

**PROVE PSEUDODINAMICHE SU UNA STRUTTURA SISMO-  
RESILIENTE IN ACCIAIO DOTATA DI NODI TRAVE-  
COLONNA A BASSO DANNEGGIAMENTO E DI  
NODI DI BASE AUTO-CENTRANTI**

**PSEUDO - DYNAMIC TESTING OF A SEISMIC-RESILIENT  
STEEL STRUCTURE EQUIPPED WITH DAMAGE FREE BEAM-  
TO-COLUMN CONNECTION AND SELF-CENTRING COLUMN  
BASES**

Elena Elettore, Massimo Latour  
Vincenzo Piluso, Gianvittorio Rizzano  
University of Salerno  
Dept. of Civil Engineering  
Fisciano, Italy  
eelettore@unisa.it, mlatour@unisa.it  
v.piluso@unisa.it, g.rizzano@unisa.it

Fabio Freddi  
University College London  
Dept. of Civil, Env. and Geomatic Engineering  
London, UK  
f.freddi@ucl.ac.uk

**ABSTRACT**

In the last few decades, many research studies focused on developing innovative building structures to achieve seismic resilience. Among others, steel Moment Resisting Frames (MRFs) equipped with Friction Devices (FDs) in beam-to-column joints have emerged as an effective solution able to dissipate the seismic input energy while also ensuring the damage-free behaviour of the system. However, to date, little attention has been paid to their Column Bases (CBs), which represent fundamental components in achieving seismic resilience. In fact, conventional full-strength CBs suffer from residual rotations and large plastic deformations, leading to difficult-to-repair structures. In the last two decades, several research studies have proposed novel CB configurations to overcome these drawbacks. Among others, a type of damage-free Self-Centring (SC-CB) joint has been experimentally tested and numerically investigated by the authors, demonstrating the efficiency of the system in terms of damage-free and self-centring behaviour. In this direction, the present paper presents the preparatory work, and the preliminary results of Pseudo-Dynamic tests carried out at the University of Salerno on a two-storey large-scale steel frame equipped with SC-CBs. This paper illustrates the design of the specimen, the test setup and instrumentation, the pseudo-dynamic procedure and some experimental results. The tests' out-

comes demonstrate the effectiveness of the SC-CBs in reducing the residual storey drifts and in protecting the first storey column from damage.

## SOMMARIO

Negli ultimi decenni, diversi studi di ricerca hanno focalizzato sensibilmente l'attenzione su sistemi strutturali innovativi, allo scopo di ottenere un comportamento 'sismo-resiliente'. Con riferimento alle strutture intelaiate metalliche, è abbastanza recente la proposta di impiegare collegamenti dotati di dissipatori ad attrito in grado di conferire all'edificio un comportamento a basso danneggiamento. Però, sebbene siano stati eseguiti in tempi recenti già un certo numero di analisi su connessioni trave-colonna, l'utilizzo di nuove configurazioni di nodi alla base risulta ancora essere un recente sviluppo. I tradizionali nodi di base subiscono grandi deformazioni plastiche e danni, portando così alla necessità di misure di riparazione dopo eventi sismici severi. Per superare tali inconvenienti, un tipo di giunto di base auto-centrante è stato testato e studiato dagli autori, dimostrando l'efficienza del sistema in termini di ricentraggio. In questa prospettiva, presso l'Università degli Studi di Salerno, è stata eseguita una campagna di prove pseudo-dinamiche su una struttura in larga scala dotata tali collegamenti, al fine di valutarne l'influenza sulla risposta sismica globale e locale della struttura. Il lavoro presenta il progetto del provino e dei collegamenti, il setup di prova e la strumentazione e, successivamente i primi risultati sperimentali ottenuti. I risultati hanno dimostrato l'efficacia di tale collegamento nel minimizzare gli spostamenti residui, il danneggiamento locale e nel conferire una migliore capacità di ricentraggio all'intera struttura.

## 1 INTRODUZIONE

L'attuale filosofia di progettazione sismica, inclusa nelle normative moderne (*e.g.*, [1]), prevede l'elevato danneggiamento di alcune zone, identificate come dissipative, a seguito di eventi sismici di elevata intensità ([2]). Questo approccio, se da un lato consente di raggiungere i requisiti di sicurezza inclusi nei codici sismici, dall'altro lato, ha l'inconveniente di causare grandi perdite economiche. Infatti, poiché le zone dissipative appartengono ai principali elementi strutturali, dopo un evento sismico distruttivo, la struttura risulta significativamente danneggiata e caratterizzata da grandi spostamenti residui (*e.g.*, [3][4]).

Per superare tali inconvenienti, molti lavori di ricerca si sono dedicati alla definizione di soluzioni strutturali più performanti, in cui gli elementi danneggiati dal sisma possono essere facilmente sostituiti e/o riparati (*e.g.*, [5]) rispondendo alle crescenti aspettative per una società 'sismo-resiliente'. In quest'ottica, nei telai sismo-resistenti in acciaio (*i.e.*, Moment Resisting Frames MRFs), le tradizionali connessioni trave-colonna a completo ripristino di resistenza possono essere sostituite da collegamenti dotati di dissipatori ad attrito. Esempi significativi sono rappresentati dallo Sliding Hinge Joint [6] e dal collegamento 'FREE from DAMage' (FREEDAM) [7]-[11]. Sebbene l'uso di connessioni trave-colonna dotate di dispositivi ad attrito rappresenti una soluzione efficace per proteggere la struttura da eventuali danneggiamenti, esso non consente di controllare gli spostamenti residui. Questo problema è stato affrontato da diversi ricercatori introducendo cavi o barre Post-Tese (PT), in grado di conferire la capacità ricentrante all'edificio (*e.g.*, [12]). Nonostante i MRFs in acciaio con connessioni trave-colonna a basso danneggiamento siano stati ampiamente studiati negli ultimi decenni, l'utilizzo di nodi alla base innovativi risulta ancora essere un recente sviluppo. I nodi di base rappresentano componenti fondamentali della struttura, difficilmente sostituibili o riparabili; di conseguenza, assicurarne il basso danneggiamento è essenziale per raggiungere un comportamento sismo-resiliente. In questa direzione, diversi studi recenti sono stati dedicati allo sviluppo di nodi di base basati sulla combinazione di sistemi rocking, dispositivi dissipativi e barre post-tese, dimostrando il loro potenziale nel raggiungimento di un comportamento privo di danneggiamento e ricentrante [13]-[15].

In tale contesto, è stata recentemente proposta e testata sperimentalmente una connessione di base innovativa il cui comportamento sismico è controllato da una combinazione di dispositivi ad attrito e sistemi ricentranti, che introducono forze elastiche di ripristino [16]. Semplici equazioni analitiche sono state utilizzate per descrivere il comportamento momento-rotazione della connessione, ed estese simulazioni numeriche sono state eseguite per valutarne la potenzialità ricentrante [17][18]. In questa direzione, è stata eseguita una campagna sperimentale presso il Laboratorio STRENGTH dell'Università degli Studi di Salerno, consistente in prove pseudo-dinamiche su un campione di prova a larga scala composto da una campata e due piani, dotata dei collegamenti FREEDAM trave-colonna e di nodi di base ricentranti e a basso danneggiamento. Il presente lavoro illustra il lavoro preparatorio per la progettazione del provino, del setup di prova, della selezione degli accelerogrammi, della procedura sperimentale insieme a qualche risultato preliminare. I risultati mostrano l'efficacia di tale collegamento nel ridurre gli spostamenti residui, il danneggiamento locale e nel conferire una migliore capacità di ricentraggio all'intero edificio.

## 2 STRUTTURA TESTATA

Il provino (Fig. 1) è una struttura in acciaio a una campata e due piani, dove due MRFs sono concepiti per resistere alle azioni sismiche e due controventi trasversali sono progettati per prevenire effetti torsionali indesiderati. La struttura ha un'altezza di interpiano di 2.40 m, mentre le due campate hanno lunghezza pari a 4 m e 2 m. Questa struttura è una rappresentazione su larga scala di una struttura prototipo di riferimento. Il progetto è eseguito secondo l'Eurocodice 8 [1]. Le masse sono state valutate considerando che l'area di influenza di ogni telaio della struttura di riferimento corrisponde a 1/4 della massa totale di piano. Per la definizione dello Stato Limite Ultimo viene considerato lo spettro di risposta elastica di Tipo 1 con accelerazione di picco al suolo (*i.e.*, PGA) pari a 0.35g e suolo di tipo B. Il fattore di comportamento è assunto pari a  $q = 6$  in accordo con i requisiti dell'Eurocodice 8 [1] per MRFs in classe di duttilità alta. Il limite di drift di interpiano per i requisiti di Stato Limite di Danno è assunto pari all'1% [1]. I profili selezionati sono IPE 270 per le travi e HE 200B per le colonne e si utilizza un acciaio di tipo S275JR per le travi e di tipo S355JR per le colonne. Ulteriori informazioni sul progetto della struttura e sulle proprietà dei materiali sono contenute in [19][20].



**Fig. 1.** Foto della struttura in larga scala testata

### 3 PROGETTO DEI COLLEGAMENTI

Il collegamento trave-colonna FREEDAM, già testato in Di Benedetto et al. [20] e mostrato in Fig. 2 (a) è utilizzato nel presente studio. Tale collegamento si basa sull'uso di dissipatori ad attrito rimovibili [399], costituiti da un ringrosso bullonato alla flangia della trave inferiore e da elementi a L bullonati al ringrosso ed alla flangia della colonna. I dissipatori ad attrito sono realizzati con piatti in acciaio rivestiti con materiale spruzzato termicamente e sono collegati all'elemento ad L con bulloni precaricati ad alta resistenza (HV Classe 10.9). La flangia della trave superiore è collegata alla flangia della colonna con un elemento a T bullonato, dove è localizzato il Centro di Rotazione. Il comportamento ciclico di questi dispositivi è caratterizzato da un modello isteretico rigido-plastico, che dipende dalla forza di serraggio e dal coefficiente di attrito  $\mu$ . Ulteriori informazioni sui criteri di progetto per questa tipologia di giunto sono fornite in [10]-[11].

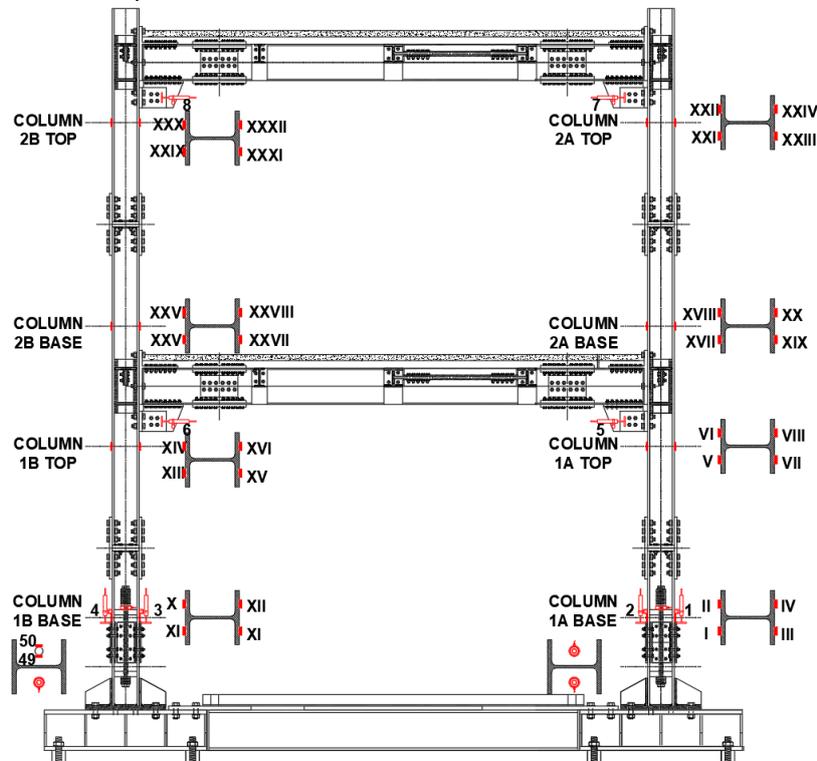
La connessione alla base della colonna considerata in questo lavoro è il giunto di base ricentrante e a basso danneggiamento mostrato in Fig. 2 (b). I dispositivi ad attrito simmetrici vengono realizzati con piastre e bulloni ad alta resistenza precaricati (HV Classe 10.9), sia sull'anima che sulle flange, garantendo la dissipazione dell'energia grazie allo scorrimento relativo delle superfici a contatto. Il sistema costituito da barre post-tese ad alta resistenza e 'disk springs' garantisce il comportamento ricentrante attraverso l'introduzione di forze di ripristino nel giunto e controlla il comportamento 'rocking'. Il progetto del giunto si basa su una procedura Step-by-Step basata su semplici relazioni analitiche. Il comportamento momento-rotazione è funzione della risposta di ciascun componente ed è rappresentato da un legame a bandiera. Ulteriori informazioni sui criteri e la metodologia di progetto sono fornite in [16]-[18]. Obiettivo della campagna sperimentale è mostrare i benefici derivanti dall'adozione di entrambe le tipologie di connessione innovative valutandone l'influenza sulla performance strutturale complessiva.



**Fig. 2.** Collegamenti dell'edificio testato: (a) Collegamento FREEDAM trave-colonna; (b) Giunto di base ricentrante e a basso danneggiamento

#### 4 SET-UP SPERIMENTALE, STRUMENTAZIONE E PROCEDURA

La campagna sperimentale è stata condotta presso il laboratorio STRENGTH dell'Università degli Studi di Salerno. Lo schema della strumentazione è illustrato in **Fig. 3**. Sono stati impiegati trasduttori e sensori a filo per misurare gli spostamenti orizzontali e per controllare le traslazioni dei solai nelle due direzioni principali verificando anche le possibili rotazioni dell'impalcato. La risposta locale dei giunti trave-colonna è stata monitorata mediante trasduttori potenziometrici per valutare le rotazioni, mentre gli estensimetri sono stati applicati alle sezioni superiore e inferiore della colonna per calcolare i momenti flettenti alle estremità delle colonne. In questo modo i momenti flettenti a livello di connessione sono definiti utilizzando l'equilibrio nodale. Inoltre, la risposta locale delle connessioni di base è stata monitorata utilizzando trasduttori potenziometrici per misurare gli spostamenti verticali su entrambi i lati della colonna, mentre le celle di carico sono state installate per monitorare le forze nel sistema ricentrante.



**Fig. 3.** Schema della strumentazione di prova di un telaio

La procedura di prova pseudo-dinamica [21] è stata utilizzata per simulare la risposta sismica dell'edificio testato, in modo coerente ad altre campagne sperimentali condotte sulla stessa struttura [19][20]. Gli input sismici sono stati scelti all'interno di una serie accelerogrammi spettrocompatibili con lo spettro di progetto dell'Eurocodice 8 [1]. Sei prove sono state eseguite all'interno della campagna sperimentale, adottando la sequenza di accelerogrammi mostrata in Fig. 4. E' interessante sottolineare che un numero di punti ad accelerazione nulla sono stati aggiunti alla

fine di ogni record per consentire alle vibrazioni libere di arrestarsi e catturare correttamente le deformazioni residue. I test pseudodinamici sono stati effettuati adottando PGA amplificate, come riportato in Fig. 4.

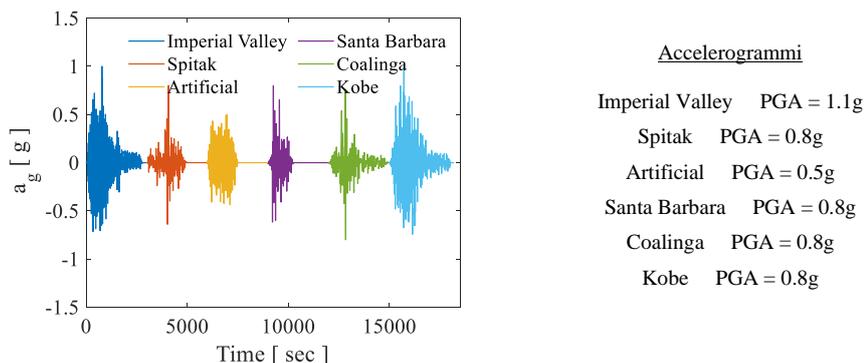


Fig. 4. Sequenza di accelerogrammi adottata per i test

## 5 RISULTATI SPERIMENTALI

Fig. 5 mostra i risultati globali del Test n. 1 (Imperial Valley) in termini di spostamenti di piano e forze degli attuatori. Gli spostamenti al primo e al secondo piano raggiungono valori di picco uguali a 79.30 e 153.70 mm, rispettivamente, e il tagliante alla base massimo è uguale a 475 kN. È possibile osservare che gli spostamenti di picco di piano e le forze di picco registrate dagli attuatori si sono verificate negli stessi istanti. Inoltre, gli spostamenti residui di interpiano osservati sono rispettivamente 7.28 e 20.41 mm per il primo ed il secondo piano. Infatti, per entrambi i piani, la struttura presenta valori di drift di interpiano residui inferiori al limite dello 0.5%, considerata la soglia oltre la quale la riparazione dell'edificio potrebbe non essere economicamente sostenibile [22]. Inoltre, si sottolinea che per la stessa struttura dotata di soli nodi FREEDAM e con nodi di base tradizionali [20] i drift di interpiano residui avevano assunto valori pari a 0.63% e 0.58%, rispettivamente per il primo e secondo piano.

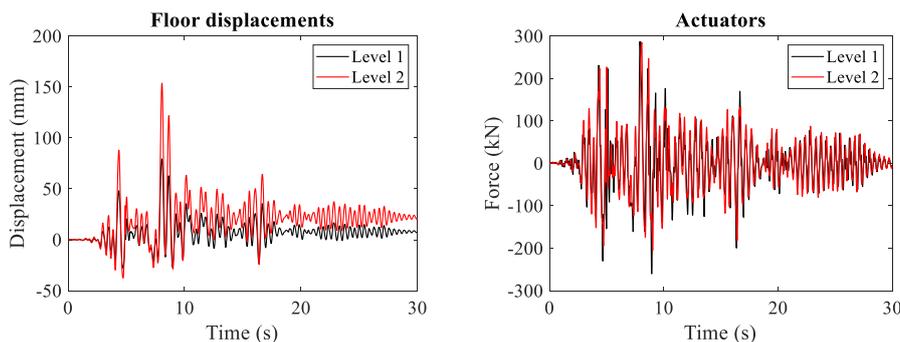
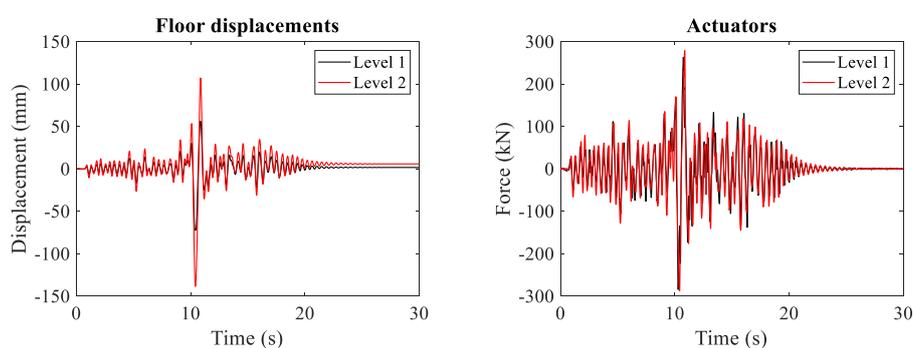


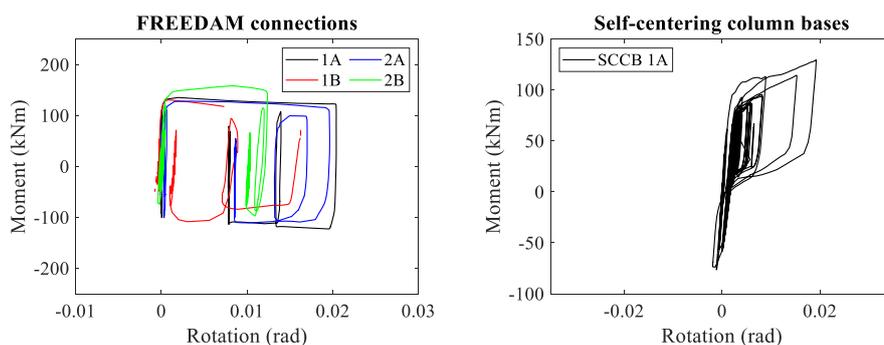
Fig. 5. Risultati globali del Test n.1 (Imperial Valley)

In Fig. 6 sono mostrati gli stessi parametri ottenuti dal Test n. 2 (Spitak). Gli spostamenti al primo e al secondo piano raggiungono valori di picco uguali a 72.42 e 138.59 mm, rispettivamente, e il tagliante alla base massimo è uguale a 482 kN. Gli spostamenti residui di interpiano osservati sono rispettivamente 1.21 e 5.73 mm per il primo ed il secondo piano. Tali spostamenti corrispondono a drift di interpiano pari a 0.05% e 0.17%. Tali valori risultano inferiori sia alla soglia di riparabilità, sia limite dello 0.2%, che assicura che nessun riallineamento strutturale è necessario [23]. Al contrario, nella struttura dotata dei soli nodi FREEDAM, i drift di interpiano residui avevano assunto valori pari a 0.96% e 0.57% al primo e secondo piano. E' interessante notare che, nonostante il sistema ricentrante sia presente solo al primo piano, esso consente una riduzione degli spostamenti residui sull'intera struttura.



**Fig. 6.** Risultati globali del Test n.2 (Spitak)

Inoltre, per gli stessi test (*i.e.*, Imperial Valley e Spitak) in Fig. 7 e Fig. 8 sono mostrate le risposte locali dei giunti FREEDAM e dei nodi di base ricentranti, in termini di legame momento-rotazione. Da questa figura, è possibile osservare che, come atteso, le curve isteretiche assumono comportamenti stabili e ampiamente dissipative. Infine, per quanto concerne il comportamento momento-rotazione della connessione di base, esso mostra il legame a bandiera, come atteso, con una soglia di scorrimento pari a circa 100 kNm.



**Fig. 7.** Risultati locali del Test n.1 (Imperial Valley)

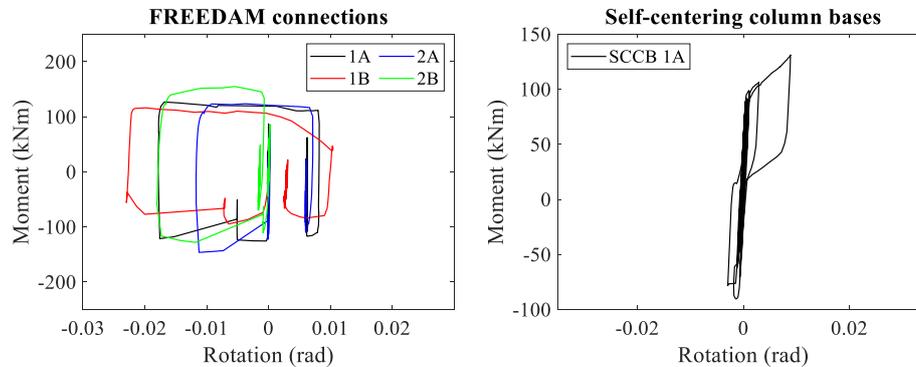


Fig. 8. Risultati locali del Test n.2 (Spitak)

## 6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha l'obiettivo di valutare la risposta sismica globale di edifici dotato di giunti auto-centranti. A tal fine, è stata eseguita una campagna sperimentale presso il Laboratorio STRENGTH dell'Università degli Studi di Salerno, consistente in prove pseudo-dinamiche su una struttura in larga scala, dotata di collegamenti FREEDAM trave-colonna, e di nodi di base ricentranti e a basso danneggiamento. Obiettivo della campagna sperimentale è mostrare i benefici derivanti dall'adozione di entrambe le tipologie di connessione innovative valutandone l'influenza sulla performance strutturale complessiva. Il presente lavoro illustra il lavoro preparatorio per la progettazione del provino, del setup di prova, della selezione degli accelerogrammi e della procedura sperimentale. I risultati sperimentali hanno dimostrato l'efficacia di tale collegamento nel ridurre gli spostamenti residui, il danneggiamento locale e nel conferire una migliore capacità di ricentraggio all'intero edificio.

## REFERENCES

- [1] CEN, EN 1998-3, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. CEN, European Committee for Standardization, 2005.
- [2] Mazzolani, F.M., Piluso, V., Plastic Design of Seismic resistant Steel Frames. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*; 26, 167-191, 1997
- [3] McCormick, J., Aburano, H., Nakashima, M, Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements, 14th World Conf. Earthq. Eng. 12-17 Oct 2008, Beijing, China
- [4] Freddi, F., Novelli, V., Gentile, R., Velu, E., Andonov, A., Andreev, S., Greco, F., Zhuleku, E., Observations from the 26th November 2019 Albania Earthquake: the Earthquake Engineering Field Investigation Team mission. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2013-2044, 2021
- [5] Freddi, F, Galasso, C., Cremen, G., Dall'Asta, A., Di Sarno, L., Giaralis, A., Gutiérrez-Urzúa, L.F., Málaga-Chuquitaype C., Mitoulis, S., Petrone, Sextos, C.A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J., Woo, G., Innovations in Earthquake Risk Reduction for Resilience: Recent Advances and Challenges, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102267, 2021

- [6] Butterworth, J. W., Clifton, G. C., Performance of Hierarchical Friction Dissipating Joints in Moment Resisting Steel Frame. 12th World Conference on Earthquake Engineering, 718
- [7] FREEDAM: FREE from DAMAge steel connections, 2015-2018, Final report, Fund for Coal and Steel Grant Agreement No. RFSR-CT-2015-00022.
- [8] 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 Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 66-81, 2018
- [9] Piluso, V., 2018. Smart Connections for Seismic-Resistant Frames: a Brief Overview. *Costruzioni Metalliche*, Vol. 3 (May-June).
- [10] Francavilla, A., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Design criteria for beam-to-column connections equipped with friction devices, *Journal of Constructional Steel Research*, no. 172, 106240, 2020
- [11] Tartaglia, R., D'Aniello, M., Campiche, A., Latour, M., Symmetric friction dampers in beam-to-column joints for low-damage steel MRFs, *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106791, 2021
- [12] Ricles, J., Sause, R., Garlock, M., Zhao, C.: PT Seismic-Resistant Connections for Steel Frames, *J. Struct. Eng.* 127(2), 113–121 (2001).
- [13] H. Mackinven, G.A. MacRae, S. Pampanin, G.C. Clifton, J. Butterworth. Generation four steel moment frame joints. 8th Pacific Conf. on Earthq. Eng. 2007, Singapore.
- [14] F Freddi, C.A. Dimopoulos, T.L. Karavasilis. Rocking damage-free steel CB with Friction Devices: design procedure and numerical evaluation, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 46, 2281–2300 (2017).
- [15] F Freddi, C.A. Dimopoulos, T.L. Karavasilis. Experimental evaluation of a rocking damage-free steel CB with friction devices, *J. Struct. Eng.* 146(10) (2020).
- [16] Latour, M., Rizzano, G., Santiago, A., Da Silva, L.: Experimental response of a low-yielding, self-centering, rocking CB joint with friction dampers, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 116, 580–592, 2019
- [17] Elettore, E., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G., Design and analysis of a seismic resilient steel moment resisting frame equipped with damage free self-centring column bases, *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106543, 2021
- [18] Elettore, E., Lettieri, A., Freddi, F., Latour, M., Rizzano, G., Performance-based assessment of seismic-resilient steel moment resisting frames equipped with innovative CB connections. *Structures*, 32, 1646-1664, 2021
- [19] Di Benedetto, S., Francavilla, A. B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Pseudo-dynamic testing of a full-scale two-storey steel building with RBS connections. *Engineering Structures*, 212, 107022, 2020
- [20] Di Benedetto, S., Francavilla, A. B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Experimental response of a large-scale two-storey steel building equipped with low-yielding friction joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107022, 2021
- [21] Mahin S. A.; Shing P. B., Pseudo-dynamic method for seismic testing, *Journal of Structural Engineering*, 111, 1482-1503, 1985.
- [22] McCormick, J., Aburano, H., Nakashima, M, Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements, 14th World Conf. Earthq. Eng. 12-17 Oct 2008, Beijing, China
- [23] FEMA P58-1, 2012. Seismic performance assessment of buildings. Volume 1-Methodology. Applied Technology Council, Redwood City, CA.

**KEYWORDS**

Test pseudo-dinamici; Telai simo-resistenti in acciaio; Ricentraggio; Collegamenti di base a basso danneggiamento e ricentranti; Spostamenti residui