

**PRELIMINARY NUMERICAL STUDY OF A STEEL
CONCENTRICALLY BRACED FRAME EQUIPPED WITH
DISSIPATIVE BRACES AND SELF-CENTRING COLUMN
BASES**

**STUDIO NUMERICO PRELIMINARE DI UN TELAIO IN
ACCIAIO DOTATO DI CONTROVENTI CONCENTRICI
DISSIPATIVI E COLONNE DI BASE RICENTRANTI**

Elena Elettore^{1*},
Antonella Bianca Francavilla¹
Massimo Latour¹
Gianvittorio Rizzano
University of Salerno
¹Department of Civil Engineering
Fisciano (SA), Italy
[*eelettore@unisa.it](mailto:eelettore@unisa.it)

Fabio Freddi²
University College London
Department of Civil,
Environmental and Geomatic Engineering
London, UK

ABSTRACT

The use of dissipative braces in steel structures has demonstrated to be an effective solution to achieve systems characterised by high stiffness, strength, and energy dissipation capacity. Such structures are usually arranged as Concentrically Braced Frames (CBFs) and the dissipative braces are usually composed of an elastic brace arranged in series with a dissipative device, which can consist of Friction devices (FDs), characterised by an almost perfectly plastic behaviour, and providing limited damage. Recent studies also demonstrated how the use of such devices can be beneficial for the definition of Self-Centring Column Bases (SC-CBs) in terms of residual drift reduction and reparability. The present study provides some preliminary results on the response of combined system coupling dissipative braces with FDs and SC-CBs. An experimental campaign has been planned on a two-storey steel specimen for such a system. This paper introduces the preliminary work for the specimen's design and tries to foresee the experimental outcomes. Non-linear models of the CBF with dissipative braces (DCBF) and the equivalent frame with SC-CBs (SC-DCBF) are developed in OpenSees. Non-linear incremental dynamic analyses are performed to compare the seismic performances of both configurations. Further numerical investigations are conducted to assess the structural performance, reparability, and resilience of the adopted technology.

SOMMARIO

L'uso di controventi dissipativi nelle strutture in acciaio si è dimostrato una soluzione efficace per realizzare sistemi caratterizzati da elevata rigidezza, resistenza e capacità di dissipazione di energia. Tali strutture sono tipicamente dotate di controventi concentrici (CBFs) composti da un controvento elastico disposto in serie con un dispositivo dissipativo, che può essere ad attrito (FD) e sono contraddistinti da un comportamento rigido perfettamente plastico e dalla facile riparabilità. Studi recenti hanno inoltre dimostrato come l'uso di tali dispositivi possa essere vantaggioso per la definizione di colonne di base autocentranti (SC-CB) in termini di riduzione degli spostamenti residui e della riparabilità. Il presente studio indaga e fornisce alcuni risultati preliminari sulla risposta del sistema combinato di controventi dissipativi ad attrito e nodi SC-CB. Per tale sistema è stata pianificata una campagna sperimentale su un provino in acciaio a due piani. Questo articolo introduce il lavoro preliminare per la progettazione del campione e ha l'obiettivo di prevedere i risultati sperimentali. Modelli numerici del caso-studio con controventi dissipativi (DCBF) e il telaio equivalente con SC-CB (SC-DCBF) sono sviluppati in OpenSees. Analisi dinamiche incrementali sono eseguite per ottenere i parametri di domanda ingegneristica di interesse per analizzare e confrontare le prestazioni sismiche di entrambe le configurazioni. I risultati numerici preliminari forniscono informazioni utili sul comportamento atteso delle strutture. Ulteriori indagini numeriche vengono condotte per valutare le prestazioni strutturali, la riparabilità e la resilienza di entrambe le tecnologie adottate.

1 INTRODUZIONE

Le Strutture a Controventi Concentrici in Acciaio (CBFs) rappresentano sistemi ampiamente utilizzati, grazie alla loro resistenza, stabilità e flessibilità nel sopportare le azioni sismiche. Per queste strutture, la tradizionale filosofia di 'progettazione a capacità' attualmente implementata nei moderni codici sismici [1] assicura il raggiungimento della duttilità di progetto e della capacità di dissipazione dell'energia attraverso il danneggiamento controllato di 'alcuni' componenti strutturali duttili. Tuttavia, questa strategia può comportare il verificarsi di danni irreparabili a specifici componenti strutturali (diagonale in trazione/compressione) [2]-[4], spesso portando a demolizioni/ricostruzioni strutturali diffuse con alti costi diretti e indiretti. Per superare questi svantaggi, negli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi lavori di ricerca nel campo dei componenti dissipativi sostituibili da introdurre nei telai controventati, come i dispositivi ad attrito (FDs) [5]-[8], controventi ad instabilità impedita (BRBs) [9]-[10] e smorzatori viscosi (VDs) [11]. Inoltre, altri sistemi si concentrano su una combinazione di barre d'acciaio post-tese ad alta resistenza per promuovere la capacità di auto-centraggio della struttura e su fusibili dedicati per dissipare l'energia sismica [12]-[17]. In questo contesto, studi di ricerca più recenti hanno anche dimostrato i benefici dell'implementazione di nuove soluzioni strutturali per Colonne di Base Auto-Centranti (SC-CBs) equipaggiate con dispositivi senza danni e auto-centranti [19] per la riduzione dello spostamento residuo e riparabilità dei telai momento resistente in acciaio (MRFs). Tuttavia, pochi studi si sono concentrati sull'uso di questi sistemi nei telai a controventi concentrici in acciaio (CBFs). Inoltre, pochi studi di ricerca attualmente si concentrano sulle metodologie di riparazione [19] per ripristinare le prestazioni sismiche originali della struttura, a causa della limitata disponibilità di tecniche di riparazione strutturale adeguate. Al fine di fornire ulteriori approfondimenti a supporto dello sviluppo di questi sistemi, è stata pianificata una campagna sperimentale su un telaio a controventi concentrici dissipativi in acciaio (DCBF) a due piani, equipaggiato con controventi dissipativi a frizione e SC-CBs. Questo articolo introduce il progetto del campione, e cerca di prevedere la risposta che sarà osservata durante il test sperimentale tramite simulazioni numeriche avanzate. Le considerazioni progettuali, come la selezione dei controventi e il dettaglio delle connessioni, sono discusse per garantire l'integrazione efficace degli elementi dissipativi nella

struttura. Due modelli numerici non lineari del DCBF solo con controventi ad attrito e del DCBF "equivalente" con SC-CBs (SC-DCBF) sono sviluppati in OpenSees [20]. Analisi dinamiche incrementali sono eseguite per confrontare le prestazioni sismiche di entrambe le configurazioni. Inoltre, il recupero delle prestazioni a livello di sistema del SC-DCBF è investigato numericamente utilizzando una semplice tecnica di riparazione consistente nell'allentamento dei bulloni dei FDs dei controventi dissipativi, seguendo una procedura già investigata dagli autori [19]. I risultati numerici preliminari forniscono informazioni utili sul comportamento atteso della struttura e sull'efficacia della metodologia di riparazione nel riallineare la struttura e recuperare le prestazioni sismiche iniziali.

2 CASO-STUDIO

Il campione di prova è una struttura in acciaio a due piani e una campata, dove due CBF longitudinali sono concepiti per resistere alle azioni sismiche e due controventi trasversali sono progettati per prevenire indesiderati effetti torsionali accidentali. La configurazione ha un'altezza di inter-piano di 2.40 m, la campata longitudinale e quella trasversale hanno rispettivamente una lunghezza di 4 m e 2 m (Fig. 1). Questa struttura è una rappresentazione su larga scala (al 75%) di una struttura prototipo caratterizzata da 2 piani e 3 campate in ciascuna direzione. Le masse ad ogni piano sono state valutate considerando che l'area tributaria di ciascun CBF corrisponde a 1/4 dell'area totale del piano della struttura prototipo. Il progetto è stato realizzato in conformità con l'Eurocodice 8 [1]. Lo spettro di risposta elastico di Tipo 1 con una PGA 0,35g, suolo di tipo B e occupazione residenziale è considerato per la definizione dello Stato Limite Ultimo (SLU). Il fattore di comportamento è assunto pari a $q = 4$ in conformità con l'Eurocodice 8 per telai con controventi concentrici diagonali [1]. Il limite di spostamento massimo di inter-piano per i requisiti di Stato Limite di Danno (DSL) è assunto pari a 1%, come suggerito nell'Eurocodice 8 [1].

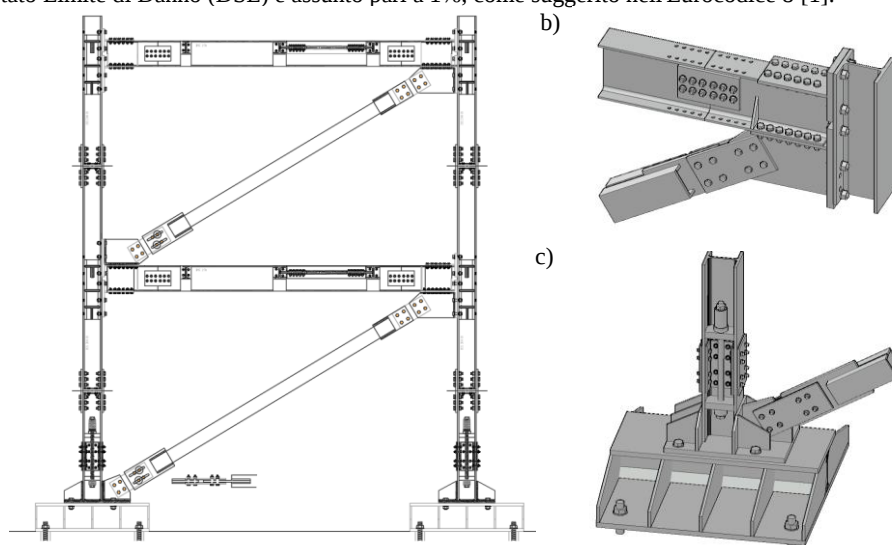


Fig. 1. Caso studio, dettagli delle connessioni

La forza di scorrimento di progetto dei FDs nei controventi può essere definita come segue:

$$F_{slip,d} = \mu n_s n_b F_{p,b} \quad (1)$$

dove μ è il coefficiente di attrito dei materiali a contatto, n_s è il numero delle superfici di contatto, n_b è il numero dei bulloni e $F_{p,b}$ è la forza di pre-serraggio di ciascun bullone. Secondo il progetto, la forza di slittamento dei FDs al primo e secondo piano è rispettivamente pari a 129 e 78.5 kN. Queste forze richiedono FDs con quattro bulloni M16 di Classe 10.9 con una forza di pre-serraggio ciascuno di 35 kN e di 24 kN rispettivamente per il primo ed il secondo piano. Il controvento elastico è adeguatamente sovradimensionato rispetto a queste forze per evitare snervamenti e/o instabilità. Successivamente i profili selezionati sono IPE 270 per le travi e HE 200B per le colonne, utilizzando acciaio nominale di classe S355JR. Il controvento diagonale è realizzato con una sezione cava quadrata (SHS) in acciaio, le cui dimensioni della sezione trasversale sono 140×140×12,5 mm. Il controvento, mostrato in Fig. 1(c), è equipaggiato da FDs sostituibili [21], costituiti da due piastre a L bullonate a una costola e al controvento. La connessione di base [22] è mostrata nella Fig. 1(c). Consiste in una combinazione di dispositivi FDs e barre PT ad alta resistenza con molle a disco posizionate simmetricamente per controllare il comportamento oscillante. L'obiettivo della campagna sperimentale è investigare i benefici derivanti dall'accoppiamento di entrambe le tipologie di connessione innovative.

3 MODELLAZIONE NUMERICA

Modelli 2D non lineari agli elementi finiti dei telai con e senza le connessioni SC-CB sono sviluppati in OpenSees [20] come mostrato in Fig. 2. Il controvento diagonale è modellato con un 'trussSection element', utilizzando il materiale 'Steel01' con una resistenza di snervamento di 355 MPa e un rapporto di rigidità post-snervamento dello 0,2%. Il dispositivo ad attrito è caratterizzato da un 'uniaxial hysteretic material' con una legge forza-spostamento trilineare simmetrica. Questo materiale adotta una forza di snervamento pari alla forza di scorrimento e un incrudimento post-elastico molto basso. Si evidenzia che l'instabilità del controvento non è modellata esplicitamente, poiché tutte le verifiche di instabilità sono soddisfatte nel progetto. La modellazione della connessione SC-CB è consistente con una strategia di modellazione validata in Elettore et al. [18].

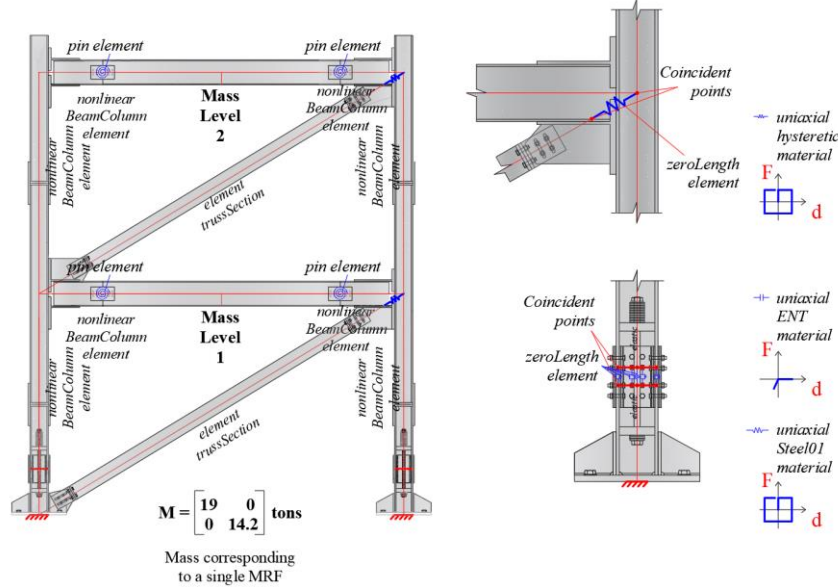


Fig. 2. Modellazione in OpenSees [20]

4 ANALISI DINAMICHE INCREMENTALI

Un set di 30 accelerogrammi è selezionato dal Database SIMBAD [23] con una scelta di parametri coerenti con precedenti studi [19]. Il periodo fondamentale del campione T_1 è pari a 0,16 secondi. Come parametri ingegneristici di domanda, sono monitorati i drift residui (IDR_{Res}) e i drift massimi di interpiano (IDR_{Peak}), consentendo il confronto delle prestazioni sismiche dei due sistemi. L'accelerazione spettrale corrispondente al periodo fondamentale di vibrazione ($S_a(T_1)$) è pari a 1.30g e 1.95g rispettivamente per DBE (SLU) e MCE (SLC). Analisi Dinamiche Incrementali (IDAs) [24] vengono eseguite per investigare come la connessioni di base proposta SC-CB influenzi la risposta sismica del telaio considerando anche la variabilità tra i diversi record. Per condurre le IDA, la serie di registrazioni di moto sismico viene scalata a valori crescenti della Misura di Intensità (IM) per coprire l'intero intervallo dalla risposta sismica elastica a quella non lineare delle strutture. In questo studio, l'IM è $S_a(T_1)$. La Fig. 3 (a) e (b) illustra IDR_{Res} per il primo e il secondo piano, rispettivamente. Le curve medie sono evidenziate nelle figure come sintesi dei valori di domanda per entrambe le grandezze, mentre le singole curve IDA sono mostrate in rosso per il DCBF e in blu per il SC-DCBF. Inoltre, sono considerati limiti di drift del 0.2% [25] per il riallineamento strutturale e del 0.5% **Error! Reference source not found.** per la riparabilità dell'edificio.

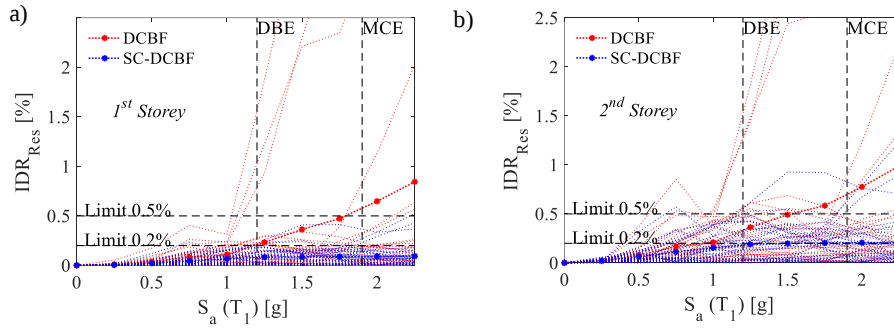


Fig. 3. Confronto del drift di inter-piano residuo tra DCBF e SC-DCBF: (a) primo piano e (b) secondo piano

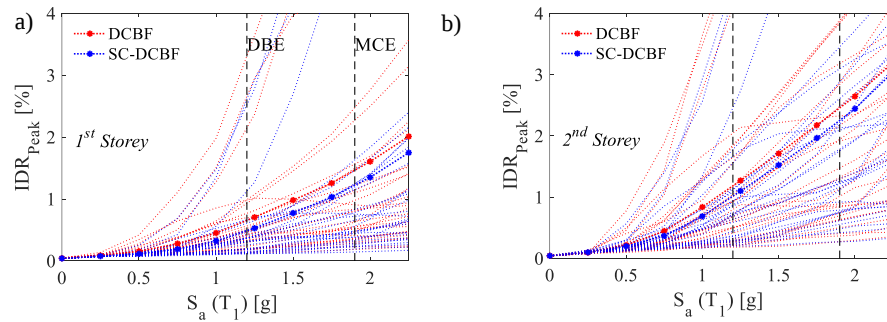


Fig. 4. Confronto del drift di inter-piano massimo tra DCBF e SC-DCBF: (a) primo piano e (b) secondo piano

I risultati mostrano che l'introduzione della proposta SC-CB permette una riduzione dei drift inter-piano residui per tutte le intensità riportate in termini di curve medie. In particolare, la curva media del SC-DCBF mostra sempre drift residui inferiore allo 0.2% al primo piano. La Fig. 4(a) e (b) illustra gli IDR_{Peak} per il primo e il secondo piano, rispettivamente. I risultati evidenziano come l'introduzione della SC-CB non influenzi significativamente la risposta di picco, che è simile per entrambe le strutture. Inoltre, per un singolo record di moto sismico scalato allo SLU, la Fig. 5(a) confronta il comportamento momento-curvatura delle sezioni inferiori delle colonne del primo piano delle due strutture. Si osserva come il DCBF con CB convenzionali subisca deformazioni plastiche, rendendo necessarie misure di riparazione dopo forti terremoti. Al contrario, per il SC-DCBF le colonne del primo piano mostrano un comportamento elastico lineare e sono completamente protette dallo snervamento. Inoltre, i FD mostrano un comportamento isteretico rettangolare, come mostrato nella Fig. 5 (b).

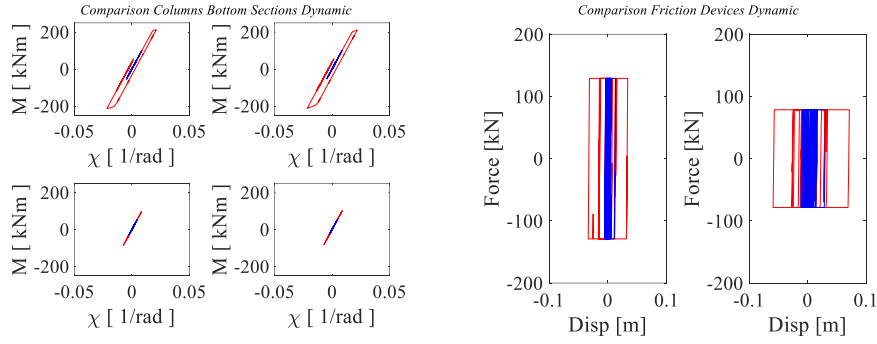


Fig. 5. (a) Relazione momento-curvatura nella sezione inferiore di una delle colonne del primo piano del DCBF rispetto al SC-DCBF; (b) Comportamento forza-spostamento dei dispositivi ad attrito (FDs).

5 SIMULAZIONI SULLA RIPARABILITA'

In questa sezione vengono fornite osservazioni preliminari sulla riparabilità del SC-DCBF, in linea con le analisi preliminari condotte in precedenza dagli autori [19]. Per simulare il processo di riparazione, per un singolo record di moto sismico, gli 'zero-length elements' del modello OpenSees [20], utilizzati per simulare il comportamento dei FDs, sono stati rimossi alla fine dell'analisi, e sono stati applicati punti di accelerazione zero per permettere alle vibrazioni libere di fermarsi e catturare correttamente gli spostamenti residui. La sequenza di rimozione degli elementi è stata divisa in quattro fasi: 1) rimozione del dispositivo FD del secondo piano appartenente al controvento; 2) rimozione del dispositivo FD del primo piano appartenente al controvento; 3) rimozione dei dispositivi FDs del primo SC-CB; 4) rimozione dei dispositivi FDs del secondo SC-CB. I risultati del processo di riparazione sono illustrati nella Fig. 6 per il SC-DCBF, in termini di drift inter-piano vs tempo necessario per completare l'intero processo di allentamento. Come è possibile osservare, i drift di inter-piano si sono azzerati, dimostrando l'efficacia della metodologia di riparazione. In altre parole, la struttura è in grado di tornare quasi alla posizione iniziale semplicemente allentando i bulloni dei FDs appartenenti a tutti i dispositivi. Questo evidenzia il beneficio della metodologia di riparazione, dimostrando un notevole miglioramento nella tecnologia per ottimizzare le prestazioni dei CBFs. In questa direzione, i risultati di questo studio forniscono utili spunti per la ricerca futura, delineando misure quantitative per la riparabilità struttu-

le, compreso il tempo di riparazione. Inoltre, i risultati offrono informazioni preziose per valutare ulteriormente le prestazioni sismiche delle strutture riparate.

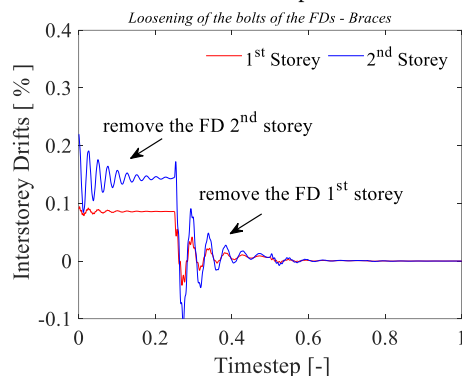


Fig. 6. Processo di allentamento dei bulloni per i dispositivi ad attrito dei controventi: Drift di inter-piano del 1° e 2° piano del SC-DCBF

8 CONCLUSIONI

Questo articolo introduce lo studio preliminare relativo a una campagna sperimentale pianificata su una struttura in acciaio a due piani in larga scala, dotata di Telai con Controventi Concentrici Dissipativi (DCBF), equipaggiati con controventi ad attrito e colonne di base auto-centranti (SC-CB). L'articolo descrive parte del lavoro preparatorio necessario per il progetto del campione di prova e prevede la risposta che sarà osservata durante il test sperimentale mediante simulazioni numeriche. Due modelli numerici del DCBF e del DCBF equivalente con SC-CB (SC-DCBF) sono sviluppati in OpenSees. Sono eseguite analisi dinamiche incrementali per analizzare e confrontare le prestazioni sismiche di entrambe le configurazioni. I risultati numerici preliminari forniscono informazioni utili sul comportamento atteso della struttura. Ulteriori indagini sono condotte per valutare la riparabilità strutturale della tecnologia adottata.

REFERENCES

- [1] EN 1998-1, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels
- [2] Costanzo S., D'Aniello M., Landolfo R., Seismic design rules for ductile Eurocode-compliant two-storey X concentrically braced frames, *Steel and Composite Structures*, 36, 273-291, 2020.
- [3] Brandonisio G., Toreno M., Grande E., Mele E., De Luca A., Seismic design of concentric braced frames. *J. Constr. Steel Res.* 2012, 78, 22–37.
- [4] Okazaki T., Lignos D.G., Midorikawa M., Ricles J.M., Love J., Damage to steel buildings observed after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Earthquake Spectra*. 2013;29(1):219–243.
- [5] Soong, T.T., Spencer, B.F., Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice. *Eng. Struct.* 2002, 24, 243
- [6] Pall, A.S., March, C., Seismic response of friction damped braced frames. *J. Struct. Div.* 1982, 108, 1313–1323
- [7] Filiatrault, A., Cherry, S., Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads. *Earthq. Spectra* 1987, 3, 57–78.

-
- [8] Colajanni, P., Papia, M. Seismic response of braced frames with and without friction dampers. *Eng. Struct.* 1995, 175, 129–140
- [9] Freddi F., Tubaldi E., Zona A., Dall'Asta A., Seismic performance of dual systems coupling moment-resisting frames and buckling-restrained braced frames. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2021;50(2):329-353.
- [10] Gutiérrez-Urzúa F., Freddi F., Influence of the design objectives on the seismic performance of steel moment resisting frames retrofitted with buckling restrained braces. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2022;51:3131–3153.
- [11] Constantinou, M.C., Symans, M.D., Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *Earthquake Eng. Struct. Dynam. Struct. Des. Tall Build.* 1993, 2, 93–132.
- [12] MacRae G., Clifton G.C.: Low Damage Design of Steel Structures, Steel Innovations 2013, Workshop, 21-22 February 2013, Christchurch
- [13] Chancellor N.B., Eatherton M.R., Roke D.A., Akbas T., Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems: High Performance Structures for the City of Tomorrow, *Buildings* 4 (2014) 520–548.
- [14] Fang C., Wang W., Qiu C., Hu S., MacRae G.A., Eatherton M.R., Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *J. Constr. Steel Res.* 2022;21:107172. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107172>
- [15] Titirla M., A State-of-the-Art Review of Passive Energy Dissipation Systems in Steel Braces, *Buildings*, 2023, 13, 851. <https://doi.org/10.3390/buildings13040851>
- [16] Christopoulos, C.; Tremblay, R.; Kim, H.J.; Lacerte, M. Self-centring energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: Development and validation. *J. Struct. Eng.* 2008, 134, 96–107.
- [17] O'Reilly GJ, Goggins J. Experimental testing of a self-centring concentrically braced steel frame, *Eng Struct.* 2021; 238:111521. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111521>.
- [18] Elettore E., Freddi F., Latour M., Rizzano G., Parametric Finite Element Analysis of Self-Centering Column Bases with different Structural Properties. *J Constr Steel Res.* 2022;199:107628. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107628>
- [19] Elettore E., Freddi F., Latour M., Piluso V., Rizzano G., Pseudo-dynamic testing, reparability and resilience assessment of a two-storey large-scale steel structure, equipped with self-centring column bases, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*
- [20] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves OpenSEES: Open System for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER), 2009, Univ. of California, Berkley, CA
- [21] Latour M., D'Aniello M., Zimbru M., Rizzano G., Piluso V., Landolfo R., Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 115 (2018) 66–81.
- [22] Latour M., Rizzano G., Santiago A., Da Silva L, Experimental response of a low-yielding, self-centring, rocking CB joint with friction dampers, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 116 (2019) 580–592.
- [23] Iervolino, C. Galasso, E. Cosenza, REXEL: Computer aided record selection for code-based seismic structural analysis, *B. Earthq. Eng.* 8 (2010) 339–362.
- [24] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental Dynamic Analysis, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 31(3) (2002) 491–514.
- [25] FEMA P58-1. Seismic performance assessment of buildings. Volume 1-Methodology. Applied Technology Council, Redwood City, CA, 2012.

KEYWORDS

Simulazioni numeriche, telai controventati concentrici dissipativi, basi di colonne auto-centranti, riparabilità, resilienza.