



Progetto e valutazione sismica di telai e sistemi duali con connessioni ad attrito

Rosario Montuori^a, Elide Nastri^a, Vincenzo Piluso^a, Simona Streppone^a
^a *Dipartimento di Ingegneria Civile, Via Giovanni Paolo II, 84084 Salerno, Italy*

Keywords: Plastic design, Connections, Friction Dampers, Moment Resisting Frames, Concentrically Braced Frames, FREEDAM Project

ABSTRACT

Il lavoro illustra il progetto e l'analisi statica non lineare di sistemi perimetrali sismo-resistenti in acciaio. Nello specifico, sia telai sismo-resistenti (MRFs) sia sistemi accoppiati telaio-controvento concentrico (D-CBFs) sono progettati tramite la Teoria del Controllo del Meccanismo Plastico (TPMC), che ha lo scopo di attivare tutte le zone dissipative, promuovendo, in tal modo, la formazione di un meccanismo globale. Le strutture sono dotate, inoltre, di dissipatori ad attrito, chiamati FREEDAM, in corrispondenza delle estremità delle travi e dell'intersezione delle diagonali di controvento. Essi dissipano l'energia sismica in ingresso e preservano gli elementi strutturali dal danneggiamento. Il lavoro si propone di confrontare le due tipologie strutturali proposte sia in termini di risultati di progettazione sia in termini di prestazioni sismiche. A tal fine, sono state progettate 8 diverse strutture per ogni tipologia proposta (MRF e D-CBF) e, in seguito, sono state sottoposte ad analisi statica non lineare.

1 INTRODUZIONE

L'utilizzo dei dispositivi ad attrito nell'ambito della dissipazione di energia sismica si sta incrementando sempre più, grazie ai vantaggi che derivano dal loro impiego. Essi possono, infatti, sia rimpiazzare le zone dissipative sia costituire una risorsa dissipativa supplementare, allo scopo di salvaguardare gli elementi strutturali principali dal danno con efficacia e versatilità (Fiorino e altri, 2017; Mirzai e altri, 2018. Campiche e altri 2018. Totter e altri, 2018. De Matteis e altri, 2018. Fiorino e altri, 2016. Macillo e altri, 2017. Macillo, e altri, 2014).

Se da un lato il danno strutturale risulta essenziale per la dissipazione dell'energia sismica in ingresso, esso costituisce anche la principale causa di perdite dirette e indirette. Molti ricercatori, pertanto, hanno focalizzato gli studi su diverse strategie di dissipazione dell'energia, in grado di evitare o ridurre il danno strutturale causato da eventi sismici distruttivi. La strategia di dissipazione supplementare è basata sull'uso di dissipatori di energia collocati tra coppie di punti dello schema strutturale in cui, sotto l'azione di eventi sismici severi, sono attesi ingenti spostamenti relativi e velocità (Christopoulos e altri, 2006. Soong e Spencer, 2002. Mualla e

Belev, 2002. Oh e altri, 2009). Nell'ambito della strategia del controllo passivo (Latour e altri, 2013. Khoo e altri, 2012. Khoo e altri, 2013. Borzouie e altri, 2015. Latour e altri, 2011.), invece, i dissipatori possono sostituire completamente le tradizionali zone dissipative delle strutture, come le estremità delle travi. A questo scopo, le connessioni trave-colonna possono essere dotate di dissipatori ad attrito. Nel presente lavoro, si farà riferimento ai dissipatori FREEDAM, ampiamente testati al Laboratorio di Materiali e Strutture dell'Università di Salerno (STRENGTH), nell'ambito del progetto europeo FREEDAM. Essi sono impiegati sia nell'ambito della strategia sostitutiva, in corrispondenza dei nodi trave-colonna, sia di quella supplementare, all'intersezione delle diagonali di controvento.

In particolare, saranno investigate due tipologie strutturali: telai a nodi rigidi (indicati nel prosieguo come MRFs - Moment Resisting Frames) e sistemi accoppiati telaio-controvento concentrico a "V" rovescia (nel seguito riferiti come MRF-CBFs). In molti casi, infatti, i MRFs sono sovradimensionati a causa della necessità di ridurre lo spostamento relativo di interpiano. Tale effetto è preponderante nelle strutture in cui la trave principale risulta parallela alle travi secondarie dell'impalcato, ossia quando le travi non sono eccessivamente caricate. E proprio in tali casi risulta utile ed efficace l'aggiunta di

diagonali di controvento che riducano gli spostamenti laterali della struttura. Inoltre, l'intersezione delle diagonali di controvento può costituire il naturale alloggio di un dissipatore ad attrito aggiuntivo che incrementi la capacità dissipativa totale della struttura.

Ciò premesso, lo scopo del lavoro è quello di evidenziare le differenze tra MRFs e sistemi duali MRF-CBF in termini di peso strutturale, e quindi di costi, e in termini di prestazioni sismiche. Inoltre, le strutture sono progettate secondo la Teoria del Controllo del Meccanismo di collasso Plastico (TPMC) (Longo e altri, 2014a. Piluso e altri, 2015. Piluso e altri 2019a. Nastri e altri 2019. Montuori e altri, 2018a. Dell'Aglio e altri, 2017. Montuori e altri, 2017a. Montuori e altri, 2017b. Montuori e altri, 2016a. Nastri e altri, 2016. Longo e altri, 2014b. Montuori e altri 2016b. Piluso e altri, 2019b), la quale garantisce, in fase di collasso, la formazione di un meccanismo globale, che coinvolga, dunque, tutte le zone dissipative nella plasticizzazione. Si omette, in tale sede, la dettagliata esposizione della procedura di progetto anzi detta, giacché è possibile ritrovarla in articoli preliminari (Piluso e altri, 2019a). Entrambe le tipologie strutturali così progettate, MRFs e MRF-CBFs, sono state altresì sottoposte ad analisi pushover, al fine di evidenziare al meglio la differenza tra le stesse e di validare la procedura di progetto.

2 DISSIPATORI FREEDAM

I dispositivi FREEDAM sono in grado di dissipare l'energia sismica in ingresso attraverso la forza di attrito che si sviluppa dallo scorrimento relativo dei piatti (pads) che li costituiscono (Latour e altri, 2011. Ferrante Cavallaro e altri, 2017. Latour e altri, 2018. Latour e altri, 2019.

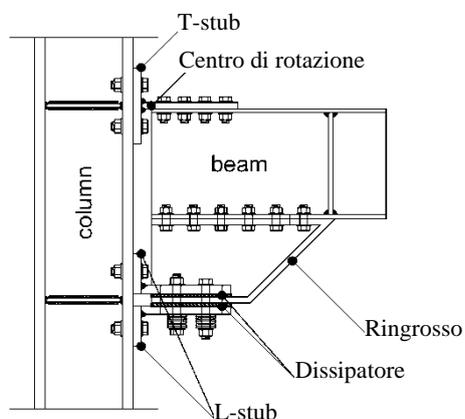


Figura 1. Connessione trave-colonna FREEDAM.

Ferrante Cavallaro e altri, 2018. Latour e altri, 2018).

In questo lavoro, i dissipatori FREEDAM sono stati utilizzati nell'ambito della strategia di dissipazione dell'energia sismica sia supplementare sia sostitutiva; infatti, sono posizionati all'intersezione delle diagonali di controvento dei sistemi duali MRF-CBF e nei nodi trave-colonna degli stessi e dei MRF. I due differenti dettagli sono riportati in Figura 1 e Figura 2 e sono meglio descritti nel seguito. Nel nodo trave-colonna, il dissipatore ad attrito è bullonato a un ringrosso, posizionato al di sotto della flangia inferiore della trave, che serve ad aumentare il braccio di leva. In tale zona può avvenire lo slittamento relativo tra i due piatti attritivi, grazie all'uso di fori asolati che consentono gli spostamenti richiesti (Latour e altri, 2011. Ferrante Cavallaro e altri, 2017. Latour e altri, 2018. Latour e altri, 2019. Ferrante Cavallaro e altri, 2018. Latour e altri, 2018). Gli altri elementi costituenti la connessione sono progettati per restare in campo elastico. Il dettaglio trave-colonna è costituito, inoltre, da un classico giunto a T, in cui risiede il centro di rotazione del nodo, che connette la flangia superiore della trave alla colonna. Il principale vantaggio di tale connessione è che la resistenza flessionale può essere calibrata in funzione delle azioni derivanti dalla combinazione di carico sismico, in maniera tale da promuovere la simultanea attivazione di tutti i dispositivi. Il dissipatore FREEDAM localizzato alla testa delle diagonali di controvento è costituito anch'esso da piatti attritivi bullonati a un fazzoletto interno in acciaio inossidabile dotato di fori asolati che ne consente lo scorrimento orizzontale.

Al fine di progettare il nodo (CEN. Eurocode 3-Part 1-8, 2005c. Di Lauro e atri, 2019), si

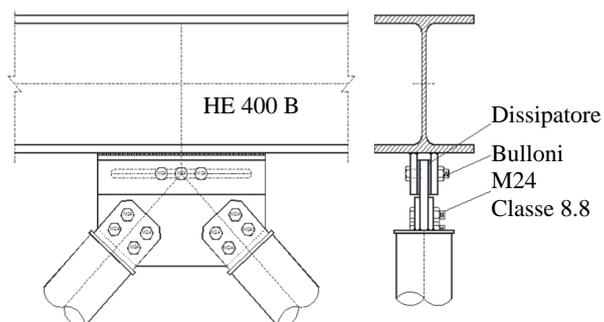


Figura 2. Dissipatore FREEDAM posizionato alla testa delle diagonali di controvento.

applicano i principi del *capacity design*. In base al primo, si progettano le zone dissipative in funzione delle massime sollecitazioni derivanti dalle combinazioni di carico. Di conseguenza, si procede all'applicazione del secondo principio, secondo cui si progettano le zone non dissipative in funzione delle massime sollecitazioni che le zone dissipative, plasticizzate ed incrudite fino al limite della resistenza ultima, sono in grado di trasmettere ad esse.

Nei casi studio di seguito analizzati, le connessioni trave-colonna FREEDAM, nonostante costituiscano la zona dissipativa, sono state progettate a seguito di travi e colonne a causa delle stringenti verifiche allo Stato Limite di Danno. In generale, la resistenza flessionale richiesta ad ogni nodo è pari al massimo valore tra il momento derivante dai carichi verticali e quello derivante dalle azioni sismiche (Piluso e altri, 2015). Quest'ultimo è stato valutato servendosi di una distribuzione di forze laterali sulla struttura analoga al tagliante sismico di piano, come suggerito da Goel e Lee (Goel e Lee, 2001.). La forza di scorrimento F_{slip} , agente sul dissipatore FREEDAM corrispondente alla j -esima campata del k -esimo piano, si valuta dividendo la resistenza flettente del nodo, $M_{f.Ed}$, per il braccio di leva, z :

$$F_{slip} = \frac{M_{f.Ed}}{z} \quad (1)$$

Il braccio di leva è la somma dell'altezza della trave d_b e dell'altezza del ringrosso h_n .

In maniera simile, anche la forza resistente di scorrimento del dissipatore posizionato in serie con le diagonali di controvento è distribuita lungo l'altezza dell'edificio in maniera conforme al tagliante sismico di piano (Nastri e altri, 2019. Costanzo e altri, 2017. Costanzo e altri, 2016. D'Aniello e altri, 2015. Montuori e altri, 2018b).

Per le zone non dissipative, come travi e diagonali, si applica il secondo principio del *capacity design*. In particolare, per quanto riguarda la connessione trave-colonna, si deve verificare che il momento di capacità relativo a quest'ultima sia minore del momento resistente della trave. Altresì le diagonali si devono progettare in funzione della massima resistenza di scorrimento che il dissipatore è in grado di trasmettere loro in condizioni ultime. I profili delle colonne, anch'esse facenti parte delle zone non dissipative, sono ricavate dalla procedura di progettazione chiamata TPMC, descritta nel paragrafo seguente.

3 TEORIA DEL CONTROLLO DEL MECCANISMO PLASTICO

La Teoria del Controllo del Meccanismo Plastico (TPMC) è una procedura di progetto basata sul teorema cinematico del collasso plastico ed estesa al concetto di curva di equilibrio del meccanismo:

$$\alpha = \alpha_0 - \gamma\delta \quad (2)$$

Dove, in accordo alla teoria dell'analisi rigido plastica, α_0 è il moltiplicatore delle forze orizzontali del primo ordine, γ è la pendenza della curva di equilibrio del meccanismo linearizzata, dovuta agli effetti del secondo ordine, e δ è lo spostamento plastico in sommità della struttura. A differenza dell'Eurocodice 8 (Tartaglia e altri, 2018. CEN. Eurocode 8-Part 1, 2005a), la TPMC tiene conto direttamente e rigorosamente degli effetti del secondo ordine. Come illustrato in Figura 3, tale teoria stabilisce che la curva corrispondente al meccanismo globale debba giacere al di sotto di quella corrispondente a tutti i meccanismi parziali e indesiderati, fino al limite dello spostamento di progetto δ_u , compatibile con le risorse di duttilità locale della struttura (Piluso e altri, 2015). A partire dal progetto delle zone dissipative, la TPMC fornisce le sezioni delle colonne tali da assicurare un meccanismo di collasso globale.

Un approfondimento circa l'applicazione a casi studio di tale teoria di progettazione si può riscontrare negli articoli (Piluso e altri, 2015) e (Piluso e altri, 2019a), in cui essa è utilizzata per il progetto rispettivamente di MRFs e di sistemi accoppiati MRF-CBFs dotati di dissipatori ad attrito FREEDAM.

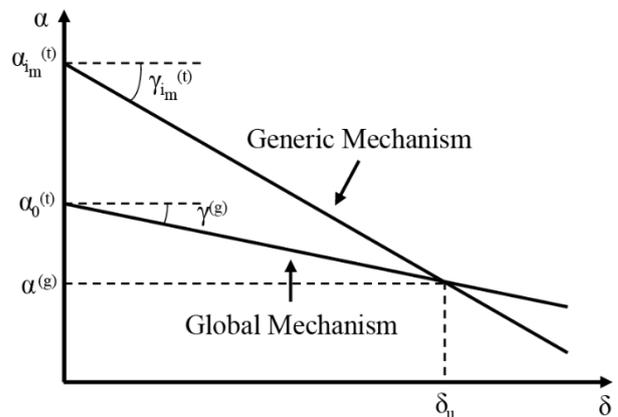
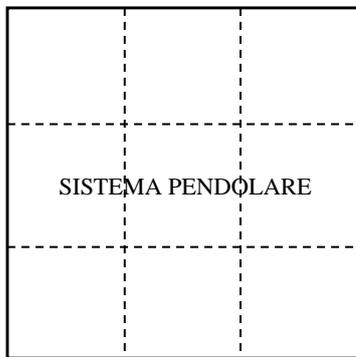


Figura 3. Condizione di progetto della TPMC.

4 CASI STUDIO

Sono stati progettati sistemi resistenti perimetrali in acciaio S355, la cui pianta di riferimento è illustrata in Figura 4. Gli edifici si articolano in una parte perimetrale sismo-resistente e in una parte interna pendolare. Essi si differenziano in numero (3 o 5) e lunghezza (6 o 8 metri) delle campate, nonché in numero di piani (3 o 6), per un totale di 8 casi studio derivanti dalla combinazione delle suddette caratteristiche geometriche. La struttura sismo-resistente è stata progettata, per ogni singolo caso studio, secondo due tipologie strutturali, ossia come telaio (MRF), e come sistema accoppiato telaio-controvento concentrico a “V” rovescia (MRF-CBF).

SISTEMA RESISTENTE PERIMETRALE



SISTEMA RESISTENTE PERIMETRALE

Figura 4. Pianta di riferimento per il progetto dei casi studio.

Tutte le strutture sono dotate di dissipatori FREEDAM ma, mentre nei telai essi sono collocati solo in corrispondenza dei nodi trave-colonna, nei sistemi duali si trovano anche all'intersezione delle diagonali di controvento. La Tabella 1 riassume tutte le strutture progettate con le relative caratteristiche geometriche.

I valori assunti per i carichi permanenti (G_k) ed accidentali (Q_k) sono riportati in Tabella 2. In essa sono indicati anche i valori dei coefficienti di combinazione delle azioni variabili ψ_2 e ψ_E impiegati, rispettivamente, nella determinazione del valore quasi permanente dell'azione variabile e degli effetti dell'azione sismica di progetto.

Per le strutture, sottoposte ad analisi statica lineare in accordo all'Eurocodice 8 (CEN. Eurocode 8-Part 1, 2005a.), si è assunto: un'accelerazione di picco al suolo (PGA) pari a 0.35 g, un fattore di risposta sismico uguale a 2.5, un fattore di comportamento q pari a 6.5 e un fattore di smorzamento pari al 2%. Si è fatto riferimento, inoltre, a uno spettro di risposta di Tipo 1 e a suolo di Tipo C.

È importante sottolineare che ciò che incide in maniera decisiva sul dimensionamento è il

Tabella 1. Strutture progettate e relative caratteristiche geometriche.

Nome schema	Num. piani	Num. campate	Lunghezza campata [m]	Tipologia strutturale
Scheme2	3	3	6	MRF MRF-CBF
Scheme4	3	3	8	MRF MRF-CBF
Scheme6	3	5	6	MRF MRF-CBF
Scheme8	3	5	8	MRF MRF-CBF
Scheme10	6	3	6	MRF MRF-CBF
Scheme12	6	3	8	MRF MRF-CBF
Scheme14	6	5	6	MRF MRF-CBF
Scheme16	6	5	8	MRF MRF-CBF

Tabella 2. Valori caratteristici dei carichi.

Ubicazione	Tipologia	Carico [kN/m ²]	$\psi_{2,i}$	$\psi_{E,i}$
Copertura	Permanente	4.5	0.3	0.24
	Variabile	2		
Piani intermedi	Permanente	4.5	0.3	0.15
	Variabile	2		

soddisfacimento della verifica allo stato limite di danno, prevista dalla normativa (CEN. Eurocode 8-Part 1, 2005a.). Dovendo, infatti, risultare lo spostamento relativo di interpiano inferiore all'1% dell'altezza di interpiano stessa, tale condizione risulta la più restrittiva.

La Figura 5 raffigura i risultati della progettazione relativa al caso studio Scheme 2, mentre la Tabella 3 compendia i risultati derivanti dalla progettazione delle restanti strutture.

È facile notare che i sistemi duali MRF-CBF esibiscono complessivamente profili più snelli rispetto ai telai a nodi rigidi progettati per il medesimo caso studio. La differenza tra le due tipologie è stata valutata in termini di peso strutturale. In Tabella 4 sono, quindi, riportati i pesi delle strutture e la diminuzione di peso, espressa in termini percentuali, raggiunta grazie all'utilizzo del sistema accoppiato.

In generale, è possibile affermare che l'uso di sistemi accoppiati telaio-controvento concentrico comporta una discreta diminuzione in termini di peso della struttura e, dunque, un notevole vantaggio in termini economici. Tale affermazione è corroborata da quanto riportato in Figura 6.

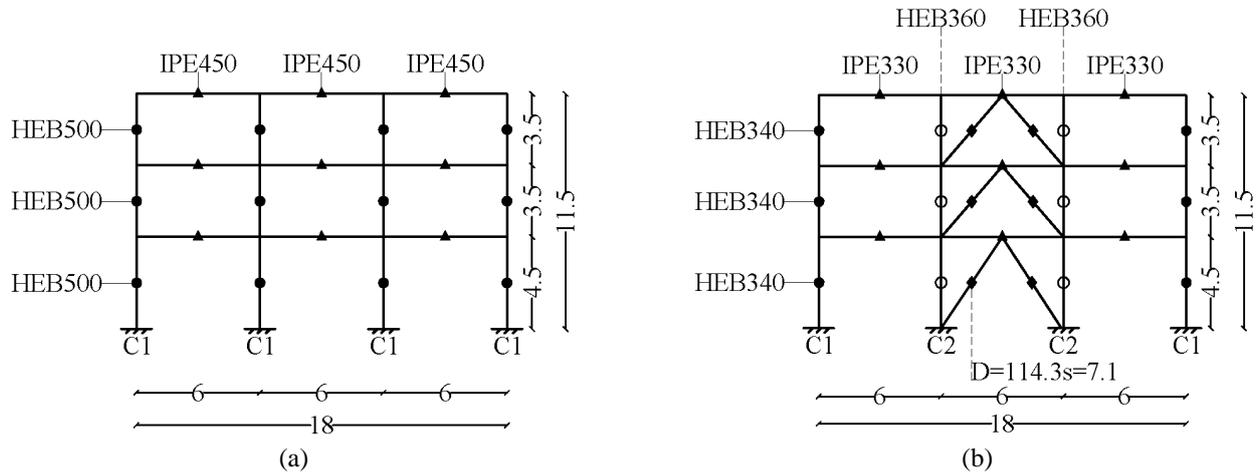


Figura 5. Dimensionamento del caso studio Scheme 2 nelle tipologie MRF (a) e MRF-CBF (b).

Tabella 3. Profili strutturali risultanti dalla progettazione.

Nome caso studio	Tipologia strutturale	Piano	Sezione trave	C1		D
				Sezione colonna	C2	Sezione diagonale
Scheme2	MRF	1-3	IPE 450	HEB 500		
	MRF-CBF	1-3	IPE 330	HEB 340	HEB 360	D=114.3s=7.1
Scheme4	MRF	1-3	IPE 550	HEB 650		
	MRF-CBF	1-3	IPE 400	HEB 500	HEB 500	D=139.7s=6.3
Scheme6	MRF	1-3	IPE 500	HEB 600		
	MRF-CBF	1-3	IPE 400	HEB 450	HEB 500	D=139.7s=12.5
Scheme8	MRF	1-3	IPE 600	HEM 650		
	MRF-CBF	1-3	IPE 550	HEM 450	HEM 500	D=219.1s=6.3
Scheme10	MRF	1-4	IPE 450	HEB 600		
		5-6	IPE 450	HEB 550		
	MRF-CBF	1-3	IPE 400	HEB 500	HEB 500	D=114.3s=10
Scheme12	MRF	1-4	IPE 550	HEM 700		
		5-6	IPE 550	HEM 600		
	MRF-CBF	1-3	IPE 500	HEM 550	HEM 600	D=139.7s=10
Scheme14	MRF	1-4	IPE 500	HEM 650		
		5-6	IPE 500	HEM 550		
	MRF-CBF	1-3	IPE 500	HEM 550	HEM 700	D=139.7s=12.5
Scheme16	MRF	1-4	IPE750x134	HD400x818		
		5-6	IPE750x134	HD400x744		
	MRF-CBF	1-3	IPE 500	HEM 800	HEM 900	D=168.3s=6.3
		4-6	IPE 500	HEM 650	HEM 650	D=168.3s=6.3

Tabella 4. Confronto tra i pesi dei telai a nodi rigidi (MRF) e i sistemi duali (MRF-CBF).

Schema	Peso MRF [kg]	Peso MRF-CBF [kg]	Diminuzione peso [%]
Scheme2	12987.90	9724.29	25.13
Scheme4	18137.81	14322.76	21.03
Scheme6	23121.66	19606.11	15.20
Scheme8	35415.03	32492.47	8.25
Scheme10	27028.87	23825.81	11.85
Scheme12	41731.93	39499.50	5.35
Scheme14	55205.64	55661.29	-0.83
Scheme16	138423.56	89653.51	35.23
AVERAGE			15.15

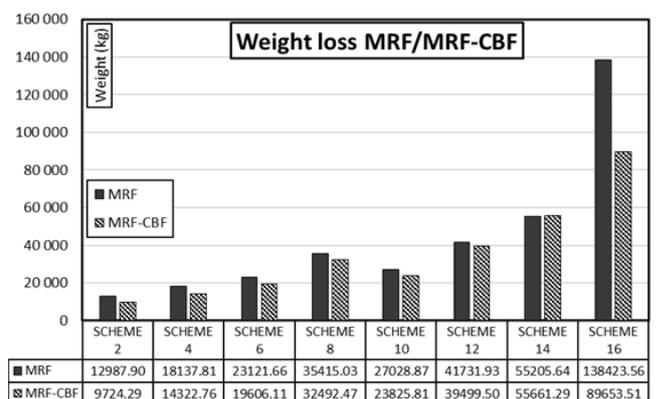


Figura 6. Confronto tra i pesi dei telai a nodi rigidi (MRF) e dei sistemi duali (MRF-CBF).

5 VALUTAZIONE SISMICA ATTRAVERSO ANALISI PUSHOVER

Le strutture descritte nel precedente paragrafo sono state sottoposte ad analisi pushover in ambiente SAP2000 (CSI SAP 2000, 2007), al fine di valutarne le prestazioni sismiche. Lo scopo principale di tale analisi è la verifica della tipologia di collasso, in quanto lo sviluppo di un meccanismo di collasso globale dimostra l'accuratezza della metodologia di progettazione utilizzata, basata sulla teoria del controllo del meccanismo di collasso plastico.

L'analisi è stata condotta in controllo di spostamenti e tenendo conto delle non linearità sia geometriche sia meccaniche, come appresso descritto.

La totalità degli elementi strutturali, ossia travi, pilastri e diagonali, sono stati modellati attraverso elementi "beam-column". La non linearità meccanica è stata considerata attraverso l'assegnazione di cerniere plastiche, elementi "P-hinges" aventi curva rigido-plastica, alle estremità degli elementi strutturali. Le cerniere plastiche localizzate alle estremità delle travi sono modellate a flessione pura, mentre quelle alle estremità di colonne e diagonali di controvento tengono conto dell'interazione tra sforzo assiale e momento flettente. Il momento-soglia imposto alla cerniera plastica rappresentativa del dissipatore FREEDAM in corrispondenza delle estremità delle travi è stato ricavato dal prodotto tra la forza resistente di scorrimento del dissipatore e il braccio di leva della connessione stessa, descritto nel paragrafo 2. I dissipatori posizionati all'intersezione delle diagonali di controvento sono stati modellati, invece, attraverso un piccolo elemento "beam-column" dotato di cerniere plastiche alle estremità, aventi soglia di plasticizzazione pari alla forza resistente di slittamento del dissipatore. Quest'ultima comprende anche la sovra-resistenza dovuta alla variabilità del coefficiente di attrito e all'incertezza circa il precarico dei bulloni.

I risultati dell'analisi pushover sono rappresentati dalle curve di capacità della struttura, illustrate in Figura 7. Per ogni caso studio, si è riportata la curva pushover relativa alla struttura a telaio e a quella dotata di controventi. La retta tratteggiata rappresenta, invece, la curva di equilibrio del meccanismo di collasso, derivante dalla teoria di progettazione utilizzata. La corrispondenza tra le due curve suddette attesta l'efficacia della metodologia di progetto adoperata. Ciò a conferma dell'attivazione, in fase di collasso, di un meccanismo di tipo globale e,

dunque, del massimo coinvolgimento delle risorse di duttilità della struttura.

Confrontando le curve delle due tipologie strutturali relative al medesimo caso studio, inoltre, è possibile constatare che l'utilizzo di sistemi duali consente di ottenere delle strutture più resistenti in aggiunta al risparmio in termini di peso strutturale e, quindi, di costo, già evidenziato nel precedente paragrafo 4.

6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha riguardato la progettazione di sistemi perimetrali in acciaio dotati di dissipatori ad attrito di tipo FREEDAM. Questi ultimi, attivandosi in corrispondenza di un determinato valore di sollecitazione, sono in grado di preservare gli elementi strutturali dal danneggiamento, dissipando l'energia sismica in ingresso attraverso lo scorrimento relativo tra i piatti attritivi di cui si compongono. Inoltre, essi possono fungere da riserve addizionali di dissipazione di energia se posizionati in punti strategici della struttura, ove si attendano, ad esempio, ingenti spostamenti relativi. Le strutture progettate in questo articolo prevedono l'utilizzo dei FREEDAM per ambo gli scopi su esposti e si ritrovano, quindi, sia in corrispondenza dei nodi trave-colonna sia all'intersezione delle diagonali di controvento, rispettivamente. In particolare, con riferimento al medesimo caso studio, si è progettato un telaio, MRF, e un sistema accoppiato telaio-controvento concentrico, MRF-CBF, per un totale di 8 casi studio e 16 strutture progettate, perseguendo lo scopo di paragonare le prestazioni sismiche delle due diverse tipologie strutturali a fronte del risparmio in termini di peso strutturale, e quindi economico, che si ottiene dall'utilizzo di un sistema duale. Il sistema accoppiato MRF-CBF consente, infatti, di impiegare sezioni ridotte rispetto al telaio a nodi fissi. In media, si è stimata una diminuzione in termini di peso strutturale tra le due tipologie pari al 15.15%. Attraverso l'analisi pushover si è, inoltre, dimostrato che la procedura di progetto utilizzata garantisca effettivamente lo sviluppo di un meccanismo di collasso di tipo globale, impegnando in campo plastico tutte le zone dissipative della struttura. Le curve di pushover corrispondono perfettamente alla curva di equilibrio del meccanismo, derivante dalla teoria di progettazione utilizzata.

A valle di quanto riassunto finora, è dunque possibile affermare che l'utilizzo di sistemi accoppiati risulti da preferire rispetto ai

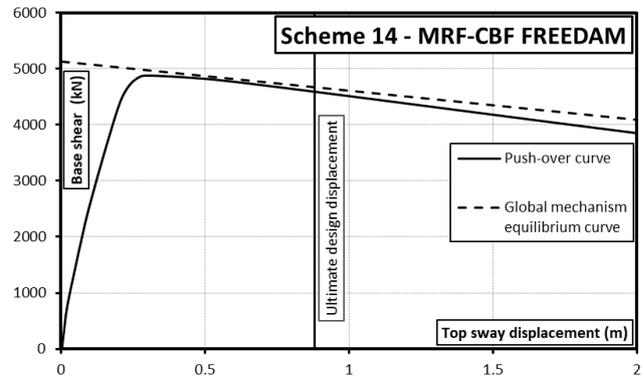
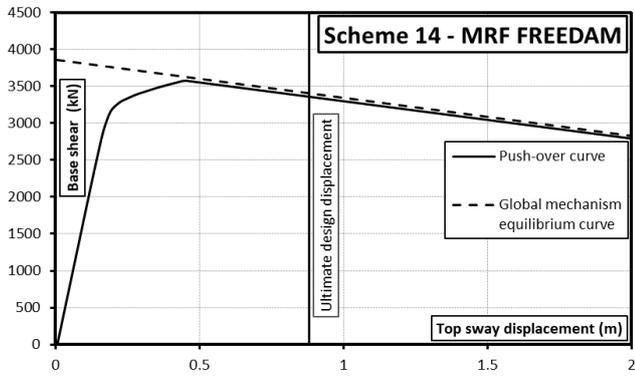
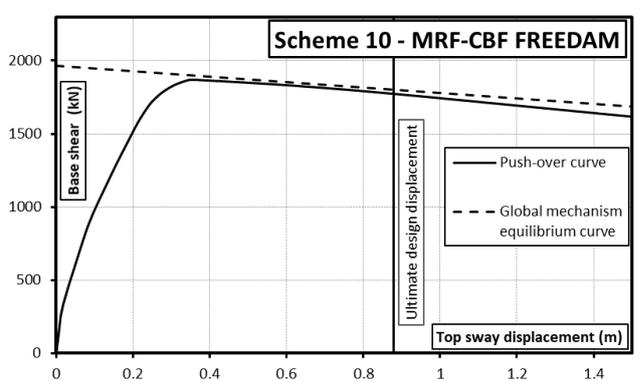
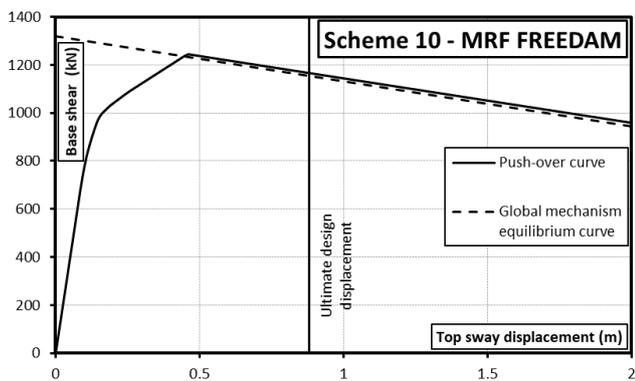
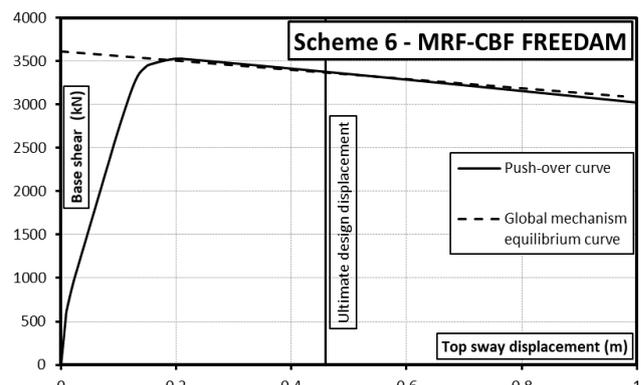
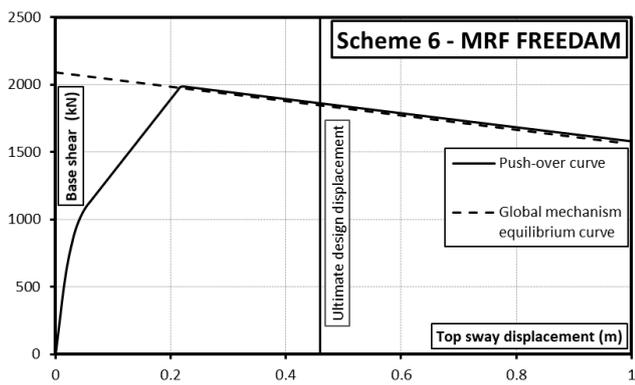
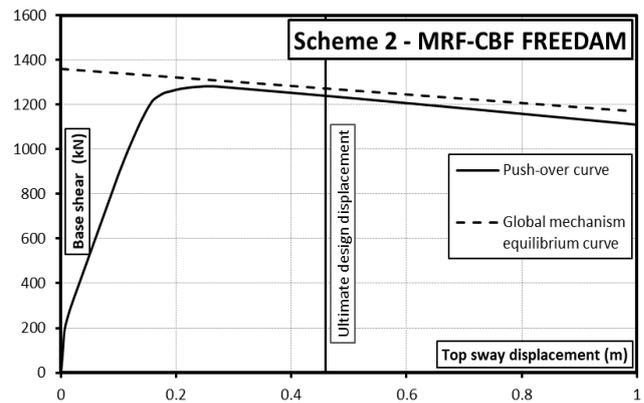
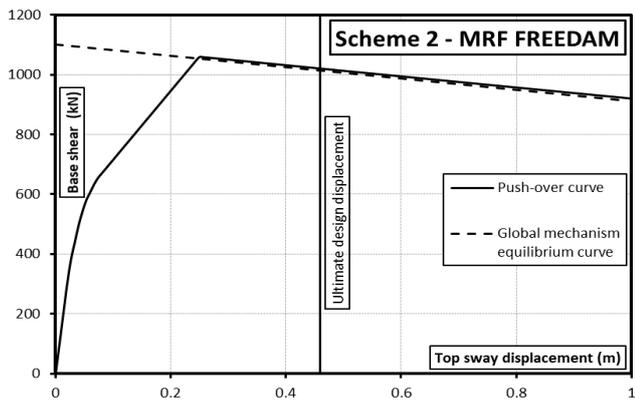


Figura 7. Curve di pushover e curve di equilibrio del meccanismo globale relative a parte delle strutture progettate.

tradizionali telai a nodi rigidi allorquando a governare la progettazione sia il soddisfacimento

della limitazione del danneggiamento, inerente lo spostamento relativo di interpiano.

7 RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca riportata nel presente articolo è stata supportata dai fondi per la ricerca RFSR-CT-2015-00022 della Comunità Europea. Si ringrazia, pertanto, la Commissione Europea e il supporto che garantisce alla ricerca e all'innovazione attraverso il fondo RFCS - Research Fund for Coal and Steel.

REFERENCES

- Borzouie, J., Macrae, G., Chase, J.G., Rodgers, G., Xie, R., Golondrino, J.C., Clifton C., 2015. Cyclic Performance of Asymmetric Friction Connections. *The Bridge and Structural Engineer*, **45**.
- Campiche, A., Shakeel, S., Macillo, V., Terracciano, M.T., Bucciero, B., Pali, T., Fiorino, L., Landolfo, R., 2018. Seismic behaviour of sheathed CFS buildings: Shake table tests and numerical modelling. *Ingegneria Sismica*, **35**(2), 106-123.
- CEN. 2005a. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- CEN. 2005c. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., 2006. *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS PRESS Pavia.
- Costanzo, S., D'Aniello, M., Landolfo, R., 2016. Critical review of seismic design criteria for chevron concentrically braced frames: The role of the brace-intercepted beam. *Ingegneria Sismica*, **33**(1-2), 72-89.
- Costanzo, S., D'Aniello, M., Landolfo, R., 2017. Seismic design criteria for Chevron CBFs: European vs North American codes (Part-1). *Journal of Constructional Steel Research*, **135**, 83-96.
- CSI 2007. SAP 2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Analysis Reference. Computer and Structure Inc. University of California, Berkeley.
- D'Aniello, M., Costanzo, S., Landolfo, R., 2015. The influence of beam stiffness on seismic response of chevron concentric bracings. *Journal of Constructional Steel Research*, **112**, 305-324.
- De Matteis, G., Brando, Caldosio F., D'Agostino, F., 2018. Seismic performance of dual steel frames with dissipative metal shear panels. *Ingegneria Sismica*, **35**(2), 124-141.
- Dell'Aglia, G., Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., 2017. A critical review of plastic design approaches for failure mode control of steel moment resisting frames. *Ingegneria Sismica*, **34** (4), 82-102.
- Di Lauro, F., Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., 2019. Partial safety factors and overstrength coefficient evaluation for the design of connections equipped with friction dampers. *Engineering Structures*, **178**, 645-655.
- Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., 2017. Experimental behaviour of innovative thermal spray coating materials for FREEDAM joints. *Composites Part B: Engineering*, **115**, 289-299.
- Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., 2018. Cyclic response of low yielding connections using different friction materials. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **114**, 404-423.
- Fiorino, L., Terracciano, M.T., Landolfo, R., 2016. Experimental investigation of seismic behaviour of low dissipative CFS strap-braced stud walls. *Journal of Constructional Steel Research*, **127**, 92-107.
- Fiorino, L., Macillo, V., Landolfo, R., 2017. Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building. *Engineering Structures*, **151**, 633-647.
- Goel, S.C., Lee, S-S, 2001. Performance-Based Design of Steel Moment Frames using Target Drift and Yield Mechanism. *Research Report UMCEE 01-17, December*.
- Khoo, H., Clifton, C., Butterworth, J., MacRae, G., Gledhill, S., Sidwell, G., 2012. Development of the self-centering Sliding Hinge Joint with friction ring springs. *Journal of Constructional Steel Research*, **78**, 201-211.
- Khoo, H., Clifton, C., Butterworth, J., Macrae, G., 2013. Experimental Study of Full-Scale Self-Centering Sliding Hinge Joint Connections with Friction Ring Springs. *Journal of Earthquake Engineering*, **17**(7), 972-997.
- Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., 2011. Experimental analysis of innovative dissipative bolted double split tee beam-to-column connections. *Steel Construction*, **4**, 53-64.
- Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., 2013. Experimental behaviour of friction T-stub beam-to-column joints under cyclic loads. *Steel Construction*, **6**(1).
- Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., Landolfo, R., 2018. Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints. *Soil Dynamics and Earth-quake Engineering*, **115**, 66-81.
- Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., 2018. Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, **146**, 33-48.
- Latour, M., Rizzano, G., Santiago, A., Simões da Silva, L., 2019. Experimental response of a low-yielding, self-centering, rocking column base joint with friction dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **116**, 580-592.
- Longo, A., Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., 2014a. On the use of HSS in seismic-resistant structures. *Journal of Constructional Steel Research*, **103**, 1-12.
- Longo, A., Nastri, E., Piluso, V., 2014b. Theory of plastic mechanism control: State-of-the-art. *Open Construction and Building Technology Journal*, **8**, 262-278.
- Macillo, V., Iuorio, O., Terracciano, M.T., Fiorino, L., Landolfo, R., 2014. Seismic response of Cfs strap-braced stud walls: Theoretical study. *Thin-Walled Structures*, **85**, 301-312.
- Macillo, V., Fiorino, L., Landolfo, R., 2017. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests. *Thin-Walled Structures*, **120**, 161-171.
- Mirzai, N.M., Attarnejad, R., Hu, J.W., 2018. Enhancing the seismic performance of EBFs with vertical shear link using a new self-centering damper. *Ingegneria Sismica*, **35**(4), 57-76.
- Montuori, R., Muscati, R., 2016a. A general design procedure for failure mechanism control of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, **118**, 137-155.
- Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., 2016b. Theory of Plastic Mechanism Control for MRF-EBF dual systems: Closed form solution. *Engineering Structures*, **118**, 287-306.
- Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., 2017a. Influence of the bracing scheme on seismic performances of MRF-EBF dual systems. *Journal of Constructional Steel Research*, **132**, 179-190.

- Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Troisi, M., 2017b. Influence of connection typology on seismic response of MR-Frames with and without 'set-backs'. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **46**(1), 5-25.
- Montuori, R., Sagarese, V., 2018a. The use of steel RBS to increase ductility of wooden beams, *Engineering Structures*, **169**, 154-161.
- Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Streppone, S., D'Aniello, M., Zimbru, M., Landolfo, R., 2018b. Comparison between different design strategies for freedom frames: Push-overs and IDA analyses. *Open Construction and Building Technology Journal*, **12**, 140-153.
- Mualla, I., Belev, B., 2002. Seismic Response of Steel Frames Equipped with a New Friction Damper Device Under Earthquake Excitation. *Engineering Structures*, **24**(3), 365-371.
- Nastri, E., Eccentrically braced frames designed for the energy dissipation optimization, 2016. *ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, **4**, 8476-8491.
- Nastri, E., D'Aniello, M., Zimbru, M., Streppone, S., Landolfo, R., Montuori, R., Piluso, V., 2019. Seismic response of steel Moment Resisting Frames equipped with friction beam-to-column joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **119**, 144-157.
- Oh, S., Kim, Y., Ryu, H., 2009. Seismic Performance of Steel Structures with slit dampers. *Engineering Structures*, **31**, 1997-2008.
- Piluso, V., Nastri, E., Montuori, R., 2015. Advances in Theory of Plastic Mechanism Control: Closed Form Solution for MR-Frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **44**(7), 1035-1054.
- Piluso, V., Montuori, R., Nastri, E., Paciello, A., 2019a. Seismic response of MRF-CBF dual systems equipped with low damage friction connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **154**, 263-277.
- Piluso, V., Pisapia, A., Castaldo, P., Nastri, E., 2019b. Probabilistic Theory of Plastic Mechanism Control for Steel Moment Resisting Frames. *Structural Safety*, **76**, 95-107.
- Soong, T.T., Spencer, Jr B.F., 2002. Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice. *Engineering Structures*, **24**, 243-259.
- Tartaglia, R., D'Aniello, M., Di Lorenzo, G., De Martino, A., 2018. Influence of EC8 rules on p-delta effects on the design and response of steel MRF. *Ingegneria Sismica*, **35**(3), 104-120.
- Totter, E., Formisano, A., Crisafulli, F., Mazzolani, F., 2018. Seismic upgrading of RC structures with only beam connected Steel Plate Shear Walls. *Ingegneria Sismica*, **35**(2), 91-105.