

**STUDIO PRELIMINARE SUL COMPORTAMENTO CICLICO DI
CONNESSIONI SALDATE TRA PROFILI CIRCOLARI CAVI E
PIATTI PASSANTI**

**PRELIMINARY STUDY ON THE CYCLIC RESPONSE OF
WELDED JOINTS WITH CHS PROFILES AND THROUGH-ALL
PLATES**

Roberto Sica, Sabatino Di Benedetto, Antonella Bianca Francavilla, Massimo Latour,
Gianvittorio Rizzano
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Via Giovanni Paolo II, Fisciano, Italy
r.sica28@studenti.unisa.it, sdibenedetto@unisa.it, afrancavilla@unisa.it, mla-
tour@unisa.it, g.rizzano@unisa.it

ABSTRACT

The use of circular hollow section (CHS) members as columns of moment-resisting frames is a very interesting solution thanks to several benefits they can provide: (i) high values of the radius of gyration; (ii) absence of a weak axis, which characterizes, instead, the double-tee profiles; (iii) reduction of the paintings, fire and corrosion protection costs thanks to the low surface area, compared to the double-tee profiles; (iv) lower drag coefficients affecting wind forces; (v) higher aesthetical aspect.

However, especially in Europe and the USA, the use of CHS columns is limited by the complexity related to the realization of beam-to-column connections. Nevertheless, the recent use in civil engineering of the Laser Cutting Technology (LCT) has offered the opportunity to manufacture welded connections by properly cutting the tubular profile with the imprint of the cross-section shape of the double-tee member. Such a solution is an improved alternative to the joint with the I-beam simply welded to the external surface of the hollow profile since higher flexural strength and stiffness can be provided.

Considering the importance of such a topic, this connection started to be studied at the University of Salerno a few years ago. In particular, the research activity is currently ongoing within the framework of the component method approach. To this aim, the nodal components have been identified

and studied thanks to experimental tests, numerical simulations, and theoretical approaches, leading to analytical design formulations.

In this view, the research activity discussed in this paper deals with studying the cyclic behaviour experienced by welded connections between CHS tubes and through-all plates. In fact, this component is intended to be representative of the actions applied on the tube by each of the beam flanges of a double-tee profile. The work has comprised the accomplishment of three cyclic tests on specimens representative of realistic geometric configurations of CHS to through-all plate joints. Subsequently, a finite element model, representative of the analyzed connections, has been developed and validated against the experimental results, and it has been exploited to perform numerical analyses of other 44 CHS to through-all plate configurations. Finally, the obtained force-displacement curves have been used to calibrate and predict, through analytical formulations, the parameters of the hysteretic uniaxial material element belonging to the OpenSees library.

SOMMARIO

L'uso di profili circolari cavi (CHS) come colonne di telai sismo-resistenti rappresenta un'interessante strategia grazie ai numerosi vantaggi che tali sezioni possono offrire: i) elevati valori dei raggi di inerzia; ii) assenza di assi deboli, presenti invece per i profili a doppio T a causa della loro marcata asimmetria; iii) minori spese per la verniciatura e l'applicazione delle protezioni da corrosione e da incendio grazie alla minor superficie rispetto alle sezioni IPE o HE; iv) minori coefficienti di pressione del vento; v) maggiore apprezzamento da un punto di vista estetico.

Soprattutto in Europa e negli USA, però, l'utilizzo di colonne tubolari è limitato dalla complessità dei collegamenti trave-colonna. Tuttavia, il recente utilizzo nel campo dell'ingegneria civile della tecnologia di taglio laser (LCT) ha permesso di realizzare connessioni opportunamente tagliando il profilo tubolare con la sezione trasversale dell'elemento a doppio T. Tale soluzione rappresenta un'evoluzione del nodo con trave semplicemente saldata alla superficie esterna del profilo cavo poiché può fornire maggiore resistenza e rigidità flessionale.

Considerata la rilevanza di questa soluzione, da alcuni anni tale collegamento è studiato presso l'Università degli Studi di Salerno. In particolare, l'attività di ricerca è ancora in svolgimento e si basa sul ricorso all'approccio del metodo delle componenti. A tal fine, le componenti nodali sono state identificate e studiate grazie a prove sperimentali, simulazioni numeriche ed approcci teorici, portando a formulazioni progettuali analitiche.

In quest'ottica, l'attività di ricerca discussa in questo lavoro riguarda lo studio del comportamento ciclico di connessioni saldate tra profili circolari cavi e piatti passanti. Tale componente, infatti, vuole essere rappresentativa delle azioni applicate sul tubo da ciascuna delle flange della trave di un profilo a doppio T. Il lavoro ha compreso la realizzazione di tre prove cicliche su campioni rappresentativi di realistiche configurazioni geometriche di giunti tubo-piatto. Successivamente, un modello agli elementi finiti, rappresentativo delle connessioni analizzate, è stato sviluppato e validato rispetto ai risultati sperimentali, ed è stato sfruttato per eseguire analisi numeriche di altre 44 configurazioni geometriche. Infine, le curve forza-spostamento ottenute sono state utilizzate per calibrare, attraverso formulazioni analitiche, i parametri dell'uniaxial material "hysteretic" appartenente alla libreria OpenSees.

1 INTRODUZIONE

Gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da un sempre maggiore utilizzo della tecnologia di taglio laser 3D (3D-TTL) in molti campi applicativi, quali l'industria meccanica ed il settore automobilistico. Purtroppo, i notevoli costi dei componenti strutturali di grandi dimensioni hanno rappresentato un fattore limitante per la sua applicazione nel campo dell'ingegneria civile. Tuttavia, questa

tecnologia è ideale nella produzione di geometrie molto complesse, come i collegamenti trave-colonna tra colonne a sezione cava circolare (CHS) e travi a doppio T.

In realtà, molti dettagli strutturali sono stati proposti per un tale tipo di connessione ([1]-[4]), ma i limiti pratici riguardanti le ridotte proprietà meccaniche [5] e le complessità legate al processo di fabbricazione ([6]-[7]) non assicurano un pieno sfruttamento di questo nodo nella pratica comune. Per questo motivo, l'adozione di collegamenti saldati caratterizzati da travi a doppia T che attraversano le colonne tubolari rappresenta una soluzione molto interessante al fine di esaltare il comportamento meccanico del giunto garantendo, allo stesso tempo, un facile processo produttivo attraverso l'adozione del 3D-TTL.

Questi benefici, unitamente alla scarsa conoscenza di questa tipologia di giunto, hanno stimolato l'esecuzione di attività sperimentali, numeriche e teoriche presso il laboratorio STRENGTH dell'Università degli Studi di Salerno al fine di indagare il comportamento fornito da connessioni tra colonne circolari cave e travi IPE passanti. La prima fase dell'indagine è consistita nell'esecuzione di prove sperimentali e simulazioni numeriche su sotto-assemblaggi trave-colonna, che hanno consentito di proporre formulazioni per prevedere la resistenza a flessione e la rigidità iniziale del nodo analizzato ([8]-[10]). Tuttavia, anche se queste equazioni garantiscono un'affidabile previsione della resistenza flessionale e della rigidità iniziale della connessione studiata, non consentono di identificare il comportamento locale delle singole componenti nodali in cui la connessione potrebbe essere suddivisa. Per questo motivo, la seconda fase dell'attività è stata basata sullo studio dei singoli componenti del giunto per assemblarli per prevedere il comportamento dell'intera connessione.

In questo quadro, il presente lavoro è incentrato sullo studio del comportamento ciclico esibito dal componente denominato "piastra saldata trasversalmente alla colonna". Questo lavoro rappresenta lo sviluppo dei risultati riportati in [11] dove uno studio simile è stato condotto per valutare il comportamento monotono della stessa componente nodale.

Il lavoro riportato in questo articolo è composto da attività sperimentali e numeriche. In particolare, sono state eseguite tre prove cicliche su provini differenti per le proprietà geometriche degli elementi collegati. Successivamente, i modelli agli elementi finiti (FE) delle connessioni testate sono stati definiti e validati rispetto ai risultati sperimentali. Partendo dai validati modelli agli elementi finiti, è stata eseguita un'analisi parametrica su 44 collegamenti caricati ciclicamente. Quindi, grazie all'adozione di un Algoritmo Genetico (GA) sviluppato attraverso il software MultiCal [12], tutte le 44 curve cicliche forza-spostamento ottenute dai modelli agli elementi finiti sono state utilizzate per calibrare i parametri dell'elemento "hysteretic" appartenente alla libreria OpenSees [13]. Infine, attraverso analisi di regressione, sono state proposte formulazioni per predire i parametri principali del modello isteretico.

2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE

L'attività sperimentale è stata condotta eseguendo tre prove cicliche su campioni costituiti da profili circolari cavi attraversati da piastre (Fig. 1).

Le principali proprietà geometriche sono sintetizzate in Tabella 1. Lo spessore delle piastre dei campioni testati è analogo allo spessore delle flange dei profili IPE200, IPE300 e IPE330 rispettivamente per i tre provini. L'inserimento delle piastre nei profili tubolari è stato assicurato adottando una tolleranza di 2 mm attorno all'impronta della forma delle piastre. Da evidenziare inoltre che sono state utilizzate saldature di testa a completa penetrazione smussate con un angolo pari a 30° adottando la tecnica di saldatura Metal Inert Gas (MIG), come suggerito dalla norma EN 4063 [14]. Prove preliminari sui materiali hanno mostrato che gli elementi testati erano caratterizzati da un acciaio di tipo S355JR.

Facendo riferimento al set-up di prova riportato in Fig. 1, è possibile osservare che gli spostamenti ciclici sono stati applicati alle estremità superiori delle piastre tramite un attuatore verticale

(capacità di carico di 2000 kN in trazione e 3000 kN in compressione) che è fissato a un rigido telaio di contrasto in acciaio vincolato alla sua base al pavimento del laboratorio. Tutti i gradi di libertà delle estremità del profilato cavo sono stati fissati tramite supporti rigidi bullonati al pavimento della macchina ITALSIGMA.

Sono stati applicati cinque trasduttori LVDT per monitorare lo spostamento verticale delle piastre e le possibili rotazioni indesiderate dei presunti supporti fissi.

La storia di spostamenti ciclici adottata è caratterizzata da ampiezze crescenti in conformità con quanto riportato dalle norme AISC 341-16 [15].

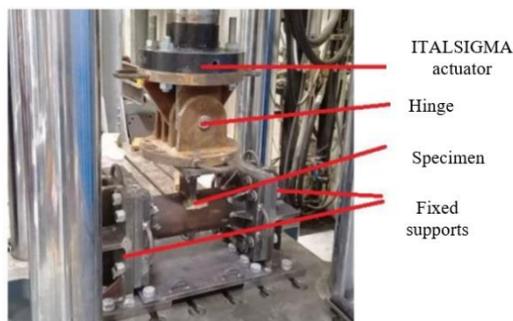


Fig. 1. Set-up sperimentale

Tabella 1. Caratteristiche geometriche dei provini testati

Provino	Profilo circolare cavo			Piatto		
	Diametro esterno (mm)	Spessore (mm)	Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	Spessore (mm)	Lunghezza (mm)
1	168.0	6.0	450.0	100.0	30.0	350.0
2	219.1	5.0	500.0	150.0	20.0	350.0
3	273.0	6.0	500.0	160.0	20.0	400.0

Le curve forza-spostamento relative ai tre provini testati sono mostrate in Fig. 2. Le forze massime sostenute dalle tre connessioni caricate ciclicamente sono rispettivamente pari a 521 kN, 466 kN e 570 kN. Coerentemente con i risultati relativi alle prove monotone [11], anche in questi casi si la resistenza dei provini è attinta in corrispondenza di spostamenti inferiori a 5 mm.

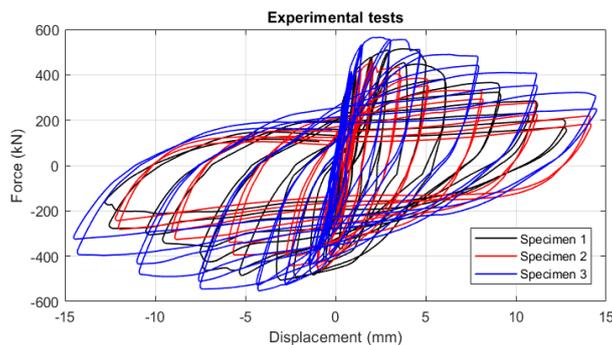


Fig. 2. Risultati sperimentali

3 ATTIVITÀ NUMERICA

Si è proceduto alla modellazione numerica dei provini testati ricorrendo al software agli elementi finiti (FE) Abaqus [16]. È stata eseguita una modellazione dettagliata di tutte le proprietà geometriche delle connessioni (Fig. 3a).

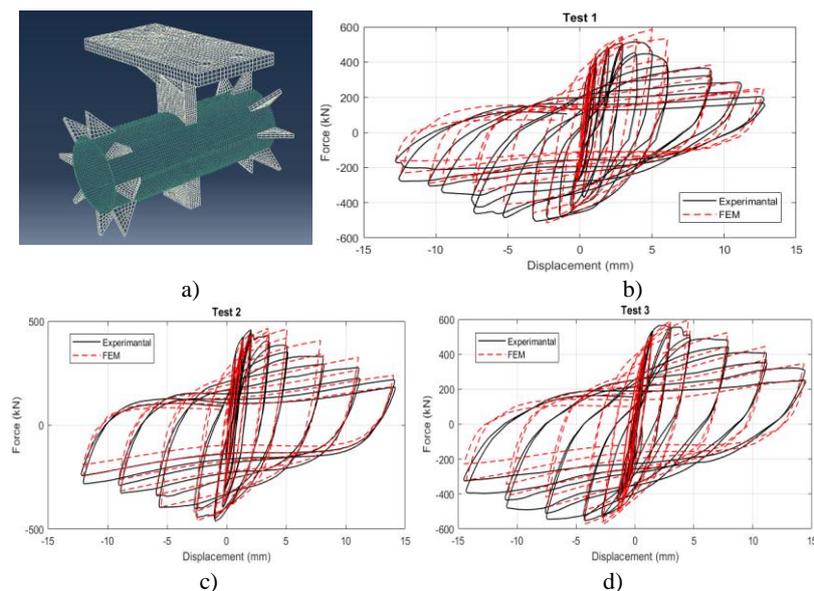


Fig. 3. Modellazione agli elementi finiti (a) e confronto tra risultati sperimentali e numerici (b, c, d)

Solo le saldature non sono state modellate esplicitamente, ma sono state sostituite da vincoli i tipo “Tie”. Il grado di acciaio S355JR è stato modellato attraverso la legge quadri-lineare proposta da Faella [17]. Il modulo di Young è stato fissato pari a 210000 MPa, mentre il rapporto di Poisson è pari a 0,30.

I bulloni sono stati modellati e la loro interazione con le piastre è stata definita attraverso contatti “Hard” e “Frictionless” rispettivamente per il comportamento normale e tangenziale.

Poiché la crisi dei provini è avvenuta a causa dello schiacciamento trasversale delle sezioni cave, si è deciso di introdurre nella modellazione numerica un criterio in grado di considerare l’evoluzione del danno secondo i suggerimenti di ([18]-[19]) ricorrendo ad imperfezioni geometriche conformi all’Eurocodice 3 parte 1.5 [20] ed EN10034 [21]. La mesh è costituita da elementi C3D8 di dimensione pari a 5 mm. L’influenza del livello di compressione nella colonna non è stata analizzata in questo lavoro. La validazione dei modelli FE è stata effettuata applicando le stesse storie di spostamento sperimentate dai campioni durante le prove sperimentali. In Fig. 3b-d è mostrata la validazione dei modelli agli elementi finiti confrontando le curve forza-spostamento sperimentali e numeriche relative ai tre campioni analizzati.

4 CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DELL’ELEMENTO “HYSTERETIC”

La validazione dei modelli agli elementi finiti ha consentito di studiare numericamente altre 44 configurazioni di connessioni, che sono state opportunamente selezionate per ampliare la gamma dei casi studiati.

Gli elementi delle soluzioni aggiuntive sono stati definiti in modo che $\beta=d_0/b_1$ sia compreso tra 0.44 e 0.74, $\gamma=d_0/(2t_0)$ tra 15.28 e 27.39, $\tau=t_0/t_p$ tra 2.00 e 8.75. In particolare, d_0 è il diametro della colonna, b_1 è la larghezza della piastra, t_0 è lo spessore della colonna e t_p è lo spessore della piastra. Facendo riferimento alle 44 curve forza-spostamento ottenute attraverso l'analisi parametrica, il software MultiCal [12] è stato adottato per prevedere i parametri del materiale isteretico uniassiale appartenente alla libreria OpenSees [13]. Lo strumento impiegato si basa sull'adozione di algoritmi genetici per ridurre al minimo gli scarti tra le curve forza-spostamento di riferimento e quelle derivanti dall'uso del materiale isteretico. Questa calibrazione si basa su un'ottimizzazione multi-obiettivo che utilizza i concetti di mutazione e crossover insieme alla variabilità casuale per generare popolazioni che, passo dopo passo, consentono di ottenere la configurazione ottimale dei parametri. I parametri del modello isteretico sono riportati in Fig. 4.

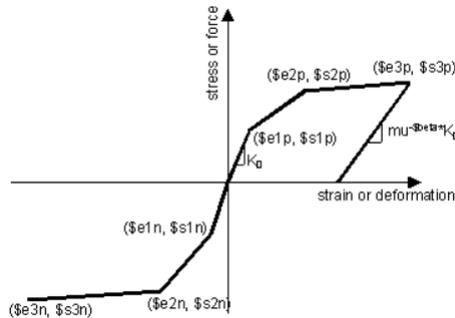


Fig. 4. Hysteretic uniaxial material element (da OpenSeesWiki)

In particolare, vale la pena evidenziare che è stato ipotizzato un comportamento simmetrico del modello isteretico per ridurre i parametri da calibrare ($s1n=-s1p$, $e1n=-e1p$, ecc.). Inoltre, $s1p$ ed $e1p$ sono stati corretti in conformità con le Eq. (1-2), che sono state opportunamente derivate nell'ambito dello studio riportato in [11].

$$s1p = F_{c/t} = 0.24\beta^{-0.41}\gamma^{0.43}\tau^{0.47} \frac{5.98}{1 - \beta^{0.52} f_y t_0^2} \quad (1)$$

$$e1p = \frac{2}{3} \frac{s1p}{k_{c/t}} \quad (2)$$

Nelle Eq. (1-2), f_y è il limite di snervamento del materiale, $F_{c/t}$ e $k_{c/t}$ sono, rispettivamente, la resistenza e la rigidità della componente analizzata valutate attraverso gli studi sul comportamento monotono del giunto [11].

$damage1$ e $beta$ sono stati invece assunti pari a 0, mentre $e2p$ ed $e3p$ sono stati fissati pari allo spostamento massimo delle simulazioni FE.

Attraverso i risultati dell'analisi parametrica è stato possibile definire formulazioni per prevedere i seguenti parametri: $e2p=e3p$, $s2p$, $s3p$, $pinchx$, $pinchy$ e $damage2$. Le analisi di regressione hanno portato a definire le Eq. (3-8).

$$s2p = s3p = s1p \cdot \beta^{-0.068}\gamma^{0.214}\tau^{-0.06} \quad (3)$$

$$e2p = e1p \cdot (3.6 \cdot \beta - 0.014 \cdot \gamma + 1.05 \cdot \tau) \quad (4)$$

$$e3p = e1p \cdot (50.5 \cdot \beta - 1.24 \cdot \gamma + 4.88 \cdot \tau) \quad (5)$$

$$pinchx = 0.094 \cdot \beta + 0.005 \cdot \gamma - 0.01 \cdot \tau \quad (6)$$

$$pinchy = \beta^{0.177}\gamma^{-0.206}\tau^{0.058} \quad (7)$$

$$damage2 = \beta^{1.25} \gamma^{-0.36} \tau^{-0.524} \quad (8)$$

Infine, queste formulazioni sono state applicate alle 44 configurazioni studiate e in Fig. 5 è mostrata l'accuratezza del modello, ad esempio, con riferimento al caso 11.

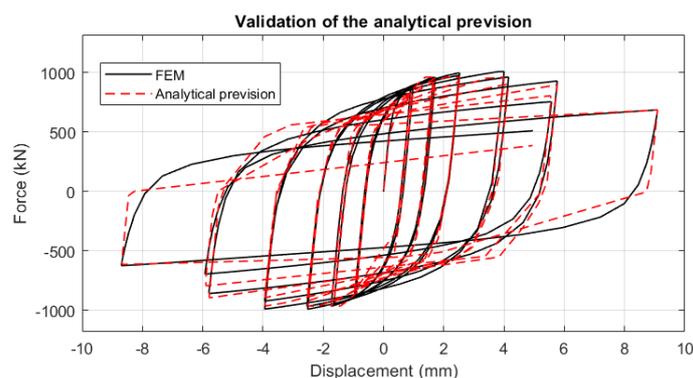


Fig. 5. Confronto tra le curve forza-spostamento del caso 11 fornite dall'analisi agli elementi finiti e dalle formulazioni proposte

8 CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati discussi i risultati riguardanti lo studio del comportamento ciclico di connessioni tra profili circolari cavi e piatti passanti. Le principali conclusioni sono:

- i risultati sperimentali hanno confermato che il meccanismo di collasso della tipologia di connessione analizzata è coerente con l'approccio teorico riportato in [8];
- un modello agli elementi finiti rappresentativo dei provini testati è stato validato nei confronti dei risultati sperimentali;
- la validazione del modello numerico ha permesso di eseguire un'analisi parametrica per studiare una più ampia gamma di possibili configurazioni geometriche della connessione;
- un software basato sull'implementazione di Algoritmo Genetici ha permesso la calibrazione delle curve forza-spostamento individuate nell'analisi parametrica tramite il modello "hysteretic" della libreria di OpenSees;
- analisi di regressione hanno permesso di definire delle formulazioni affidabili per la previsione dell'elemento "hysteretic".

Quale sviluppo futuro, si prevede di applicare le formulazioni riportate nel presente articolo per la previsione del comportamento ciclico di connessioni tra colonne circolari cave e travi IPE.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints. CEN, European Committee for Standardization, 2005.
- [2] AIJ: Recommendations for the design and fabrication of tubular truss structures in steel. Architectural Institute of Japan, 2002.
- [3] Sawada, Y., Idogaki, S., Skeia, K., Static and fatigue tests on T-joints stiffened by an internal ring. Proceedings of the Offshore Technology Conference OTC 3422, Houston, USA, 1979.
- [4] Zhao, X. L., Packer, J. A., Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns. Thin-Walled Structures, Vol. 47, Np. 6/7, pp. 617-628, 2009.

- [5] Voth, A., Packer, J. A., Branch Plate-to-Circular Hollow Structural Section Connections. I: Experimental Investigation and Finite-Element Modelling. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2012.
- [6] Kanyilmaz, A., Castiglioni, C., Brambilla, G., Gjoka, K., Galazzi, A., Raso, S., Valli, A., Brugnolli, M., Hojda, R., Experimental assessment of tolerances for the fabrication of laser-cut steel joints. *ce/papers*. 1. 776-785. 10.1002/cepa.117, 2017.
- [7] Voth, A., Branch Plate-to-Circular Hollow Structural Section Connections. Ph. D. Thesis, Toronto, 2010.
- [8] Di Benedetto, S., Latour, M., Rizzano, G., Chord failure resistance of 3D cut welded connections with CHS columns and through I-BEAMS. *Thin Walled Struct.* 154, 106821, doi:10.1016/j.tws.2020.106821, 2020.
- [9] Di Benedetto, S., Latour, M., Rizzano, G., Assessment of the stiffness of 3D cut welded connections with CHS columns and through I-BEAMS. *Structures*, 27, 247–258, doi:10.1016/j.istruc.2020.05.043, 2020.
- [10] Di Benedetto, S., Latour, M., Rizzano, G., Stiffness Prediction of Connections between CHS Tubes and Externally Welded I-Beams: FE Analyses and Analytical Study. *Materials* 13, no. 13: 3030. <https://doi.org/10.3390/ma13133030>, 2020.
- [11] Saldutti, A., Di Benedetto, S., Latour, M., Rizzano, G., COMPONENT MODELLING OF CONNECTIONS BETWEEN CIRCULAR-HOLLOW-SECTIONS AND THROUGH-ALL MEMBERS. 8th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 2, 4177-4184, 10.7712/120121.8776.18825, 2021.
- [12] Chisari, C., Francavilla, A. B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano G., Amadio, C., Critical issues in parameter calibration of cyclic models for steel members. *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 123-138, 2017.
- [13] McKenna, F., OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation, *Computing in Science and Engineering* 13, 58-66, 2011.
- [14] EN 4063: Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers, 2011.
- [15] ANSI/AISC 341-16: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute for Steel Construction, Chicago, Illinois, 2016.
- [16] Abaqus, Analysis user's manual version 6.17, Abaqus Inc, 2017.
- [17] Faella, C., Piluso, V., Rizzano, G., *Structural Steel Semirigid Connections*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.
- [18] Pavlovic, M., Markovic, Z., Veljkovic, M., Budevac, D., Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. *J. Constr. Steel Res.*, 88:134-149, 2013.
- [19] Faralli, A. C., Large deformation of T-stub connection in bolted steel joints. Ph. D. Thesis, University College of London, 2019.
- [20] EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Piling. CEN European Committee for Standardization, 2006.
- [21] EN 10034: Structural Steel I and H sections. Tolerances on shape and dimensions, 1995.

KEYWORDS

Component method, 3D laser cutting technology (3D-LCT), finite element modelling (FEM).