

Retrofit antisismico di strutture in c.a. tramite l'installazione di isolatori a singola superficie di scorrimento

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)

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

Keywords: Strutture esistenti in c.a., isolatori sismici, analisi time history, procedura operativa.

ABSTRACT

Negli ultimi anni, l'utilizzo della tecnica dell'isolamento alla base per realizzare l'adeguamento sismico di edifici esistenti con struttura portante in c.a., è diventata sempre più comune. Tale metodologia, risulta particolarmente vantaggiosa per le strutture irregolari e per le quali l'adeguamento sismico con tecniche "tradizionali" potrebbe richiedere interventi particolarmente gravosi. L'inserimento di isolatori a scorrimento consente di ridurre notevolmente le accelerazioni trasmesse alla sovrastruttura grazie alla stretta dipendenza del periodo proprio della struttura, dal raggio di curvatura e dall'attrito dei dispositivi. Tali parametri meccanici sono tarabili in funzione delle specifiche esigenze della singola applicazione, consentendo così l'implementazione dell'isolamento sismico su qualsiasi tipo di edificio. L'articolo, mostra i criteri e le metodologie utilizzate per adeguare sismicamente un edificio esistente in c.a. con l'inserimento di isolatori a scorrimento a superficie curva, descrivendone le modalità operative e le soluzioni tecniche che ne ottimizzano gli effetti.

1 INTRODUZIONE

La ricerca di sistemi atti a fronteggiare le conseguenze di un sisma sulle strutture, ha portato allo sviluppo di tecniche volte al "controllo" degli effetti generati dagli eventi sismici attraverso il metodo noto come "controllo delle vibrazioni", ossia il controllo, mediante l'impiego di specifiche tecnologie, della risposta dinamica della struttura (Cossu et al. 2011, Martelli et al. 2011, Theodore et al. 2011).

Tra queste l'isolamento sismico che riduce la risposta sismica della struttura con un comportamento costante e predeterminato, senza correzioni contestuali, cioè non adattandosi interattivamente al terremoto ma subendolo

passivamente, rientra tra i sistemi a "controllo passivo delle vibrazioni".

La tecnica dell'isolamento sismico è molto agevole per le applicazioni su strutture di nuova costruzione, ma in crescita è l'utilizzazione per l'adeguamento sismico degli edifici esistenti (*retrofit*) con il taglio delle fondazioni o delle strutture portanti del piano più basso e relativo inserimento degli isolatori.

Tale sistema, risulta molto vantaggioso per edifici che presentano asimmetrie in pianta o in alzato per i quali l'adeguamento sismico con tecniche "tradizionali" potrebbe richiedere invasivi interventi come ad esempio, quello di separare un edificio in più corpi di fabbrica per limitare gli effetti torsionali in pianta; problema che non si pone per edifici isolati sismicamente.

Sebbene il calcolo e il progetto di costruzioni isolate sia più diffuso rispetto al passato (Martelli

et al., 2009, Trombetta et al. 2013), tutto l'iter di progetto, che va dalla concezione del sistema d'isolamento alla sua progettazione e verifica, comporta ancora oggi novità importanti.

Nel presente lavoro, si riporta una sintesi dei dettagli della procedura di progettazione di interventi di adeguamento di edifici esistenti in c.a. mediante isolamento sismico, attraverso un esempio applicativo su di caso reale, nel quale il sistema di isolamento viene progettato sulla base della resistenza laterale della struttura, con l'intento di minimizzare gli interventi sugli elementi strutturali in elevazione e confrontandone la semplicità di esecuzione rispetto ad un intervento "tradizionale" di rinforzo esteso all'intero edificio.

2 CONOSCENZA DEL MANUFATTO

L'edificio è stato oggetto di una articolata indagine conoscitiva con l'obiettivo di poter acquisire le informazioni necessarie ad una interpretazione qualitativa e quantitativa del comportamento strutturale, e al fine di ottimizzare l'analisi strutturale adottata nella valutazione della capacità resistente degli elementi.

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

La rappresentazione dei risultati del rilievo si è effettuata attraverso piante, prospetti e sezioni, oltre che con particolari costruttivi di dettaglio.

L'edificio è stato realizzato con una struttura portante in c.a. composta da un piano interrato e da sei piani fuori terra per un'altezza complessiva di 28.20 m.

In Figura 1 e in Figura 2 si riportano una rappresentazione schematica della pianta e una vista prospettica fuori scala.

L'edificio presenta una forma irregolare in pianta ed è inscrivibile in rettangolo di dimensioni di 41.60 x 21.30 m. Sono presenti dei 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 è possibile affermare che ai vari impalcati, tutte le travi sono emergenti con sezione 60 x 35 cm, 40 x 55 cm e 30 x 50 cm.

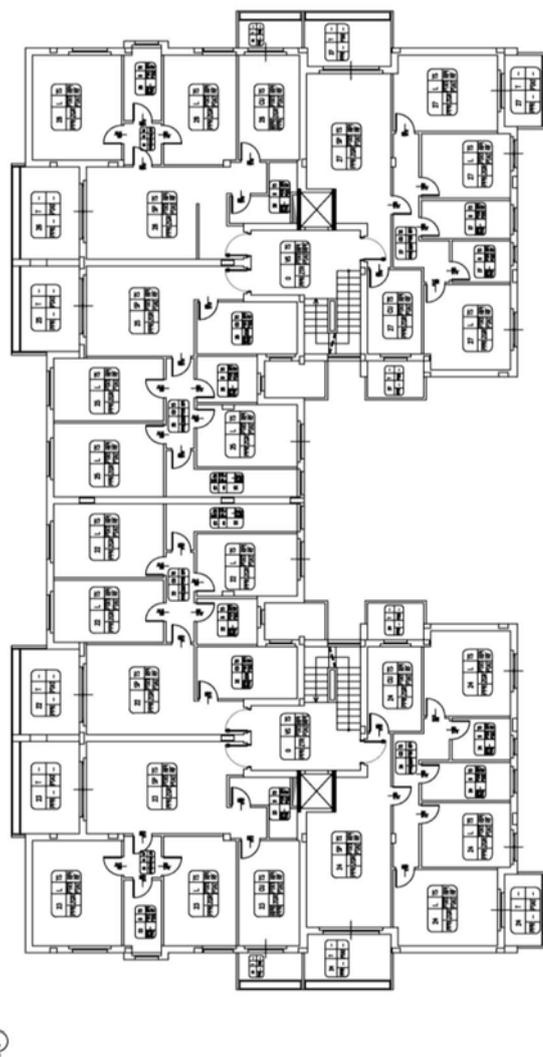


Figura 1. Pianta fondazioni (fuori scala).

PROSPETTO SUD scala 1:100



Figura 2. Prospetto laterale (fuori scala).

I pilastri non presentano rastremazioni e hanno tutti la medesima sezione trasversale di 60 x 40 cm. I solai sono realizzati in latero cemento con spessore di $h=16+4$ cm ai vari impalcati e $h=20+4$ cm alla prima elevazione.

L'armatura è costituita da barre ad aderenza migliorata $\Phi 16$ sia per le travi che per i pilastri. Nelle travi alcune barre sono piegate a 45° in corrispondenza degli appoggi.

Le staffe sono realizzate mediante barre ad aderenza migliorata $\Phi 6$, poste ad un passo di 20 cm nelle travi e 25 cm nei pilastri, mentre non sono presenti nei nodi trave-colonna.

Dalla risultanza delle indagini diagnostiche, è stato possibile classificare il calcestruzzo del tipo C20/25 con R_{ck} 25 MPa e, l'acciaio del tipo FeB44k con tensione di snervamento $f_{yk} \geq 430$ MPa.

Dalla quantità e qualità delle informazioni reperite si è individuato un livello di conoscenza adeguato e quindi un fattore di confidenza $FC=1.20$.

3 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA NELLO STATO ATTUALE

La valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio, ha richiesto la definizione di un parametro che fosse in grado di restituire il livello di inadeguatezza della struttura nei confronti dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) valutato attraverso una analisi *pushover*.

Il modello numerico si è ottenuto utilizzando il software agli elementi finiti Straus7 Version 2.2.3 ©HSH s.r.l.. In Figura 3 si riporta il modello tridimensionale dell'edificio costituito da 2761 nodi, 2368 elementi *beam* e 2203 elementi *plate*.

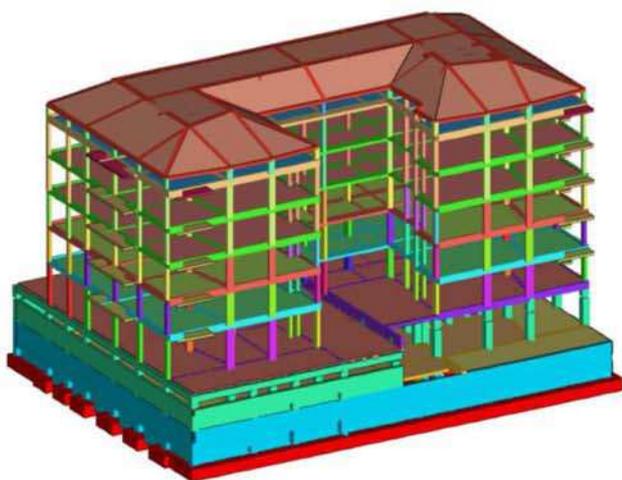


Figura 3. Modello 3D dell'edificio nello stato attuale.

I risultati dell'analisi *pushover* confermano la necessità di procedere all'adeguamento del corpo di fabbrica in quanto la capacità sismica dell'edificio (PGA pari a 0.164g) risulta inferiore alla domanda richiesta (PGA pari a 0.261g).

4 SCELTA DELLA SOLUZIONE DI RETROFIT ATTRAVERSO UNA ANALISI COMPARATIVA TRA TECNICHE "TRADIZIONALI" ED ISOLAMENTO ALLA BASE

Al fine di favorire il criterio del "minimo intervento" sulle strutture ed anche per evidenziare i benefici in termini economici dell'utilizzo dell'isolamento sismico come tecnica di *retrofit*, è stata eseguita un'analisi comparativa tra il progetto dell'adeguamento sismico dell'immobile con tecniche "tradizionali" e quello redatto con l'utilizzo di dispositivi di protezione sismica.

Tra le tecniche "tradizionali", si è presa in considerazione una delle tipologie di intervento maggiormente diffusa nella pratica progettuale, ossia l'incamiciatura in calcestruzzo di colonne e travi.

Dai risultati delle analisi numeriche condotte, si sono redatti gli elaborati progettuali che prevedono l'esecuzione di interventi estesi a tutti i piani dell'edificio coinvolgendo sia le travi che i pilastri. Ad esempio, considerando i pilastri, l'intervento prevede un aumento della sezione trasversale fino 70x80 cm per i pilastri del piano cantinato e del piano terra ed un ringrosso fino a 60x70 cm per i pilastri dei rimanenti piani.

Il progetto di *retrofit* mediante l'inserimento di dispositivi di protezione sismica, si è realizzato considerando isolatori a scorrimento a superficie curva (*friction pendulum*).

Il progetto ha richiesto una fase preliminare, fondamentale e nel contempo delicata, consistente nella scelta del piano di isolamento. Tale valutazione è stata condizionata dall'individuazione di un locale con destinazione d'uso idonea per le operazioni di installazione e manutenzione dei dispositivi, dalla tipologia di fondazioni esistenti, dal metodo stabilito per il trasferimento temporaneo del carico verticale e dalla presenza del vano ascensore. Dai risultati di tali analisi si è previsto di collocare gli isolatori in testa ai pilastri del piano interrato.

È stato eseguito un predimensionamento di massima del sistema di isolamento attraverso una analisi iterativa semplificata monodimensionale in spettro di risposta, al fine di avere degli elementi di controllo per le successive analisi dinamiche non lineare di dettaglio *time history*.

In Figura 4 si riporta una rappresentazione schematica della pianta di ubicazione dei dispositivi.

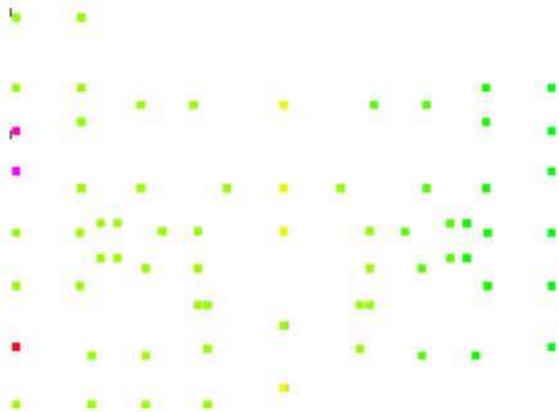


Figura 4. Pianta dei dispositivi (fuori scala).

Il modello numerico, mostrato in Figura 5, si è ottenuto utilizzando ancora il software agli elementi finiti Straus7, ed è composto da 2798 nodi, 2435 elementi *beam* e 2203 elementi *plate*.

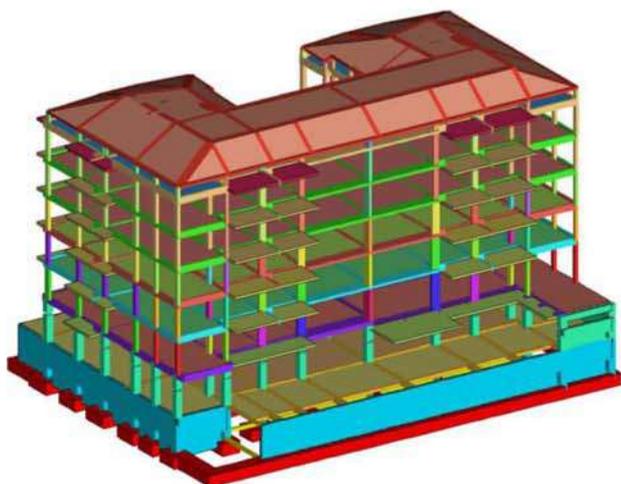


Figura 5. Modello 3D della struttura isolata.

Il dispositivo è stato modellato mediante l'elemento "Connection" di Straus7 con comportamento di tipo non lineare. 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. In tal modo è possibile riprodurre la legge fissata fra la rigidità orizzontale dell'isolatore, il carico verticale agente e lo spostamento sismico.

Per la valutazione delle sollecitazioni negli elementi strutturali è stata condotta un'analisi dinamica non lineare *time history* con integrazione al passo assegnando le tre coppie di accelerogrammi spetrocompatibili mostrate in Figura 6. Pertanto, secondo quanto indicato nelle NTC/2008, ai fini delle verifiche si è fatto riferimento ai valori massimi degli effetti più sfavorevoli.

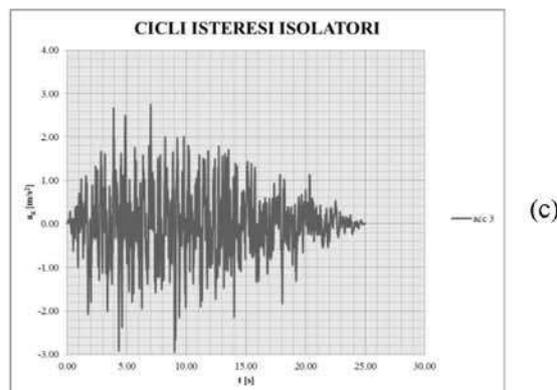
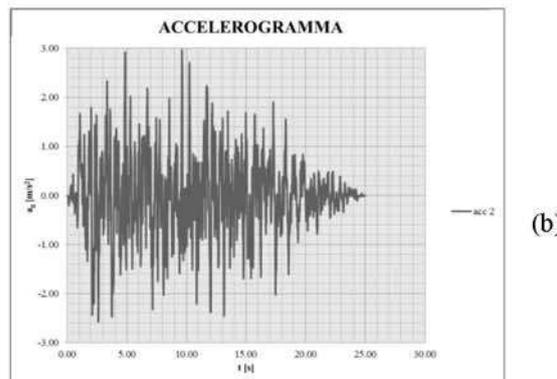
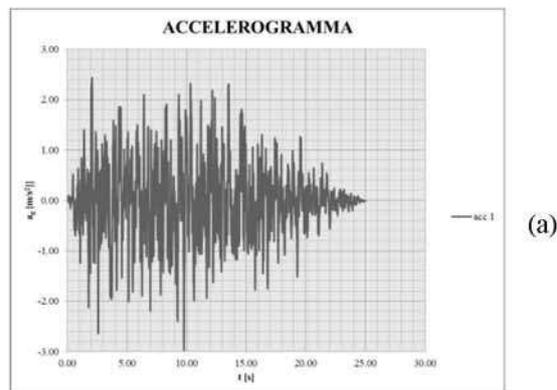


Figura 6. Accelerogrammi utilizzati per l'analisi *Time History*.

In Figura 7, si riportano i primi due modi di vibrare della struttura.

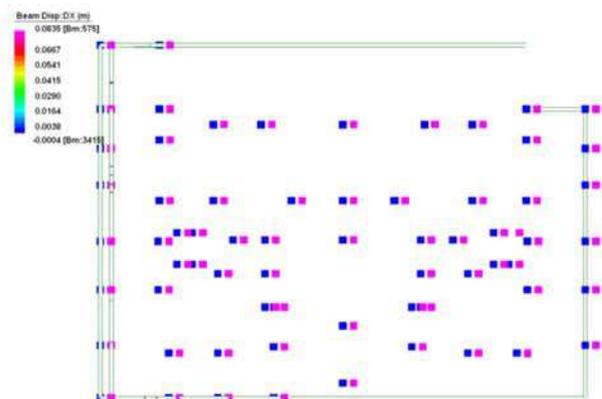


Figura 7a. I° modo di vibrare della struttura isolata alla base.

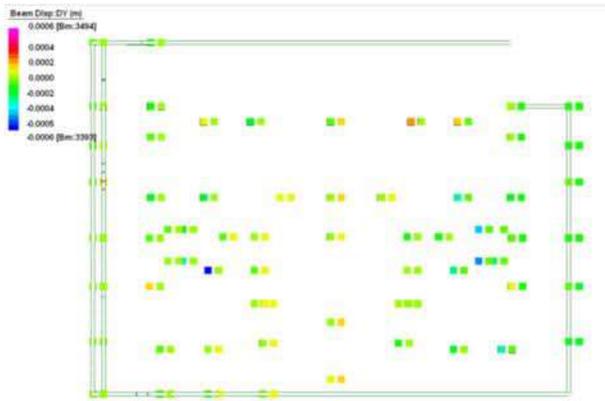


Figura 7b. II° modo di vibrare della struttura isolata alla base.

Le verifiche sismiche dell'edificio, si sono realizzate a seguito di una sostanziale considerazione che riguardava la presenza di una pilastratura estremamente fitta in corrispondenza dei due vani ascensore (vedi Figura 1), la quale provocava l'insorgere di sforzi di trazione. La soluzione tecnica adottata è stata quella di sospendere gli stessi vani su due travi alte (40x150 cm) appoggiate su quattro isolatori.

In Figura 8 si mostrano alcuni dettagli costruttivi della trave alta di sostegno dei due vani ascensori.

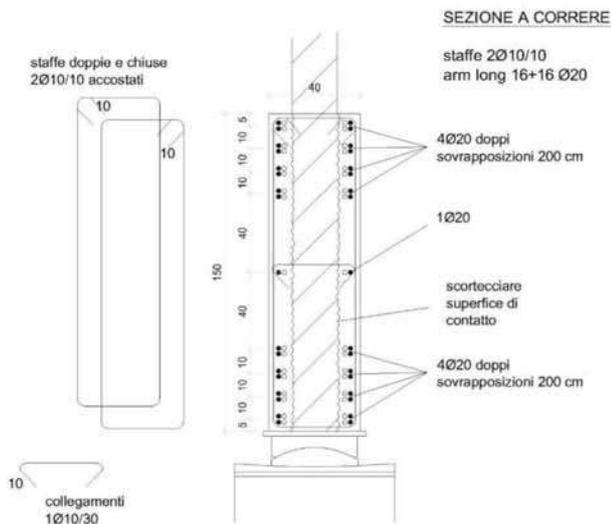


Figura 8. Esecutivi della trave alta di sostegno dei due vani ascensore.

La fase successiva ha compreso lo studio del comportamento dinamico dei dispositivi in presenza dell'evento sismico attraverso un'analisi non lineare.

A titolo di esempio, per un isolatore del sistema progettato, si riporta in Figura 9 e in Figura 10 l'andamento del tagliante e dello spostamento in funzione del tempo, per entrambe le direzioni X, Y di ingresso del sisma.

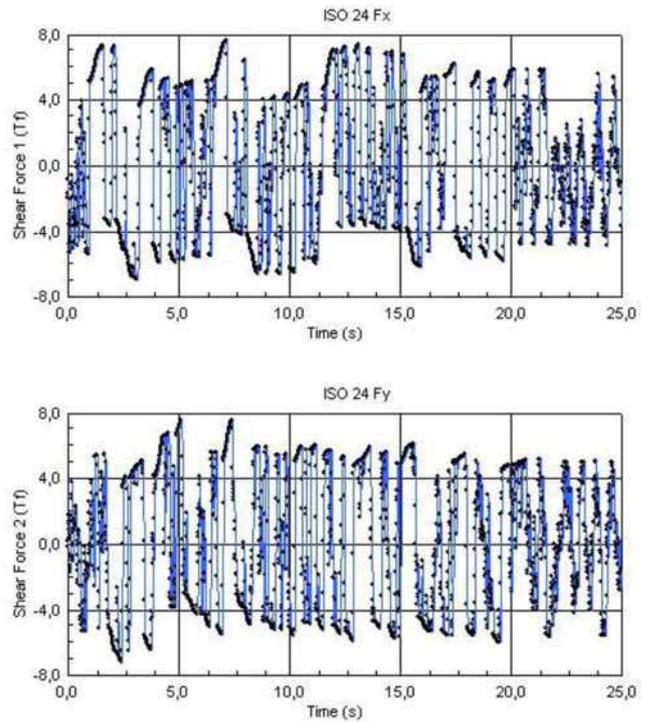


Figura 9. Andamento del tagliante in funzione del tempo.

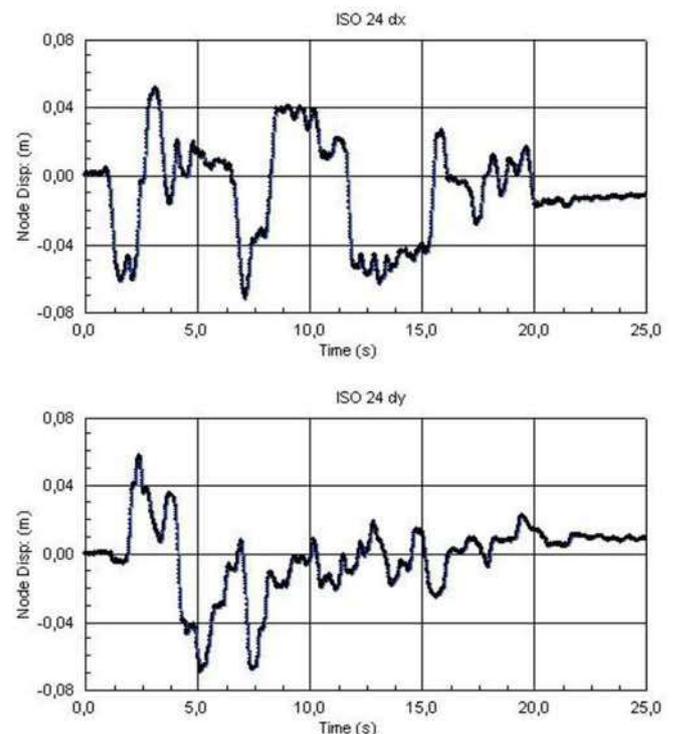


Figura 10. Andamento dello spostamento in funzione del tempo.

Dai dati ricavati dalle curve precedentemente mostrate, si è costruito il ciclo d'isteresi del dispositivo, per ciascuna direzione, al fine di ricavare l'energia dissipata dall'isolatore per effetto dell'attrito all'interfaccia di scorrimento durante l'evento sismico. In Figura 11 si riporta un ciclo di isteresi di un isolatore.

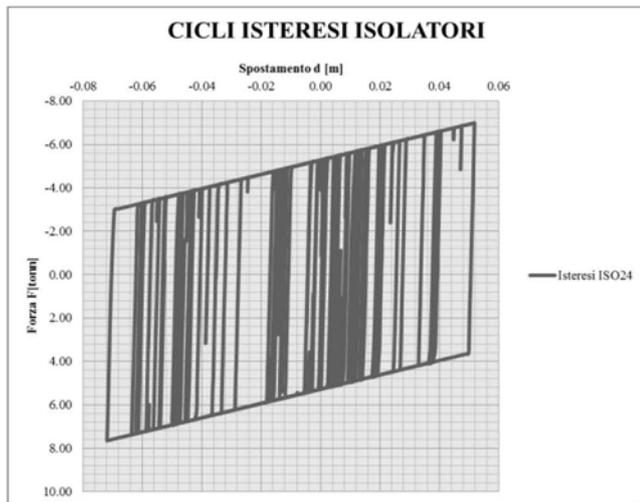


Figura 11. Esempio di un ciclo di isteresi di un isolatore.

Noti gli spostamenti del dispositivo in entrambe le direzioni durante l'evento sismico assegnato, si è costruito l'andamento della posizione assunta dalla parte scorrevole dell'isolatore il cui involucro consente di determinare le dimensioni in pianta minime necessarie.

Nella Figura 12, è mostrata la graficizzazione delle posizioni dell'isolatore durante l'evento sismico assegnato.

Il confronto tra i risultati delle analisi numeriche non lineari di dettaglio e quelli dedotti dal preliminare predimensionamento di massima restituisce risultati coerenti con le due schematizzazioni; i valori di spostamento massimi nel caso di analisi *time history* risultano inferiori di circa il 40% rispetto a quelli dedotti dalle analisi lineari.

Note le azioni sollecitanti e gli spostamenti dei dispositivi si è progettata la geometria del dispositivo che prevede un isolatore con 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 si è conclusa eseguendo le verifiche di resistenza degli elementi strutturali secondo le vigenti norme tecniche per le costruzioni.

Il passo finale per l'individuazione della soluzione progettuale ottimale tra le due metodologie di *retrofit* analizzate, ha previsto il loro confronto attraverso un'analisi costi-benefici.

Da tale confronto, e nell'ottica di volere limitare il più possibile interventi invasivi ai vari livelli, si è deciso di utilizzare la tecnica dell'isolamento alla base.

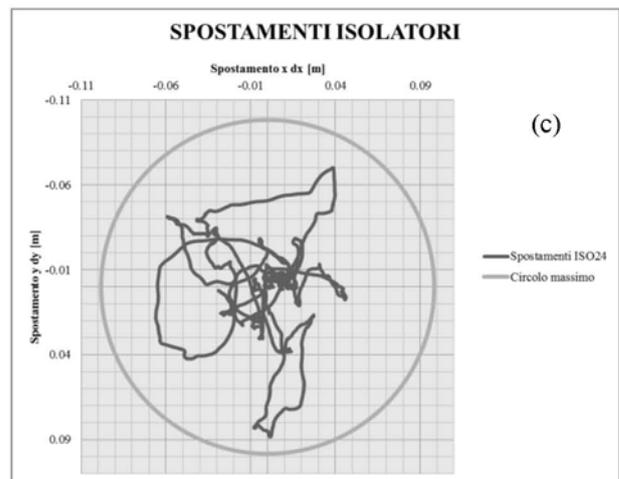
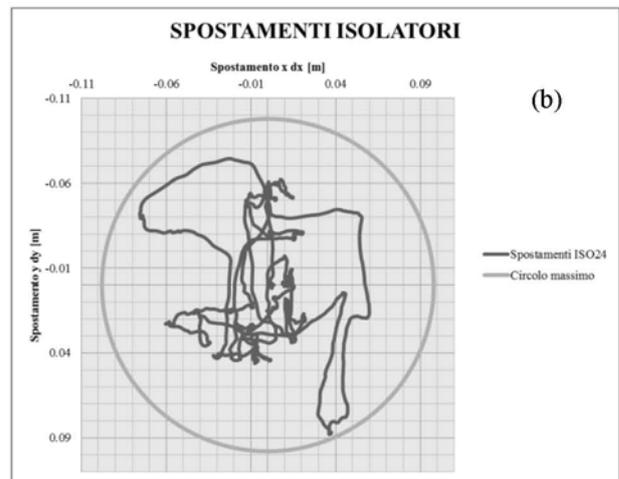
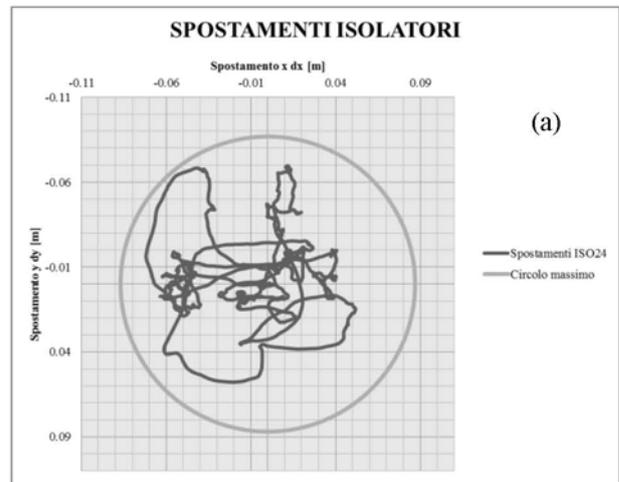


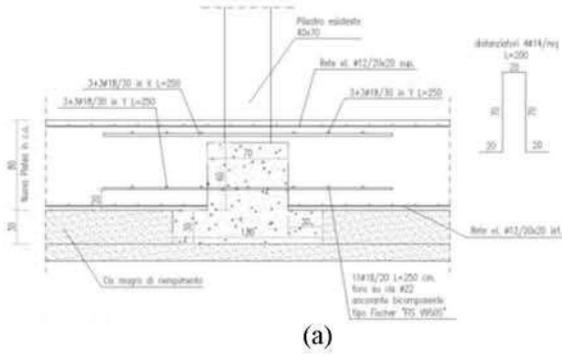
Figura 12. Curva $\delta x - \delta y$ per coppie di accelerogrammi: (a) gruppo 1; (b) gruppo 2; (c) gruppo 3.

5 FASI OPERATIVE DI INSTALLAZIONE

Prima dell'installazione dei dispositivi, sono state eseguite tutte le operazioni di ripristino e di rinforzo locali negli elementi strutturali in elevazione che di fatto risultavano lievemente danneggiati dal sisma.

Si è poi realizzato il consolidamento delle travi di fondazione esistenti, inglobando le stesse in una platea armata (vedi Figura 13), al fine di garantire una idonea resistenza alle azioni

trasmesse dalla sovrastruttura e ridurre l'entità delle tensioni agenti sul terreno.



(a)

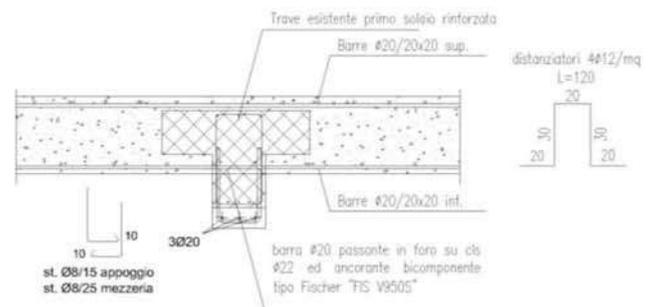


(b)

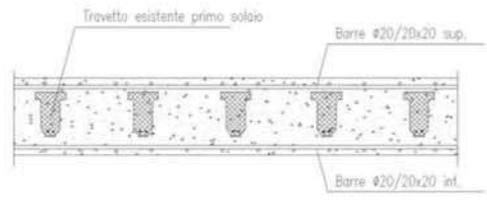
Figura 13. Intervento di adeguamento delle strutture di fondazione: (a) esempio di esecutivo di cantiere; (b) documentazione fotografica. © Kaltha s.r.l.



Figura 14 b. Intervento di adeguamento dei pilastri piano cantinato: documentazione fotografica. © Kaltha s.r.l.



(a)



(b)

Figura 15. Intervento di adeguamento dell'impalcato sovrastante il sistema isolamento: (a) esempio di esecutivo di cantiere; (b) documentazione fotografica. © Kaltha s.r.l.

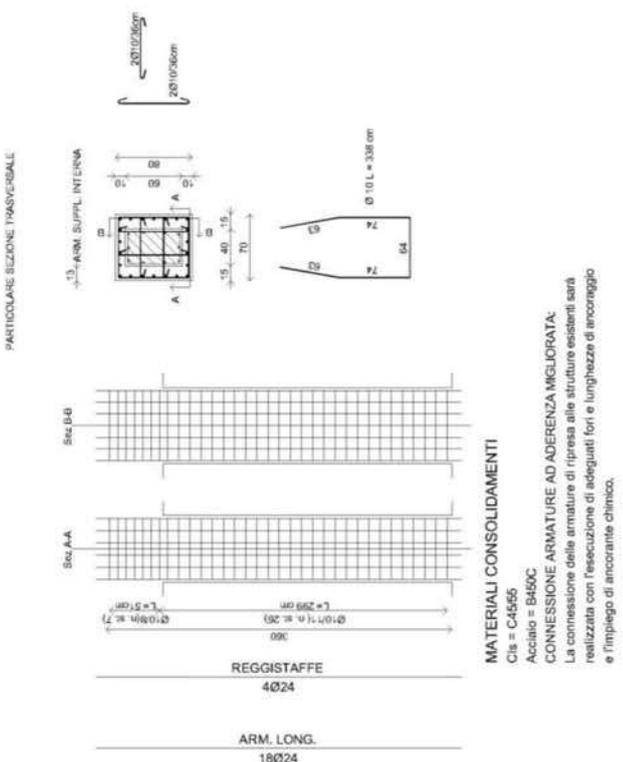


Figura 14a. Intervento di adeguamento dei pilastri piano cantinato: esempio di esecutivo di cantiere. © Kaltha s.r.l.

Successivamente si è posto in opera l'intervento di adeguamento dei pilastri del piano cantinato mediante una incamicatura in c.a. con sezione trasversale al finito di 80x80 cm (vedi Figura 14). L'intervento consente di raggiungere

la capacità richiesta in termini di resistenza e rigidità e risulta utile, tra l'altro, per soddisfare le esigenze geometriche di ingombro in pianta degli isolatori che, diversamente avrebbero richiesto la realizzazione di un capitello.

Al fine di realizzare un piano rigido al di sopra del sistema di isolamento, si è reso 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 Ø20 a passo 20 cm in entrambe le direzioni (vedi Figura 15).

Completate le operazioni di rinforzo strutturale, il passo successivo ha previsto l'installazione degli isolatori attraverso la sequenza operativa di seguito elencata:

- inserimento di martinetti idraulici messi a contrasto superiormente sulla sovrastruttura con opportuni dispositivi in modo di trasferire i carichi in fondazione durante le fasi di collocazione degli isolatori;
- taglio dei pilastri ed asportazione del dado di calcestruzzo per creare l'alloggiamento necessario all'ubicazione degli isolatori. In Figura 16, si mostra l'avvio delle operazioni di taglio dei pilastri ad inserimento avvenuto dei martinetti idraulici, mentre in Figura 17, Figura 18 e in Figura 19 si illustrano alcune fasi operative del taglio che può essere praticato con l'utilizzo di lama diamantata o filo diamantato;
- Inserimento degli isolatori (Figura 20) e successiva messa in carico del dispositivo con rimozione dei martinetti.



Figura 16. Martinetti di sollevamento e avvio delle operazioni di taglio dei pilastri. © Kaltha s.r.l.



Figura 17. Fase operativa taglio pilastri: estrazione lama diamantata. © Kaltha s.r.l.



Figura 18. Fase operativa taglio pilastri: operazione conclusiva del taglio con filo diamantato. © Kaltha s.r.l.



Figura 19. Fase operativa taglio pilastri: vista a taglio completato. © Kaltha s.r.l.



Figura 20. Fase operativa di collocazione degli isolatori. ©Kaltha s.r.l.

Nelle Figure 21-23, si mostrano alcune viste dei dispositivi a installazione avvenuta.



Figura 21. Viste dei dispositivi installati. © Kaltha s.r.l.



Figura 22. Viste dei dispositivi installati. © Kaltha s.r.l.



Figura 23. Viste dei dispositivi installati. © Kaltha s.r.l.

6 CONCLUSIONI

L'impiego della tecnica dell'isolamento sismico assume un ruolo sempre più importante nella progettazione di interventi di adeguamento di strutture esistenti. L'isolamento sismico se impiegato correttamente, costituisce una semplificazione del processo di retrofit antisismico, permettendo di realizzare degli interventi più semplici e meno invasivi.

Nelle strutture isolate sismicamente si ha una riduzione dell'accelerazione sismica che consente una progettazione strutturale in campo elastico, in quanto vengono meno le richieste di duttilità delle componenti strutturali. Nei problemi di adeguamento sismico, viene superata la difficoltà di intervenire in maniera estesa sugli elementi portanti della struttura in elevazione ed in particolare sui nodi trave pilastri delle strutture in c.a.

In definitiva, con l'isolamento sismico, è possibile eseguire opere di adeguamento con interventi localizzati e meno invasivi e senza provocare la sospensione totale delle attività nell'edificio. Si sottolinea infine, che in generale, tali opere presentano costi inferiori rispetto alla realizzazione di interventi "tradizionali". Tale vantaggio è stato dimostrato dall'analisi costi-benefici eseguita per il caso studio oggetto del presente lavoro mettendo a confronto i costi necessari per la posa in opera degli interventi di adeguamento realizzati con tecniche "tradizionali" con i costi necessari per realizzare il *retrofit* antisismico attraverso l'utilizzo di isolatori a scorrimento a superficie curva.

BIBLIOGRAFIA

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, Bari ottobre 2011*.

Landolfo, R., Mazzolani, F. M., Mammata, 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*. Taylor and Francis group, 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.

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., Choung-Yeol S., 2011. Seismic structural and non-structural performance evaluation of highly damped self-centering and conventional systems. *Engineering Structures* 33, 2248–2258.