestruzzo di colonne e travi con la quale è possibile migliorare la capacità sismica dell'edificio incrementandone duttilità e/o resistenza globale. In questo caso, i risultati delle analisi numeriche condotte, prevedevano l'esecuzione di interventi molto invasivi ed estesi a tutti i piani dell'edificio coinvolgendo sia le travi che i pilastri. Ad esempio, per i pilastri, era necessario un aumento della sezione trasversale fino a 70 x 80 cm per il piano cantinato e il piano terra ed un ringrosso fino a 60 x 70 cm per i pilastri dei rimanenti piani. Si evidenziano anche gli interventi particolarmente invasivi che si dovrebbero eseguire per adeguare i nodi trave-colonna ai vari impalcati.

L'analisi costi-benefici eseguita tra le due metodologie di adeguamento sismico analizzate, ha messo in evidenza un costo dei due interventi quasi analogo (leggermente inferiore con l'isolamento sismico) ma un evidente beneficio a vantaggio dell'uso degli isolatori legato alla notevole limitazione degli interventi invasivi ai vari livelli del manufatto.

ALCUNE FASI OPERATIVE DI POSA IN OPERA DEI DISPOSITIVI

Prima dell'installazione dei dispositivi, sono state eseguite per alcuni elementi strutturali in elevazione, operazioni di manutenzione e di rinforzo locale.

È stato poi realizzato l'adeguamento delle travi di fondazione esistenti, inglobando le stesse in una platea armata, al fine di garantire una idonea resistenza alle azioni trasmesse dalla sovrastruttura e ridurre l'entità delle tensioni agenti sul terreno. In Figura 11 è mostrato un dettaglio strutturale delle operazioni di rinforzo delle travi di fondazione.



Figura 11 - Intervento di adeguamento delle travi di fondazione (© Kaltha s.r.l.).



Figura 12 - Intervento di adeguamento dei pilastri del piano cantinato (© Kaltha s.r.l.).



Figura 13 - Intervento di adeguamento dell'impalcato sovrastante il sistema isolamento (© Kaltha s.r.l.).

Nella fase successiva è stato previsto la posa in opera dell'intervento di adeguamento dei pilastri del piano cantinato mediante l'incamiciatura in c.a. (Figura 12). L'intervento ha permesso di raggiungere la capacità richiesta in termini di resistenza e rigidità. Inoltre, con l'aumento della sezione trasversale dei pilastri è stato possibile accogliere gli isolatori senza avere la necessità di costruire un capitello.

Al fine di realizzare un piano rigido al di sopra del sistema di isolamento, è stato altresì necessario procedere all'adeguamento dell'impalcato esistente mediante la realizzazione di un'unica piastra di spessore pari a 40 cm con armatura doppia e simmetrica costituita da barre $\phi 20$ a passo 20 cm in entrambe le direzioni così come mostrato in Figura 13.

Completate le operazioni di rinforzo strutturale, il passo successivo ha previsto l'installazione degli isolatori attraverso le seguenti fasi operative: (i) inserimento di martinetti idraulici messi a contrasto superiormente sulla sovrastruttura con opportuni dispositivi in modo da trasferire i carichi in fondazione durante le fasi di collocazione degli isolatori; (ii) taglio dei pilastri ed asportazione del dado di calcestruzzo per creare l'alloggiamento necessario all'ubicazione degli isolatori (in Figura 14, si mostra l'avvio delle operazioni di taglio dei pilastri ad inserimento avvenuto dei martinetti idraulici ed una fase operative del taglio; in Figura 15, si mostra una vista del pilastro a tagli avvenuti); (iii) Inserimento degli isolatori e successiva messa in carico del dispositivo con rimozione dei martinetti (Figura 16).



(a)



(b)

Figura 14 - Fase operativa taglio pilastri: (a) Martinetti di sollevamento e avvio delle operazioni di taglio; (b) estrazione lama diamantata (© Kaltha s.r.l.).



Figura 15 - Fase operativa taglio pilastri: vista a taglio completato (© Kaltha s.r.l.).



Figura 16 - Vista di un dispositivo installato (© Kaltha s.r.l.).

CONCLUSIONI

L'adeguamento sismico di edifici esistenti in c.a. con la tecnica dell'isolamento alla base richiede un approccio di non semplice esecuzione: si inizia con la valutazione della vulnerabilità sismica del manufatto nello stato attuale fino ad arrivare alla progettazione appropriata dell'intervento sia in termini di caratteristiche di dettaglio del sistema di isolamento che in funzione della sua installazione.

Nel presente lavoro si mostra un caso studio di adeguamento sismico di una struttura intelaiata in c.a. utilizzando dei dispositivi a pendolo scorrevole (*friction pendulum system*). È stato presentato approccio al problema che può rappresentare un utile riferimento nelle pratiche applicazioni.

Nel caso in esame, è stato inoltre dimostrato che l'adeguamento del manufatto con isolamento alla base presenta dei costi inferiori rispetto ad una "tradizionale" progettazione di adeguamento sismico, con il beneficio aggiunto che non è necessario intervenire in maniera estesa sugli elementi portanti della struttura in elevazione.

BIBLIOGRAFIA

- Castaldo, P., Ripani, M., 2016. Optimal design of friction pendulum system properties for isolated structures considering different soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 90, 74–87.
- Ciavattone, A., Borghini, A., Del Monte, E., Ortolani, B., Vignoli, A., 2013. Analisi della vulnerabilità sismica degli edifici ospedalieri situati in tre province della regione Toscana. *Atti su DVD ANIDIS 2013 – XVI Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 30 giugno-4 luglio, Padova, Italia.
- Colapietro, D., Fatiguso, F., Netti, A., Fiore A., Marano, G. C., 2013. IDA vs Pushover. Valutazione della necessità di interventi di recupero antisismico negli edifici esistenti in c.a. *Atti su DVD ANIDIS 2013 – XVI Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 30 giugno - 4 luglio, Padova, Italia.

- Cossu, M., Sonda, D., 2011. Miglioramento di edifici esistenti mediante isolamento sismico. *Atti del XIV Convegno ANIDIS, "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. Bari ottobre 2011.
- Di Stefano G., Fossetti M., Merlino M. (2017). Protezione sismica di strutture in cemento armato - progetto di un edificio con isolatori a pendolo scorrevole. *Edizioni Accademiche Italiane*. Pagine 204, ISBN: 978-3-330-78081-1.
- Landolfo, R., Mazzolani, F. M., Mammana, O., Portioli, F., Krstevska, L., Tashkov, L., Gramatikov, K., 2011. Seismic Retrofitting of Mustafa Pasha Mosque in Skopje: Finite Element Analysis. *Journal of Earthquake Engineering*. **15**, 620–639.
- Lucà Trombetta, P., Castellano, M. G., Cocchio, D., 2013. Adeguamento sismico di edifici mediante isolamento sismico. *Atti su DVD ANIDIS 2013 – XVI Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 30 giugno-4 luglio, Padova, Italia.
- Martelli, A., Forni, M. , 2009. Recenti Applicazioni dei sistemi di Controllo Passivo delle Vibrazioni Sismiche – Parte 3: Paesi minori. *Atti su DVD ANIDIS 2009 – XIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 28 giugno-2 luglio, Bologna, Italia.
- Martelli, A., Clemente, P., Forni, M., Panza, G.F., Salvatori, A., 2011. Recent Development And Application Of Seismic Isolation And Energy Dissipation Systems, In Particular In Italy, Conditions For Their Correct Use And Recommendations For Code Improvements. *12th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*. 20-23- September, Sochi, RU.
- Merlino M., Ventura G., Miragliotta C., Fossetti M., 2015. Retrofit antisismico di strutture in c.a. tramite l'installazione di isolatori a singola superficie di scorrimento. In *Atti del XVI Convegno ANIDIS - L'Ingegneria Sismica in Italia*. p. 1-10, RISTAMPA - EDIZIONI, ISBN: 978-88-940985-6-3, L'Aquila 13-17 settembre 2015.
- Miragliotta, C., 2014. Protezione sismica di strutture in c.a.: adeguamento sismico di un edificio con isolatori a scorrimento a superficie curva. *Tesi di Master di II livello in Ingegneria Sismica: progettazione antisismica di costruzioni e mitigazione del rischio sismico del patrimonio edilizio esistente*, A.A.2012 – 13, Università degli Studi di Enna "Kore".
- Theodore, L., Karavasilis, A., Chung-Yeol S., 2011. Seismic structural and non-structural performance evaluation of highly damped self-centering and conventional systems. *Engineering Structures*. **33**, 2248–2258.