

**PARAMETRIC STUDY AND FINITE ELEMENT MODELLING
OF DAMAGE-FREE SELF-CENTRING COLUMN BASES WITH
DIFFERENT STRUCTURAL PROPERTIES**

**STUDIO PARAMETRICO E MODELLAZIONE AGLI ELEMEN-
TI FINITI DI NODI DI BASE IN ACCIAIO RICENTRANTI
DOTATI DI DIFFERENTI PROPRIETA' STRUTTURALI**

Elena Elettore
Massimo Latour
Gianvittorio Rizzano
University of Salerno
Dept. of Civil Engineering
Fisciano, Italy
eelettore@unisa.it
mlatour@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 recent years there have been significant advancements in the definitions of innovative seismic-resilient structural systems, chasing the urgent needs of reducing the repair costs and downtime in the aftermath of severe earthquake events. In this regard, Self-centring Column Bases (CBs) represent a promising solution to improve the seismic performance of steel Moment Resisting Frames (MRFs) for both damage and residual drifts reductions. However, although several technologies have been conceived, studied, and experimentally tested in this direction, only a few research studies investigated the significant properties of the connections influencing the behaviour of these systems. Focusing on the steel damage-free Self-Centring Column Base (SC-CB) previously investigated by the authors, the present study performs a parametric Finite Element (FE) analysis to evaluate the influence of some design parameters over the global and local response of these joints, considering the objectives of obtaining a self-centring behaviour, as well as minimizing the yielding of the joint components. With this scope, an advanced FE model is developed in ABAQUS and validated against experimental results. FE models of three SC-CBs belonging to different case-study MRFs are developed considering sixteen configurations for each case characterised by different design parameters and structural properties. The parametric analysis provides a more comprehensive view of the assumptions and limitations of the design methodology and suggests additional recommendations to improve the design requirements of the SC-CB connections.

SOMMARIO

Negli ultimi anni la ricerca scientifica ha avanzato progressi significativi nello sviluppo di sistemi strutturali innovativi, allo scopo di ottenere un comportamento resiliente nei confronti delle azioni sismiche, inseguendo l'urgente necessità di ridurre i costi ed i tempi di riparazione in seguito ad eventi sismici severi. A tal proposito, i nodi di base autocentranti sono emersi come una soluzione efficace per migliorare le prestazioni sismiche dei telai sismo-resistenti in acciaio, riducendo il danneggiamento locale e conferendo una migliore capacità di ricentraggio all'intero edificio. Tuttavia, sebbene numerose tecnologie siano state concepite, studiate e testate sperimentalmente, solo pochi studi di ricerca hanno indagato le proprietà significative delle connessioni che influenzano il comportamento di tali sistemi. A tal fine, focalizzando l'attenzione su un giunto di base autocentrante precedentemente proposto, studiato e testato dagli autori, il presente studio ha l'obiettivo di eseguire un'analisi parametrica agli elementi finiti per valutare l'influenza di alcuni parametri di progetto sulla risposta globale e locale di tali giunti, tenendo conto degli obiettivi di ottenere un comportamento autocentrante, nonché di ridurre al minimo il danneggiamento delle singole componenti del giunto. A tale scopo, è stato sviluppato un modello agli elementi in ABAQUS e validato rispetto ai risultati sperimentali. Successivamente, tre modelli agli elementi finiti di giunti appartenenti a diversi casi-studio sono progettati e modellati considerando sedici configurazioni per ogni caso, ciascuna caratterizzata da parametri di progetto e proprietà strutturali differenti. L'analisi parametrica fornisce una visione più ampia e completa sulle assunzioni e sui limiti della metodologia di progetto e suggerisce ulteriori raccomandazioni per migliorare i requisiti di progetto di tali giunti.

1 INTRODUZIONE

L'attuale filosofia di progettazione sismica, inclusa nelle normative moderne (e.g., [1]), prevede l'elevato danneggiamento di alcune componenti, caratterizzate da elevata duttilità e capacità dissipative. Nei telai sismo-resistenti in acciaio (*i.e.*, Moment Resisting Frames MRFs), l'approccio tradizionale consiste nell'adottare colonne sovra-rinforzate e travi deboli, con connessioni a completo ripristino di resistenza, favorendo la concentrazione del danno alle estremità delle travi [2]. Inoltre, le colonne di base sono convenzionalmente progettate come giunti a completo ripristino di resistenza, comportando tipicamente lo sviluppo di cerniere plastiche nell'estremità inferiore delle colonne del primo piano. Questo approccio, se da un lato consente di raggiungere i requisiti di sicurezza inclusi nei codici sismici, dall'altro, ha l'inconveniente di causare notevoli danni strutturali e spostamenti residui dopo eventi sismici di elevata intensità, causando grandi perdite economiche (e.g., [3]). 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., [4][5][6][7]) rispondendo alle crescenti aspettative per una società 'sismo-resiliente'.

In tale contesto, diversi studi di ricerca hanno dimostrato che i nodi di base rappresentano componenti fondamentali della struttura (e.g., [8][9]), 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 (e.g., [10]-[15]).

Sebbene diverse tecnologie siano state concepite, studiate e testate sperimentalmente, solo pochi studi di ricerca hanno studiato le proprietà significative delle connessioni di base che influenzano la capacità ricentrante di questi sistemi (e.g., [16]). A tal scopo, in questo lavoro, l'attenzione è stata focalizzata su una connessione di base a basso danneggiamento e ricentrante (*i.e.*, SC-CB) recentemente testata [15] e studiata dagli autori [17][18]. Il presente studio esegue un'analisi pa-

parametrica per valutare l'influenza di alcuni parametri di progetto sulla risposta globale e locale di tali giunti, tenendo conto degli obiettivi di ottenere un comportamento autocentrante, nonché di ridurre al minimo il danneggiamento delle singole componenti del giunto. A tale scopo, è stato sviluppato un modello agli elementi in ABAQUS [19] e validato rispetto ai risultati sperimentali. Successivamente, è stata sviluppata un'analisi parametrica in ABAQUS [19] su tre modelli di giunti appartenenti a diversi casi-studio. Tali collegamenti sono progettati e modellati considerando sedici configurazioni per ogni caso, ciascuna caratterizzata da parametri di progetto e proprietà strutturali differenti. L'analisi agli elementi finiti conferma l'efficacia della metodologia di progettazione teorica e fornisce ulteriori approfondimenti per migliorare i requisiti di progettazione.

2 PROGETTO DEI CASI STUDIO E DEI COLLEGAMENTI DI BASE

Le viste in pianta ed in elevazione dei telai sismo-resistenti identificati come casi-studio sono mostrate in **Fig. 1**. Questi telai sono estratti da strutture prototipo dotate di telai sismo-resistenti perimetrali, mentre la parte interna è di tipo pendolare. Il progetto è eseguito in conformità con le disposizioni dell'Eurocodice 8 [1]. Per la definizione dello Stato Limite Ultimo viene considerato lo spettro di risposta elastica di Tipo 1 con accelerazione di picco al suolo pari a 0.35g e suolo di tipo C. Il fattore di comportamento è assunto pari a $q = 6.5$ in accordo con i requisiti dell'Eurocodice 8 [1]. Il limite di drift di interpiano per i requisiti di Stato Limite di Danno è assunto pari all'1% [1]. Le indicazioni riguardanti le colonne del primo piano sono riportati in **Tabella 1**. Ulteriori informazioni sulla metodologia di progetto sono contenute in [17][18].

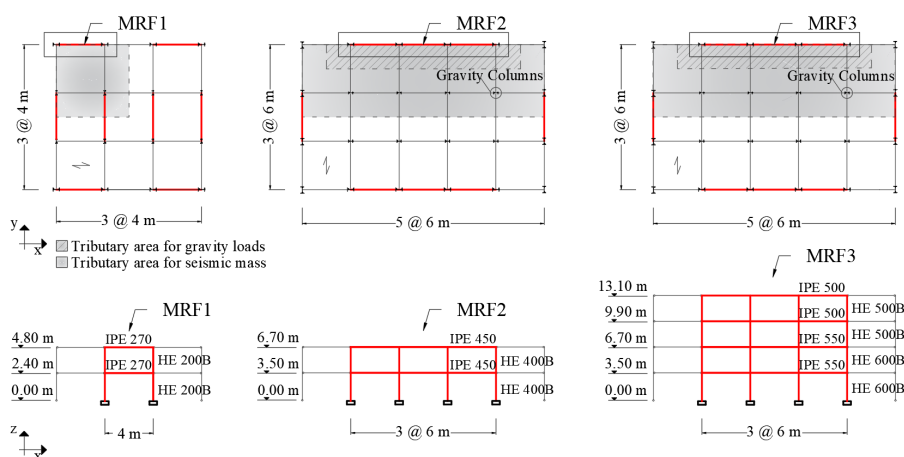


Fig. 1. Pianta e prospetto degli edifici studiati

Tabella 1. Sezioni dei profili delle colonne del piano terra

Telaio	Profili	Materiali
1 campata – 2 piani	HE 200B	Acciaio S355
3 campate – 2 piani	HE 400B	Acciaio S355
3 campate – 4 piani	HE 600B	Acciaio S355

La connessione alla base considerata in questo lavoro (**Fig. 2**) è basata sulla combinazione di dispositivi dissipativi ad attrito realizzati con piastre e bulloni ad alta resistenza precaricati, sia sull'anima che sulle flange, ed un sistema ricentrante costituito da barre post-tese ad alta resistenza e 'disk springs'. 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 circa le assunzioni e la metodologia di progetto sono contenute in [15][17][18]. Le proprietà dei materiali per i giunti di base relativi ai casi studio sono riassunte in **Tabella 2**.

Tabella 2. Proprietà dei materiali per le connessioni di base ricentranti

Elemento	MRF1	MRF2	MRF3
Colonna	HE 200B (SC-CB1)	HE 400B (SC-CB2)	HE 600B (SC-CB3)
Bulloni d'anima	4 HV M14 (10.9)	4 HV M27 (10.9)	4 HV M30 (10.9)
Bulloni di flangia	4 HV M14 (10.9)	6 HV M27 (10.9)	6 HV M30 (10.9)
Barre	2 M30 (10.9)	4 M36 (10.9)	6 M36 (10.9)

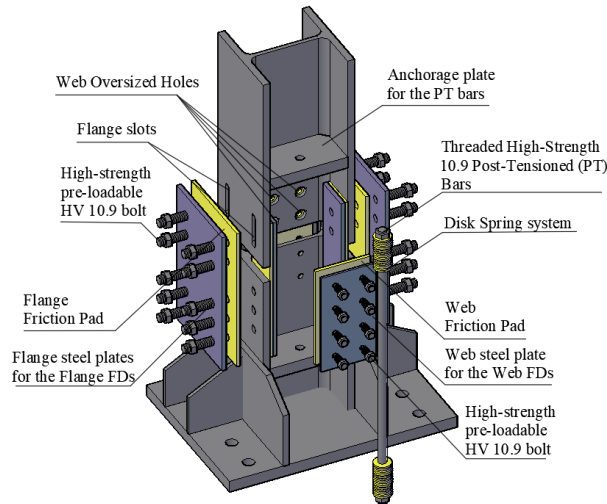


Fig. 2. Connessione di base studiata

3 VALIDAZIONE DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

Un modello avanzato agli elementi finiti è sviluppato in ABAQUS [19] per simulare il comportamento isteretico del giunto di base ricentrante. Una panoramica del modello agli elementi finiti, delle condizioni al contorno e della mesh è mostrata in **Fig. 1**. L'origine riferimento non è stata trovata. **(a)**, mentre le proprietà dei materiali sono riportate in **Tabella 1** e **Tabella 2**. Il carico laterale è simulato da uno spostamento orizzontale controllato utilizzando condizioni al contorno di tipo '*displacement*' e la forza assiale è simulata da una pressione uniforme applicata sulla superficie superiore della sezione trasversale della colonna. Per modellare la forza di precarico iniziale nei bulloni dei dispositivi di anima e flangia, viene utilizzata l'opzione '*bolt force*' mantenendo la forza costante durante l'analisi. Al contrario, la forza di post-tensione iniziale nelle barre PT è modellata con l'opzione '*adjust length*' per consentire di catturare la variazione di forza nelle barre PT a seguito delle deformazioni. L'interazione di contatto '*surface-to-surface*' viene utilizzato

per modellare le proprietà di interazione tra le parti. Coefficienti di attrito pari a 0,30 e 0,53 sono utilizzati rispettivamente per le interfacce tra parti in acciaio (*i.e.*, piastre, colonne, bulloni e barre PT) e per le interfacce spessori-acciaio dei dispositivi ad attrito. Il vincolo 'TIE' viene utilizzato per simulare la saldatura tra le piastre di ancoraggio delle barre PT e la parte interna della colonna.

La strategia di modellazione viene validata confrontando il modello in ABAQUS [19] con i risultati sperimentali [15]. I risultati delle analisi vengono inoltre confrontati e utilizzati per valutare l'efficacia delle equazioni analitiche e della procedura di progetto. La campagna sperimentale ha incluso diversi test ciclici quasi statici sul giunto di base proposto, in scala reale. La connessione era costituita da un profilo HE 240B in acciaio classe S275, piastre in acciaio S275 fissate con bulloni classe M20 HV 10.9 sia sull'anima che sulle flange e due barre filettate M20 con disk springs composte da tre dischi in parallelo e sette in serie. I risultati del processo di validazione sono mostrati in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. (b). La strategia di modellazione adottata non tiene conto della variazione della perdita di precarico dei bulloni durante la prova sperimentale.

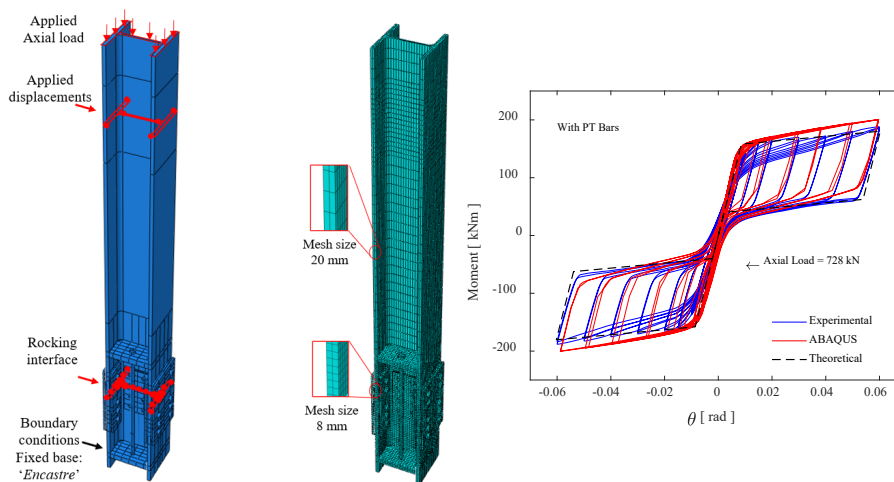


Fig. 3. (a) Modello agli elementi finiti in ABAQUS della connessione [19]; (b) Validazione dei risultati sperimentali e delle formulazioni analitiche

5 ANALISI PARAMETRICA AGLI ELEMENTI FINITI

L'analisi parametrica viene effettuata su tre modelli agli elementi finiti realizzati in ABAQUS [19] mostrati in **Fig. 4**. L'obiettivo è valutare l'influenza della variazione delle seguenti tre proprietà progettuali: 1) Lo spessore delle piastre delle flange; 2) La percentuale del carico di taglio di progetto affidata ai dispositivi ad attrito d'anima; 3) Il carico assiale di progetto: la forza assiale di compressione massima e minima è considerata come due valori limite per ciascuna configurazione. Questi parametri sono stati variati fino ad ottenere 16 configurazioni per ogni caso-studio, come indicato in **Tabella 3**.

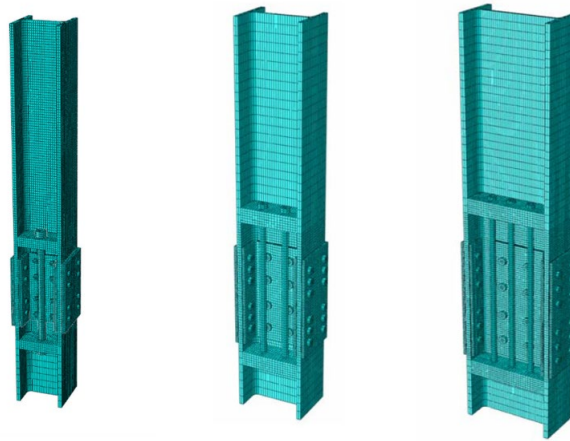


Fig. 4. Modelli agli elementi finiti [19] dei tre collegamenti ricentranti oggetto di studio

Tabella 3. Parametri della matrice per ciascuna configurazione dei collegamenti

Modello	Spessore dei piatti di flangia	Percentuale di taglio affidata ai dispositivi d'anima	Forza assiale
Configurazione 1	t_1	100 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 2	$2t_1$	100 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 3	t_1	50 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 4	t_1	75 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 5	t_1	0 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 6	$2t_1$	50 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 7	$2t_1$	75 %	Max (+)-Min (-)
Configurazione 8	$2t_1$	0 %	Max (+)-Min (-)

I risultati dell'analisi parametrica sono stati valutati in termini di risposta globale e locale. Per brevità, in questo lavoro, vengono presentati solo i risultati locali del CB con la sezione HE 200B (*i.e.*, SC-CB1) in termini di distribuzione della deformazione plastica equivalente (PEEQ). I risultati mostrano che il comportamento momento-rotazione dei giunti non è significativamente influenzato dai primi due parametri (cioè, lo spessore delle piastre delle flange e la percentuale del carico di taglio di progetto), come previsto. Diversamente, il comportamento globale è influenzato dalla forza assiale di progetto.

Per quanto riguarda il comportamento locale, la **Fig. 5** (a) e (b) mostra le distribuzioni delle PEEQ (*i.e.*, deformazioni plastiche equivalenti) al termine dell'analisi ciclica per SC-CB1 nelle Configurazioni 1 e 2 e considerando la forza assiale di compressione massima. Queste due configurazioni sono caratterizzate da uno spessore delle piastre delle flange rispettivamente di 8 mm e 16 mm. Come si può osservare in **Fig. 5**, l'aumento dello spessore delle piastre delle flange comporta un incremento del danno plastico. Infatti, l'estensione del danno è maggiore nella Configurazione 2 e ciò è confermato osservando la quantità di energia plastica dissipata (non mostrata in questo lavoro per motivi di spazio).

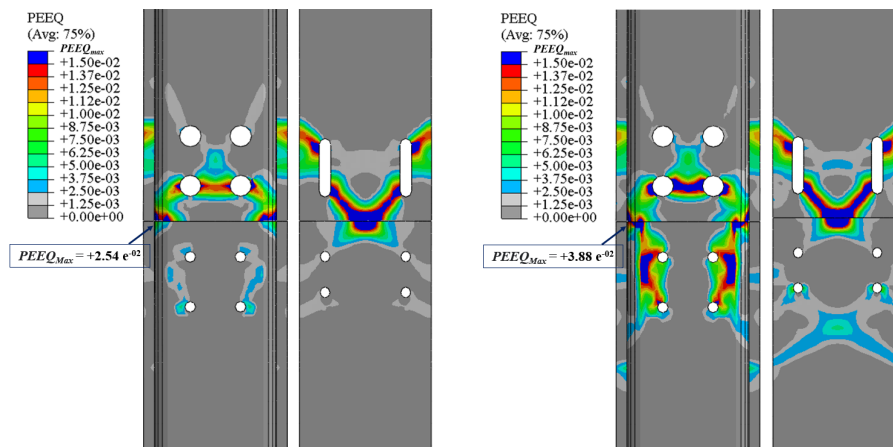


Fig. 5. Distribuzioni delle PEEQ al termine dell'analisi ciclica dell'SC-CB 1 – Spessore piastra flangia: (a) 8 mm; (b) 16 mm.

La **Fig. 6** (a) e (b) mostra le PEEQ alla fine dell'analisi ciclica per l'SC-CB1 nelle configurazioni 1 e 3 e considerando la forza assiale di compressione massima. Il parametro che è stato variato in queste due configurazioni è la percentuale di carico di taglio di progetto affidata ai dispositivi di anima (cioè, 100% e 50%). Vale la pena evidenziare che questo parametro è stato studiato per valutare come questa scelta progettuale influisca sulla redistribuzione del taglio tra le diverse componenti. I risultati dimostrano che affidare ai dispositivi d'anima il 50% del taglio di progetto porta a una riduzione del danneggiamento sulla colonna, come osservato in **Fig. 6** (b).

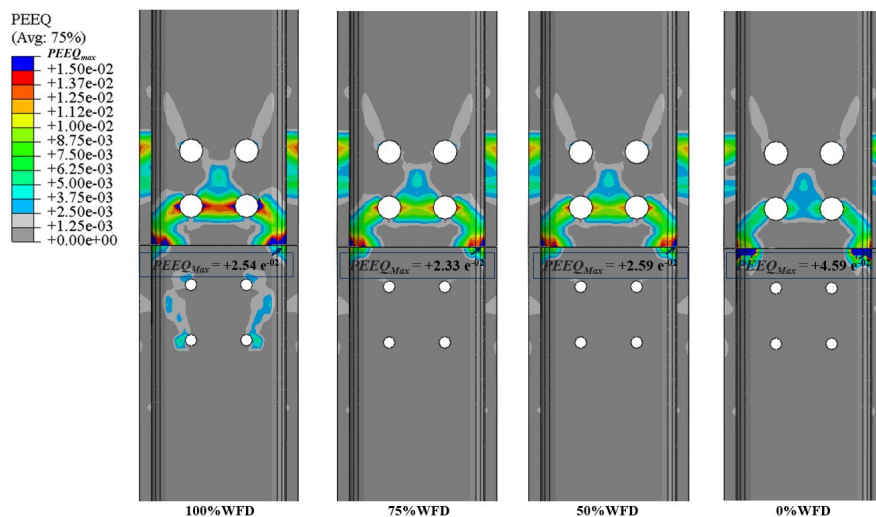


Fig. 6. Distribuzioni delle deformazioni plastiche equivalenti PEEQ al termine dell'analisi ciclica dell'SC-CB 1 – Distribuzione del taglio affidato ai Web FDs

6 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti suggeriscono che: 1) Il modello FE della connessione di base a basso danneggiamento e ricentrante predice correttamente la risposta isteretica complessiva osservata durante la prova sperimentale; 2) Le analisi parametriche FE mostrano che il comportamento momento-rotazione della connessione non è influenzato dai parametri di progetto considerati mentre il comportamento locale è significativamente influenzato. In particolare, l'utilizzo di piastre flangiate più sottili rappresenta un vantaggio in termini di riduzione del danneggiamento locale sulla colonna. Inoltre, affidare ai dispositivi d'anima una percentuale minore (*i.e.*, 75%, 50% o 0%) del taglio di progetto rappresenta una soluzione di progetto efficiente nel ridurre le concentrazioni di deformazione sulla colonna.

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] 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
- [4] MacRae, G., Clifton, G.C.: Low Damage Design of Steel Structures, Steel Innovations 2013 Workshop, Christchurch, 21-22 Feb. 2013, New Zealand.
- [5] 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, 520–548 (2014)
- [6] 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
- [7] C. Fang, W. Wang, C. Qiu, S. Hu, G.A. MacRae, M.R. Eatherton, Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *J. Constr. Steel Res.* 191 (2022) 107172.
- [8] Zareian, F., Kanvinde, A.M.: Effect of column-base flexibility on the seismic response and safety of steel moment-resisting frames, *Earthquake Spectra* 29, 1537–1559 (2013)
- [9] Inamasu, H., Lignos, D.G., Kanvinde, A.M.: Effect of column base flexibility on the hysteretic response of wide flange steel columns, 3rd Huixian Int. Forum Earthq. Eng. Young Res. August 11–12, 2017
- [10] Mackinven, H., MacRae G.A., Pampanin, S., Clifton, G.C., Butterworth, J.: Generation four steel moment frame joints. 8th Pacific Conf. on Earthq. Eng. 2007, Singapore.
- [11] Chi, H., Liu., J: Seismic behaviour of PT CB for steel self-centring MRFs, *J. Constr. Steel Res.* 78, 117–130 (2012).
- [12] Borzouie J., MacRae, G.A., Chase, J.G., Rodgers, G.W., Clifton, G.C.: Experimental studies on cyclic performance of CB strong axis – aligned asymmetric friction connections, *J. Struct. Eng. (ASCE)*, 142(1) 1–10 (2016)
- [13] Freddi, F., Dimopoulos, C.A., Karavasilis, T.L.: Rocking damage-free steel CB with Friction Devices: design procedure and numerical evaluation, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 46, 2281–2300 (2017).

- [14] Freddi, F., Dimopoulos, C.A., Karavasilis, T.L.: Experimental evaluation of a rocking damage-free steel CB with friction devices, *J. Struct. Eng.*, 146(10) (2020).
- [15] 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
- [16] Kamperidis, V., Karavasilis, T.L., Vasdravellis, G.: Self-centering steel CB with metallic energy dissipation devices, *J. Constr. Steel Res.* 149, 14–30 (2018)
- [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] ABAQUS/Standard and ABAQUS/Explicit – Version 2017. ABAQUS Theory Manual, Dassault Systems, 2016. <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm>
- [20] FEMA P58-1, 2012. Seismic performance assessment of buildings. Volume 1-Methodology. Applied Technology Council, Redwood City, CA.

KEYWORDS

Telai in acciaio sismo-resistenti, Nodi di Base ricentranti, Resilienza Strutturale, Analisi parametrica agli elementi finiti.