

IMPIEGO DI DISPOSITIVI DISSIPATIVI PER LA RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ DI STRUTTURE PREFABBRICATE

Fabrizio Comodini
Università eCampus, Novedrate (Como)

Marco Mezzi
Università degli Studi di Perugia

Leonardo Rossi
Università degli Studi di Perugia

ABSTRACT:

The paper focuses on low-cost anti-seismic devices to be installed on precast buildings. The behavior of 2D precast RC frames equipped with dissipative devices placed at beam-column joints and at the columns base is studied. The research is aimed at optimize the mechanical parameters of the devices and to estimate the effectiveness of their insertion at the column base too. The performances before and after the insertion of the devices are compared also accounting for the easiness of installation and costs reduction.

1

1. INTRODUZIONE

È ormai appurato come lo scarso livello prestazionale dei sistemi costruttivi prefabbricati in c.a., nei riguardi delle azioni sismiche, sia legato prevalentemente all'inadeguatezza dei collegamenti tra gli elementi strutturali per ciò che riguarda la dissipazione di energia e le caratteristiche di vincolo. Nelle strutture di nuova realizzazione, qualora si adottino i tipici schemi a mensole isostatiche (Figura 1), il rispetto dei requisiti capacitivi propri delle vigenti NTC2008 si ottiene solo a discapito di sezioni dei pilastri di notevoli dimensioni, con conseguenti elevati valori dei costi di costruzione e scarsa competitività commerciale.

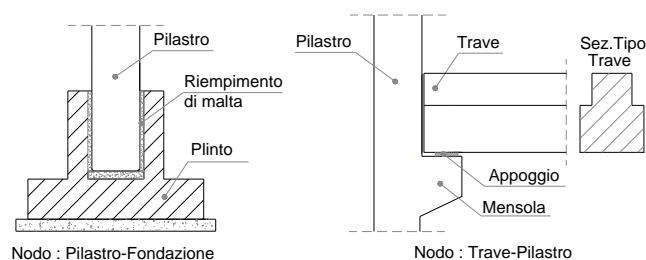


Figura 1– Nodi di elementi strutturali prefabbricati di uso comune

Per riuscire a far fronte alle carenze dette, da anni si assiste alla diffusione di sistemi strutturali misti, risultanti dall'accoppiamento di strutture prefabbricate con strutture realizzate in opera; proprio a queste ultime, in genere, viene demandata la quasi totalità della capacità sismo-resistente dell'organismo strutturale.

Un miglioramento delle capacità sismiche dei sistemi prefabbricati si può ottenere tramite l'inserimento, nei nodi trave-pilastro e pilastro-fondazione, di idonei dispositivi dissipativi. In questo senso gli aspetti da analizzare sono di due tipi. Il primo riguarda l'ottimizzazione della taratura dei dispositivi, in modo da massimizzare la capacità dissipativa globale del sistema; il secondo aspetto riguarda l'alterazione del grado di vincolo che i dispositivi generano nei nodi di interfaccia degli elementi strutturali e la conseguente redistribuzione delle sollecitazioni. I dispositivi detti possono essere installati anche su strutture esistenti, consentendone il miglioramento sismico. Nel presente lavoro sono riportati i principali risultati di una ricerca rivolta allo studio del comportamento di dissipatori rotazionali ad attrito e della loro efficacia su sistemi prefabbricati posti in zone ad elevata sismicità.

2. COLLEGAMENTO AD ATTRITO

La risposta sismica di una struttura prefabbricata è strettamente legata alla tipologia dei collegamenti trave-pilastro e pilastro-fondazione. Con i nuovi codici di progettazione è aumentata l'esigenza di conoscere le caratteristiche meccaniche delle unioni; esse giocano, infatti, un ruolo fondamentale nel garantire la prioritaria formazione di meccanismi duttili. Le tipologie di connessione attualmente presenti sul mercato sono molteplici (Comodini e Mezzi, 2012); in questo lavoro è stata presa in considerazione quella costituita da un dispositivo rotazionale ad attrito, da installare a cornice nelle interfacce trave-pilastro e pilastro-fondazione. Il dispositivo adottato negli studi effettuati è un dissipatore rotazionale ad attrito (Morgen & Kurama et al. 2004) in grado di fornire un vincolo di semi-incastro e di dissipare energia. I dispositivi possono essere installati a cornice all'estradosso delle travi, in corrispondenza del giunto trave-colonna e lateralmente alle colonne, in corrispondenza del giunto colonna-fondazione. I dispositivi si attivano per le rotazioni relative che si generano fra gli elementi strutturali interconnessi, a seguito della deformazione laterale del sistema. L'entità dell'energia dissipata è pertanto strettamente correlata ai drift di piano: questo comporta che quanto più è deformabile la struttura, tanto più lavorano i dissipatori.

Il dispositivo tipo, illustrato in Figura 2, è costituito da cinque componenti in acciaio colato, con quattro interfacce ad attrito ottenute con dischi di piombo-bronzo inseriti nel mezzo. Le interfacce di attrito sono precomprese mediante un serraggio a molla.

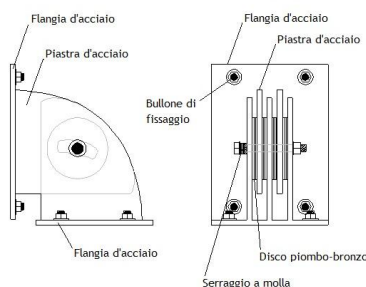


Figura 2 - Schema dispositivo rotazionale ad attrito

Il miglioramento sismico della struttura prefabbricata viene conseguito impiegando una supplementare dissipazione passiva di energia, poiché il dispositivo utilizza l'attrito che si sviluppa tra le adiacenti superfici di metallo ed in lega piombo-bronzo che lo compongono. Test sperimentali effettuati sul singolo dispositivo (Morgen et al. 2004) hanno determinato il ciclo isteretico in termini di relazione momento-rotazione (Figura 3). Il ciclo isteretico del dispositivo preso come base di riferimento per le prime analisi parametriche è stato ricondotto ad un modello equivalente di tipo elastico-plastico con incrudimento, caratterizzato dai seguenti parametri: $M_y = 120$ kNm (momento di snervamento); $M_u = 155$ kNm (momento ultimo); $\Theta_y = 0,1\%$ (rotazione di snervamento); $\Theta_u = 3,0\%$ (rotazione ultima); $K_{el} = 120.000$ kNm/RAD (rigidezza elastica) e $K_p / K_{el} = 0,01$ (Figura 4).

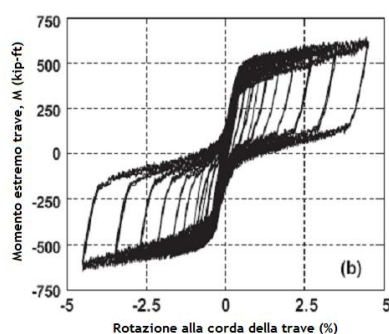


Figura 3 - Ciclo di isteresi sperimentale del dispositivo attritivo (Morgen et al. 2004)

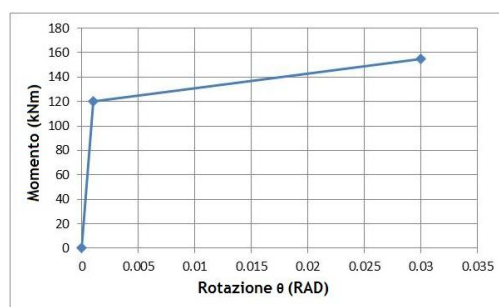


Figura 4 - Modello costitutivo semplificato del dispositivo attritivo

La scelta della soglia di attivazione e della rigidezza elastica del dispositivo condiziona il trasferimento delle sollecitazioni flessionali ai pilastri e l'incremento di smorzamento viscoso equivalente associato ai cicli di isteresi descritti dal comportamento rotazionale-attritivo dei dispositivi.

3. ANALISI DEL TELAIO PIANO CASO DI STUDIO

Il telaio oggetto di studio (Figura 5) è costituito da pilastri monolitici di altezza 12,86 m, con sezione variabile da 1300·1300 mm a 1300·1200 mm, solai alveolari precompressi a sezione costante di altezza pari a 340 mm, completati da una soletta strutturale collaborante in c.a. e travi in c.a. prefabbricato, a T e ad L.

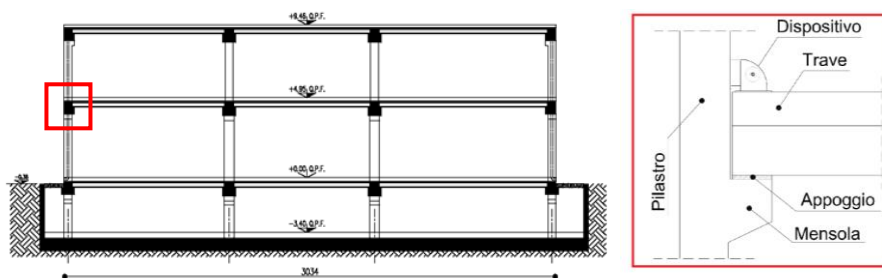


Figura 5 – Telaio analizzato e dettaglio del dispositivo in opera

La procedura di ottimizzazione dei dispositivi prevede la stima delle rotazioni limite di attivazione e la determinazione di valori ottimali di rigidità elastica e soglia plastica degli stessi.

Una condizione fondamentale per il corretto funzionamento dei dispositivi è che la rotazione limite di attivazione risulti superiore alle rotazioni nodali indotte dai carichi verticali e orizzontali di servizio. Al variare del legame costitutivo dei dispositivi si ottengono distribuzioni di sollecitazioni diverse da quelle associate ad uno schema di pilastri isostatici e travi semplicemente appoggiate. È evidente inoltre che la taratura dei dispositivi sia strettamente correlata alle caratteristiche dinamiche della struttura.

Con riferimento ad un telaio piano, si è proceduto ad una prima fase di elaborazioni numeriche consistenti in analisi statiche non lineari per carichi verticali ed orizzontali. Le analisi numeriche sono state eseguite rispettivamente per tre configurazioni diverse del telaio, di cui due con dispositivi dissipativi. L'obiettivo di questa prima fase è stato quello di stimare i drift di piano e le rotazioni nodali richieste per soddisfare la domanda sismica rispettivamente per gli stati limite di danno e di salvaguardia della vita, al variare della configurazione strutturale.

La tecnologia con cui sono realizzati i dispositivi adottati nel presente lavoro consente di modificarne la rigidità elastica e la soglia plastica, semplicemente aumentando la forza di precompressione della vite di ritegno orizzontale.

Con riferimento ai dispositivi da inserire nei nodi trave-pilastro, sono stati generati 10 distinti modelli costitutivi, nei quali, partendo dai valori di riferimento, è stata variata la rigidità e la soglia plastica rispettivamente del +50% +100% +150% +200% e del +/-10% +/-20% e +/-35% (Figura 6).

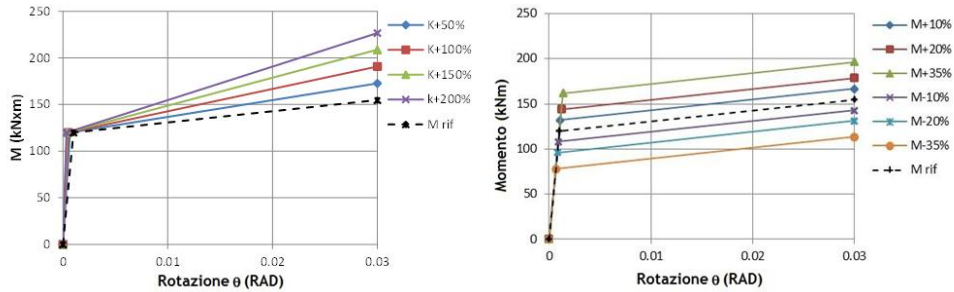


Figura 6 - Legami costitutivi parametrizzati per K e per My

Per i dispositivi inseriti nei nodi pilastro-fondazione, invece, sono stati assunti i seguenti parametri meccanici $M_y = 360$ kNm (momento di snervamento); $M_u = 392$ kNm (momento ultimo); $\Theta_y = 0,3\%$ (rotazione di snervamento); $\Theta_u = 3,0\%$ (rotazione ultima); $K_{el} = 120.000$ kNm/RAD (rigidezza elastica) e $K_p/K_{el} = 0,01$. Quest'ultimi sono stati definiti in modo da posticipare l'attivazione dei dispositivi di base rispetto a quelli delle travi e per garantire un adeguato livello di rigidezza elastica orizzontale. Uno degli obiettivi della procedura di ottimizzazione si concretizza con lo studio della distribuzione delle sollecitazioni tra pilastri e travi al variare delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi e contestualmente con l'individuazione del ciclo ottimale di funzionamento dei dispositivi, ossia tale da garantire la maggiore dissipazione di energia possibile. Oltre a quella che non prevede l'impiego dei dispositivi, sono state analizzate due ulteriori configurazioni (per un totale di 21 modelli distinti); la prima prevede l'inserimento dei dispositivi solo sui nodi trave-pilastro (Modello B) e la seconda anche tra i nodi pilastro-fondazione (Modello C), si veda la Figura 7.

5

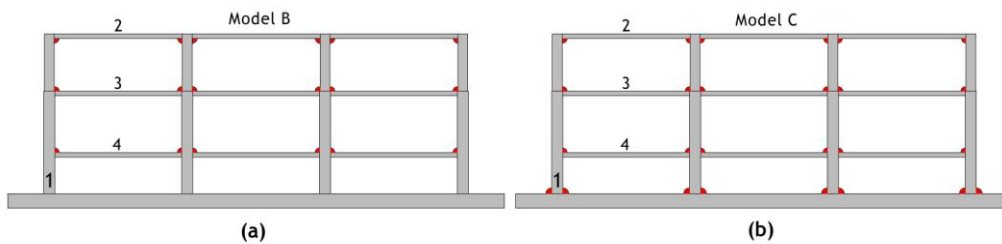


Figura 7 - Schemi dei modelli di calcolo con i dispositivi

I risultati ottenuti con i modelli B e C sono stati confrontati con quelli ottenuti per il modello di riferimento senza dispositivi (Modello A).

Dai risultati ottenuti mediante le elaborazioni numeriche, condotte al variare dei parametri meccanici dei dispositivi, è stato possibile confrontare l'evoluzione delle sollecitazioni flettenti nei pilastri e nelle travi e le rotazioni richieste ai dispositivi in funzione del drift di piano. In particolare la Figura 8 illustra l'andamento del massimo momento flettente del pilastro n° 1 per le tre diverse configurazioni del telaio (modelli A, B e C) al variare del parametro K_{el} .

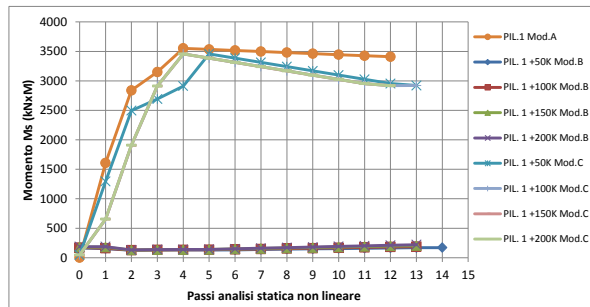


Figura 8 - Diagramma incrementale del momento flettente del pilastro n°1 per tutti i tipi di modellazione

In Figura 9 e Figura 10 sono illustrati i valori massimi del momento flettente per la trave n° 2, per le sue estremità sinistra e destra rispettivamente. Anche in questo caso i risultati sono parametrizzati in funzione delle rigidezze elastiche e post-elastiche e sono riferiti ai soli modelli B e C, in quanto nel modello A le travi sono incernierate.

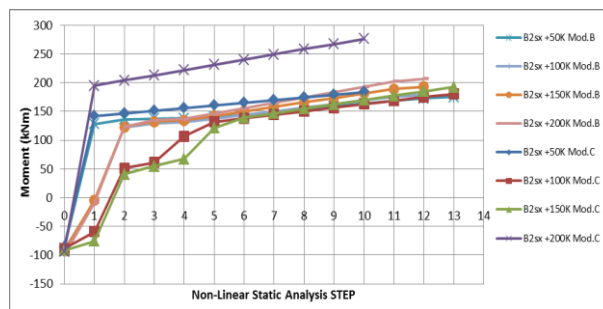


Figura 9 - Diagramma incrementale del momento flettente all'estremo sinistro della trave 2

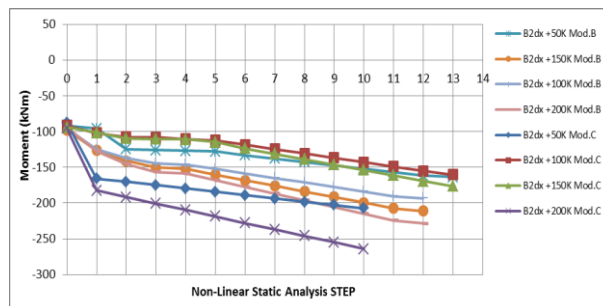


Figura 10 - Diagramma incrementale del momento flettente all'estremo destro della trave n°2

Dai grafici appare evidente una sostanziale variazione, in valore assoluto, delle massime sollecitazioni flettenti. Ciò è dovuto a due fattori principali; il primo è riconducibile alla presenza dei dispositivi nei nodi trave-pilastro che, nell'ambito del funzionamento elastico, producono un vincolo di semi-incastro all'estremità delle travi, riducendo l'azione flettente agente nei pilastri. Il secondo fattore è associato all'inserimento dei dispositivi al piede dei pilastri, in modo tale da ridurre il grado di incastro rotazionale del vincolo.

Il modello con dispositivi alla base presenta una maggiore deformabilità laterale. Rispetto ai casi in cui si ha un incastro al piede dei pilastri, per via dei periodi più elevati dei suoi modi di vibrare, il modello C risulterà sottoposto ad un minor taglio sismico alla base. I dispositivi con rigidità elastica maggiorata del 200% sono in grado di sviluppare per intero il ciclo di isteresi assegnato. La definizione della soglia plastica appare essere un parametro secondario, in quanto gli incrementi e decrementi della stessa non producono significative variazioni di momento flettente sollecitante. Sulla base dei risultati ottenuti si può concludere che il ciclo ottimale dovrà essere caratterizzato da elevate rigidità elastiche e da una soglia plastica definita in funzione delle caratteristiche di resistenza della trave e del pilastro.

La configurazione ottimale per ciò che riguarda la disposizione dei dissipatori è quella che prevede i dispositivi inseriti anche alla base, poiché ciò produce in assoluto un maggiore abbattimento delle azioni flettenti nei pilastri (Modello C).

4. ANALISI DINAMICA NON LINEARE

L'analisi dinamica non lineare è stata condotta per i modelli A e C, con l'obiettivo di verificare l'effettivo funzionamento ciclico dei dispositivi ed il beneficio apportato dagli stessi in termini di energia dissipata e quindi di riduzione delle sollecitazioni sui pilastri. Le analisi dinamiche non lineari sono state eseguite con il codice di calcolo SAP2000NL. I cicli isteretici dei dispositivi adottati sono stati resi nel modello tramite un elemento NLink di tipo "Plastic Wen". I parametri meccanici che caratterizzano l'elemento non lineare per le travi sono i seguenti: $M_y = 162$ kNm (momento di snervamento); $M_u = 268$ kNm (momento ultimo); $\Theta_y = 0,045\%$ (rotazione di snervamento); $\Theta_u = 3,0\%$ (rotazione ultima); $K_{el} = 360.000$ kN/m (rigidezza secante) e $K_p/K_{el} = 0,01$. Per i pilastri si mantiene invariato il legame costitutivo adottato in precedenza per le analisi parametriche. La Figura 11 illustra le caratteristiche elasto-plastiche dei dispositivi adottati nelle valutazioni dinamiche non lineari.

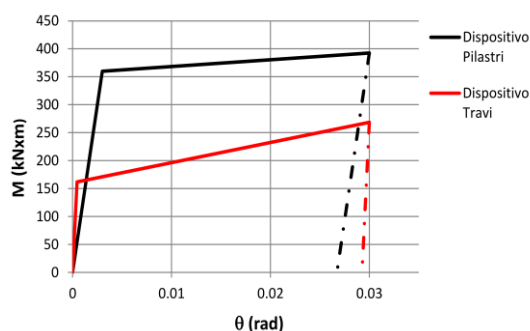


Figura 11 - Ciclo di isteresi adottato per i dispositivi attritivi

La scelta di attribuire ai dispositivi delle travi una soglia plastica più bassa rispetto a quella dei pilastri è motivata dall'opportunità di assicurare una loro precoce attivazione impedendo il trasferimento di elevate sollecitazioni flessionali ai pilastri. L'incremento di smorzamento viscoso equivalente associato al comportamento definito per l'elemento dissipativo è pari al 35,0 % del valore critico.

5. RISULTATI

L'analisi dinamica non lineare ha messo in evidenza il funzionamento ciclico dei dispositivi. La dissipazione passiva di energia introdotta dai dispositivi ha prodotto un notevole abbattimento delle sollecitazioni flettenti nei pilastri. In particolare è stato possibile riscontrare un diverso funzionamento tra i dispositivi inseriti nei nodi trave-pilastro e quelli inseriti alla base dei pilastri. I dispositivi alla base, con soglia plastica maggiore e minore rigidezza elastica, si attivano per rotazioni maggiori ed esplicano cicli di isteresi di minore ampiezza rispetto ai dispositivi inseriti sulle travi. Questo risultato è in linea con le previsioni progettuali. Con le sollecitazioni massime ottenute dall'analisi dinamica non lineare è stato condotto il dimensionamento delle sezioni e delle armature rispettivamente per il modello senza dispositivi e per quello con dispositivi di tipo C. A tal proposito si è riscontrata la possibilità di contenere le dimensioni e le quantità di armatura, nel caso di impiego dei dispositivi. La Figura 12 mostra la riduzione che è possibile operare nei pilastri, in termini di area di calcestruzzo e quantitativo di acciaio, mediante l'impiego dei dispositivi.

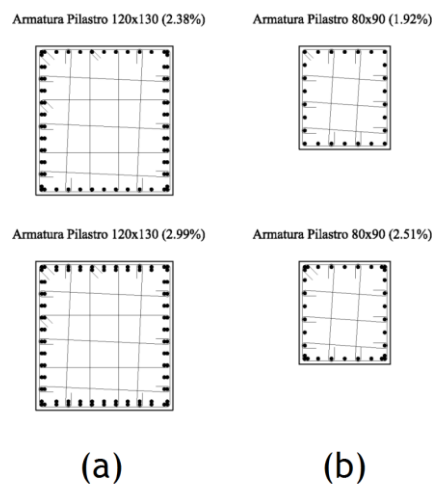


Figura 12 – Sezioni dei pilastri; a) senza dispositivi; b) con dispositivi

6. IMPIEGO DEI DISPOSITIVI SU PORTALE MONOPIANO AD UNA SOLA CAMPATA

Risulta interessante valutare l'impiego dei dispositivi ad attrito in schemi strutturali ricorrenti in edifici ad uso industriale. Per tale motivo è stato condotto uno studio preliminare di applicazione su di un portale monopiano con elementi prefabbricati in c.a.. Lo schema strutturale dei telai è composto da due pilastri isostatici incastrati a terra e da una trave posta fra di essi. Utilizzando il software SAP2000NL, sono stati messi a punto due modelli di calcolo, di cui uno dotato di dispositivi ad attrito. I dispositivi ad attrito schematizzati nel telaio (b) di Figura 13, sono modellati attraverso un elemento "n-link" di tipo "Plastic (Wen)". I parametri assunti sono : $M_y = 162$ kNm (momento di snervamento); $M_u = 268$ kNm (momento ultimo); $\Theta_y = 0,045\%$ (rotazione di snervamento); $\Theta_u = 3,0\%$ (rotazione ultima); $K_{el} = 360.000$ kN/m (rigidezza secante) e $K_p/K_{el} = 0,01$.

Il principio di funzionamento del dispositivo è illustrato nella Figura 14. Per valori moderati della azione sismica le sollecitazioni sui montanti sono più basse rispetto allo schema a mensola, grazie al comportamento semi-rigido del link trave-pilastro. In corrispondenza di valori elevati della azione sismica, nei dispositivi viene superata la deformazione limite elastica e vengono compiuti cicli dissipativi.

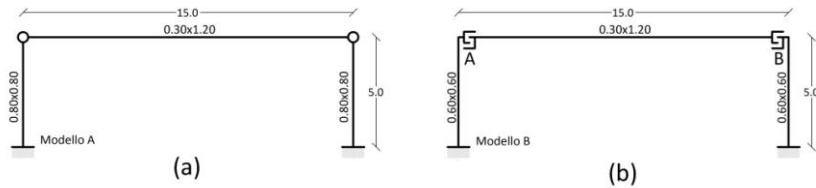


Figura 13 - Schemi dei modelli di calcolo per telai semplici

Per il dimensionamento iniziale degli elementi strutturali si è impiegata l'analisi dinamica con spettro di risposta, in accordo con la vigente normativa italiana. Per le valutazioni successive si è poi proceduto a svolgere analisi dinamiche non lineari con integrazione al passo, usando tre diversi accelerogrammi orizzontali registrati spettro-compatibili.

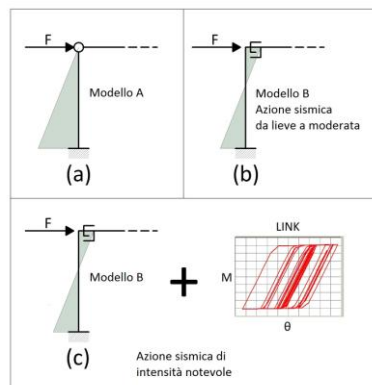


Figura 14 - Principio di funzionamento dei dispositivi

Il sito di riferimento per il progetto è L'Aquila. Il valore di progetto della accelerazione di bedrock rigido è pari a 0,261 g. La massima ordinata dello spettro di risposta elastico è uguale a 0,820 g. Dalla analisi dinamica non lineare si ricavano i cicli rotazione-momento subiti dai dispositivi ad attrito (si veda Figura 15). Dai grafici si apprende che i dispositivi attivano la fase plastica, compiendo cicli dissipativi.

L'impiego dei dispositivi consente di ridurre le sollecitazioni di flessione sui pilastri di circa il 50%. Quando sulle travi sono presenti vincoli di cerniera si hanno sollecitazioni tali da rendere necessaria per i pilastri una sezione di lato 800 mm, armata con rapporto di armatura $\rho = 1,18\%$. Nel modello con dispositivi ad attrito invece, si ritiene sufficiente l'adozione di una sezione di lato 600 mm, con rapporto di armatura $\rho = 1,17\%$.

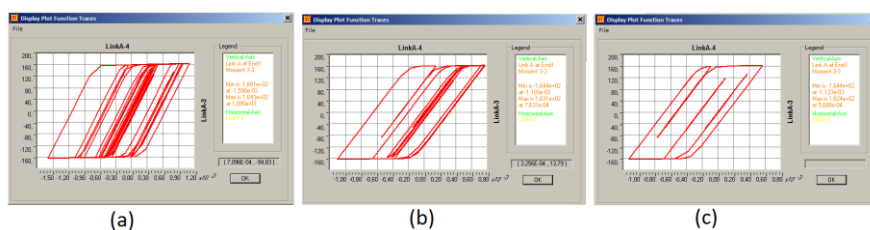


Figura 15 - Diagrammi Rotazione-Curvatura elemento Link A; (a) Analisi 1; (b) Analisi 2; (c) Analisi 3

7. CONCLUSIONI

Gli obiettivi di questo lavoro si concretizzano nella procedura di ottimizzazione dei parametri meccanici di dispositivi rotazionali ad attrito e nella valutazione dell'efficacia correlata all'inserimento dei dispositivi di protezione sismica anche nei nodi pilastro-fondazione. Con riferimento ad un telaio piano composto da soli elementi prefabbricati, si è proceduto in una prima fase allo studio del comportamento dei singoli dispositivi, parametrizzando le rigidezze elastiche e le soglie plastiche. Dal confronto dei risultati è stato possibile individuare i parametri che definiscono il ciclo ottimale di funzionamento. Nella seconda fase, mediante analisi dinamiche non lineari, è stato condotto lo studio della risposta globale del telaio piano, mettendo a confronto un modello senza dispositivi ed uno con dispositivi nella configurazione "C". Le analisi dinamiche non lineari eseguite sulla struttura hanno mostrato che è possibile ridurre ulteriormente le sollecitazioni nei pilastri, rispetto al caso studio originale, mediante l'inserimento di dispositivi alla base dei pilastri. L'inserimento nella struttura di dispositivi dissipativi anche alla base dei pilastri comporta un aumento degli spostamenti in fase sismica; tuttavia, sebbene la naturale conseguenza sia l'aumento di energia dissipata, al fine di contenere i drift di piano al disotto delle soglie consentite dalla norma, è necessario tarare opportunamente i cicli dei dispositivi. L'inserimento dei dissipatori rotazionali produce un beneficio in termini di riduzione dei costi di riparazione e dei costi di inutilizzo della costruzione successivi ad un evento sismico. Per quanto riguarda i costi di costruzione di un nuovo manufatto, i dispositivi ipotizzati sono di basso costo, il loro funzionamento è di tipo meccanico e la loro installazione e manutenzione non richiede particolari accorgimenti. Sono stati effettuati dei calcoli speditivi di raffronto per valutare la riduzione del costo della costruzione a seguito dell'inserimento dei dispositivi, anche in riferimento ad un telaio ad una sola campata e ad un solo piano : la comparazione relativa ai soli pilastri, ha evidenziato un risparmio valutabile intorno al 35%.

BIBLIOGRAFIA

- Applied Technology Council, 1996. *ATC-40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings.*, Washington D.C.
- Comodini F., Mezzi M., 2012, *Ricerca di sistemi di protezione appropriati per schemi prefabbricati ricorrenti*, EdA - Esempi di architettura on-line, ISSN 2035-7982.
- CSI, Computers and Structures Inc., 2005. *Analysis Reference Manual*, Berkeley, USA.
- Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E., 2006. *Accelerogrammi Naturali Compatibili con le Specifiche dell'OPCM 3274 per l'Analisi Non Lineare delle Strutture*. RELUIS - Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica.
- Ministero delle Infrastrutture, D.M. 14 gennaio 2008, *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*, Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008.

- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare 2 febbraio 2009 n. 617, *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"* di cui al D.M. 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009.
- Morgen B.G. and Kurama Y.C., 2004. *A friction damper for post-tensioned precast concrete beam-to-column joints*, 23th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada
- Pampanin S., Priestley M.J.N. and Sritharan S., 2000. *Alternative Design Philosophies for Precast Concrete Buildings: Prospectives for the Italian Reality*. 13th CTE (Collegium of the Building Technology) Convention, Pisa, Italy.
- Parducci A., 1978, *Considerazioni sulla progettazione di edifici pre-fabbricati antisismici*, L'INDUSTRIA ITALIANA DEL CEMENTO, XLVIII, Febbraio, Pagine 103-113.
- Parducci A., 1978, *Costruzioni prefabbricate antisismiche*, in *Ingegneria Antisismica*, E.S.A.- Roma, Pagine 205-230
- Castellani A., 1978, *Problemi di statica delle strutture prefabbricate*, in *Enciclopedia Treccani*, V Appendice (1995)
- Parducci A., 2007, *Progetto delle costruzioni in zona sismica*, Liguori editore.