

**MODELLO MECCANICO PER LA PREVISIONE DEL
COMPORTAMENTO ULTIMO DI CONNESSIONI TRAVE-
COLONNA IN GRANDI SPOSTAMENTI**

**MECHANICAL MODEL FOR PREDICTING THE ULTIMATE
BEHAVIOUR OF BOLTED BEAM-TO-COLUMN
CONNECTIONS IN THE LARGE DISPLACEMENTS RANGE**

Antonella B. Francavilla, Massimo Latour,
Gianvittorio Rizzano
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Via Giovanni Paolo II, Fisciano, Italy
afrancavilla@unisa.it, mlatour@unisa.it,
g.rizzano@unisa.it

P.J. Tan
University College London
Department of Mechanical Engineering
United Kingdom
pj.tan@ucl.ac.uk

ABSTRACT

In the last years, significant interest in the robustness assessment of structures designed according to seismic codes has grown. Generally, Moment Resisting Frames are considered highly ductile and thus more suitable to resist the collapse caused by the local failure of the major load-bearing elements. In the case of robustness assessment scenarios, a role of paramount importance is played by the joints both when they are designed as Full Strength or Partial Strength. Therefore, to predict accurately the structural response up to failure, modelling the ultimate behaviour of beam-to-column joints is necessary. The current methodology for the prediction of behaviour of joints suggested by Eurocode 3 is based on the so-called component method, which provides to characterize the single components of the joints in terms of stiffness and resistance by assembling them into a mechanical model representative of the response of the whole connection. Nevertheless, there are still some limitations related to the prediction of the ductility and there are no indications regarding the influence of large displacements. These are, indeed, very important for the assessment of the structural response in case of local failure of one of the columns of the frame.

Within this framework, in this paper, the attention is focused on the prediction of the ultimate behaviour of bolted beam-to-column connections, by evaluating the response of the so-called equivalent T-stub in tension. Starting from the theoretical model for predicting the whole behaviour up to failure of bolted T-stubs in large displacement range already presented by the authors in a previous work, the component method is applied to evaluate the flexural response of bolted joints in the large displacement range. After presenting the advances of the proposed approach, a comparison between theoretical and experimental results is provided to verify its accuracy. In the paper, the results of new tests on double split tee joints are also presented, as a part of a collaboration between the Department of Civil Engineering of the University of Salerno and the Department of Mechanical Engineering of the University College of London.

SOMMARIO

Negli ultimi anni c'è un crescente interesse nella valutazione della robustezza strutturale di opere progettate per azioni sismiche. In generale, le strutture intelaiate sono considerate altamente duttili e pertanto adatte a resistere al collasso causato dal collasso locale degli elementi resistenti. nell'ambito della valutazione della robustezza strutturale, un ruolo di grande importanza è ricoperto dai collegamenti siano essi a completo o parziale ripristino di resistenza. Pertanto, per la predizione accurata della risposta strutturale al collasso, è necessaria la modellazione del comportamento ultimo dei collegamenti trave-colonna. La metodologia corrente per la predizione del comportamento nodale suggerita dall'Eurocodice 3 è basata sulla applicazione del metodo delle componenti, che prevede la caratterizzazione delle singole componenti nodali in termini di rigidità e resistenza e poi l'assemblaggio in un modello meccanico capace di prevedere la risposta dell'intera connessione. Tuttavia, ci sono ancora alcune limitazioni legate alla predizione della duttilità ad, in particolare, non ci sono indicazioni circa la possibilità di valutare l'influenza di grandi spostamenti. Tali aspetti sono invece molto importanti nella valutazione della risposta strutturale in caso di collasso locale di una o più colonne del telaio. In tale contesto, in questo articolo, l'attenzione è focalizzata sulla previsione del comportamento ultimo delle connessioni trave-colonna bullonate mediante la valutazione della risposta del cosiddetto "T-stub in trazione". Partendo dal modello teorico per la predizione del comportamento ultimo in grandi spostamenti di T-stub bullonati già presentato dagli autori, è stato applicato il metodo delle componenti per valutare la risposta flessionale dei nodi bullonati in grandi spostamenti. Dopo aver presentato gli avanzamenti dell'approccio proposto, viene fornito il confronto tra i risultati teorici e sperimentali in modo da valutarne l'accuratezza. I risultati sperimentali presentati nel presente lavoro sono parte di una attività svolta in collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno ed il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell' University college di Londra.

1 INTRODUZIONE

I recenti eventi estremi, come attacchi terroristici, esplosioni o impatti, hanno influenzato il progetto strutturale delle strutture intelaiate (MRFs). In specifici scenari estremi, la capacità di resistere al collasso progressivo delle strutture è strettamente legata alla loro riserva di duttilità e, conseguentemente, alla loro capacità dissipativa [1-3]. Le strutture intelaiate in acciaio sono considerate essere molto duttili e quindi adatte a resistere al collasso causato dal danneggiamento locale degli elementi resistenti principali. In queste circostanze, il comportamento globale delle strutture è influenzato dal comportamento locale delle membrature o delle connessioni. Infatti, usualmente sono raggiunte grandi rotazioni in modo da attivare gli effetti catenari e lo sviluppo di percorsi di carico alternativi. In queste condizioni, le rotazioni nodali sono più grandi dei valori target individuati in caso di progetto statico o sismico e le non linearità geometriche e meccaniche che emergono devono essere portate in conto nella fase di progetto poiché influenzano fortemente la capacità dissipativa dei collegamenti. Pertanto, al fine di prevedere in maniera accurata la risposta strutturale fino al collasso, è necessaria la modellazione del comportamento ultimo delle connessioni trave-colonna.

L'attuale metodologia per la predizione del comportamento nodale dei collegamenti proposta dall'Eurocodice 3 [4] si basa sul cosiddetto metodo delle componenti [5], che prevede di scomporre i collegamenti nelle singole componenti che sono dapprima caratterizzate in termini di rigidità e resistenza e poi assemblati in un modello meccanico capace di fornire la risposta dell'intera connessione. Tuttavia, sebbene il metodo delle componenti sia già molto avanzato, ci sono ancora limitazioni legate alla previsione di duttilità di ognuna delle componenti nodali. Infatti, siccome la definizione della capacità di deformazione ultima delle singole componenti nodali è un argomento difficile, con il metodo delle componenti la capacità ultima dissipativa del collegamento non può

essere determinata. In aggiunta, nella modellazione delle molle rappresentative delle componenti nodali, le non linearità vengono trascurate. Tuttavia, in caso di analisi di robustezza strutturale, tutti questi aspetti devono essere considerati e la loro valutazione diventa fondamentale poiché vengono raggiunte grandi rotazioni nelle connessioni e, conseguentemente, grandi spostamenti nelle componenti nodali. Sebbene alcuni autori abbiano già investigato alcuni aspetti legati alla previsione della capacità di dissipazione plastica ed al comportamento ciclico delle connessioni [6,7] precedenti ricerche sperimentali e teoriche hanno spesso concentrato la loro attenzione principalmente sulla previsione della rigidezza e della resistenza dei componenti nodali. Pertanto, la previsione della capacità di deformazione plastica delle connessioni è ancora un campo di ricerca aperto il cui obiettivo primario è dedicato alla previsione della capacità di rotazione plastica delle connessioni a parziale resistenza. In questo contesto, in questo articolo l'attenzione è focalizzata sulle connessioni bullonate in cui le principali componenti nodali sono modellate per mezzo di un T-stub equivalente (piastra a forma di T la cui flangia è collegata da bulloni). In particolare, viene applicato il metodo delle componenti per definire il comportamento ultimo dei giunti introducendo un modello meccanico [8] per la previsione del comportamento ultimo del T-stub soggetto a grandi spostamenti.

Inoltre, è stata pianificata ed eseguita una campagna sperimentale presso il Laboratorio STRENGTH dell'Università degli Studi di Salerno: sono state testate tre collegamenti trave-colonna con doppio T-stub in condizioni di carico monotono ottenendo grandi rotazioni nodali per favorire lo sviluppo di non linearità. Infine, dopo aver presentato gli sviluppi e nella modellazione delle componenti nodali per l'applicazione del metodo delle componenti e la campagna sperimentale, è riportato il confronto tra i risultati analitici e sperimentali.

2 METODO DELLE COMPONENTI: ESTENSIONE AI COLLEGAMENTI BULLONATI IN GRANDI SPOSTAMENTI

Come introdotto, il metodo delle componenti è essenzialmente basato su modelli meccanici costituiti dall'assemblaggio di molle che rappresentano le componenti nodali.

La non linearità della risposta nodale momento-rotazione si ottiene a partire dai legami costitutivi non elastici adottati per le componenti. Il metodo si presta alla modellazione di qualsiasi tipo di collegamento a condizione che le componenti siano opportunamente identificate e la loro legge costitutiva sia adeguatamente modellata. Successivamente è possibile assemblare le componenti per la valutazione della curva momento-rotazione dell'intero collegamento in modo che risulti caratterizzato in termini di resistenza, rigidezza e capacità rotazionale. In questo contesto, l'applicazione del metodo alle connessioni strutturali è ancora limitata ad una casistica. Infatti, sono disponibili solo collegamenti tra il profilo delle sezioni I o H. Con riferimento ai collegamenti bullonati, l'Eurocodice 3 [4] fornisce le regole per il calcolo della resistenza plastica e della rigidezza iniziale per ogni componente del collegamento considerato: pannello d'anima della colonna a taglio; anima della colonna in trazione; anima della colonna in compressione; flangia della colonna in flessione; T-stub in trazione; flangia e anima della trave in compressione; anima della trave in tensione; bulloni in tensione; bulloni a taglio; piastre a rifollamento. Per il collegamento bullonato a T-stub, quando soggetto a flessione, le componenti considerate sono riportate in Fig.1a.

Innanzitutto, è possibile sottolineare che alcune componenti sono fonte di rigidezza rotazionale e di resistenza a flessione: il pannello dell'anima della colonna a taglio (cws), l'anima della colonna in compressione (cwc) e in trazione (cwt), la flangia della colonna in flessione (cfb), la flangia T-stub in flessione (Tfb), bulloni in trazione (bt) possono essere modellati mediante semplice modello rigido-plastico. Al contrario, l'anima T-stub in trazione (Twt) ed in compressione (Twc) devono essere considerate solo nella valutazione della resistenza a flessione. In aggiunta, poiché i bulloni che collegano le nervature a T e le flange della trave sono stati precaricati, all'inizio non si verifica

alcuno scorrimento dell'interfaccia metallica. Tuttavia, dopo aver raggiunto la resistenza allo scorrimento, alla resistenza della connessione devono essere aggiunti tre componenti: bulloni a taglio (bs), T-stub a rifollamento (Twb) e flangia della trave a rifollamento (bwb).

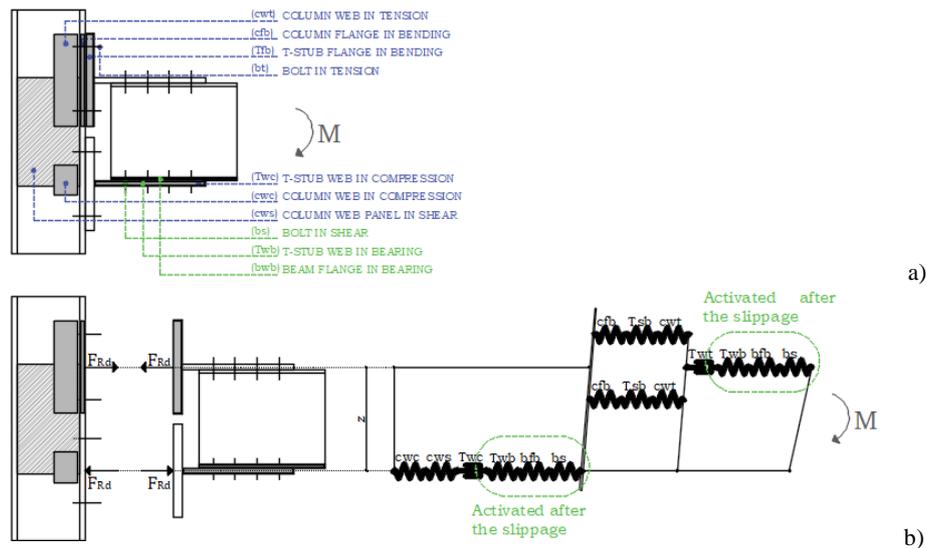


Fig. 1. Collegamento con doppio T-stub: a) identificazione delle componenti; b) modello meccanico della connessione

Con riferimento alla Fig.1b, la resistenza nodale F_{Rd} è governata dalla resistenza della componente più debole:

$$F_{Rd} = \min\{F_{cwc,Rd}; F_{cwt,Rd}; F_{cws,Rd}; F_{cfb,Rd}; F_{Tsb,Rd}; F_{Twb,Rd}; F_{bfb,Rd}; F_{bs,Rd}\} \quad (1)$$

Assumendo flessione semplice e centro di compressione posizionato in corrispondenza dell'asse dell'anima del T-stub, la resistenza flessionale del collegamento è valutata come:

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \cdot z \quad (2)$$

dove z è il braccio di leva della connessione (Fig.1b).

In maniera analoga, la rigidezza può essere determinata partendo dalla flessibilità delle componenti di base, ottenendo:

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (3)$$

dove S_j è la rigidezza elastica del collegamento, E è il modulo di Young e k_i è la rigidezza dell' i -esima componente di base che contribuisce alla rigidezza flessionale della connessione

Escludendo la componente dissipativa della tipologia di collegamento esaminata, il contributo delle componenti nodali in termini di resistenza e rigidezza è riportato, secondo EC3 [4] in Tabella 1.

Infatti, la componente dissipativa della connessione, secondo l'approccio progettuale resiliente, deve essere opportunamente progettata non solo in termini di resistenza e rigidezza ma anche in termini di capacità di rotazione ultima.

Tabella 1. Resistance and stiffness coefficient of the joint components given by EC3[4]

Componente	Coefficiente di rigidezza *	Resistenza *
------------	-----------------------------	--------------

Anima e flangia della trave in compressione	∞	$F_{bfb} = \frac{M_{b,Rd}}{(h_t - t_{bf})}$
Anima della trave in trazione	∞	$F_{bwt} = \frac{b_{eff,wb} \cdot t_{bf} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$
Piatto in trazione	∞	$F_{pt,Rd} = \min \left\{ \frac{A f_{yd}}{\gamma_{M0}}; \frac{A_{net} f_{ud}}{\gamma_{M2}} \right\}$
		$F_{cwc,Rd} = 0.9 \frac{f_{y,cw} \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} + F_{cwc,Rd,add}$
Anima della colonna a taglio	$k_{cws} = \frac{0.38 \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z}$	with $F_{cwc,Rd,add} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s}$ but $F_{cwc,Rd,add} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s}$
Anima della colonna in compressione	$k_{cwc} = \frac{0.7 \cdot b_{eff,cwc} \cdot t_{wc}}{d_c}$	$F_{cwc,Rd} = \omega \cdot [b_{eff,cwc} (t_{cw} + 2 \cdot t_{cw}) \cdot \frac{f_{y,cw}}{\gamma_{M0}}]$
Anima della colonna in trazione	$k_{cwc} = \frac{0.7 \cdot b_{eff,cwt} \cdot t_{wc}}{d_c}$	$F_{cwt,Rd} = \frac{\omega \cdot b_{eff,cwt} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,cw}}{\gamma_{M0}}$
Bulloni a taglio	$k_{bs} = \frac{16 \cdot n_b \cdot d^2 \cdot f_{ub}}{E \cdot d_{M16}}$	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}}$
Piatto and trave a rifollamento	$k_{be} = \frac{24 \cdot n_b \cdot k_b \cdot k_t \cdot d \cdot f_u}{E}$	$F_{p,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot f_u \cdot t_p}{\gamma_{M2}}$

* La notazione è in linea con le indicazioni dell'Eurocodice 3 Parte 1-8.

Tuttavia, la previsione della capacità di deformazione ultima non è possibile con il metodo delle componenti codificato nell'EC3 Parte 1-8 a causa della mancanza di informazioni dettagliate relative alla capacità di deformazione delle singole componenti nodali. Poiché il T-stub è la componente dissipativa delle connessioni analizzate, fondamentale per la previsione del comportamento ultimo di tale connessione, è la definizione della sua resistenza, rigidezza e duttilità ultima considerando anche l'influenza delle non linearità che diventano rilevanti quando si trovano nel range di grandi spostamenti. Per superare questa limitazione, in questo articolo è stata eseguita la caratterizzazione del comportamento ultimo del T-stub applicando un modello teorico già sviluppato dagli stessi autori [8]. Questo modello permette di definire la risposta a T-stub fino al collasso in caso di grandi spostamenti, partendo dalla definizione della geometria degli elementi, delle condizioni al contorno e del comportamento non lineare dei suoi sottocomponenti, ovvero la piastra e i bulloni. In queste condizioni estreme, nel T-stub sorgono fenomeni complessi e si sviluppano azioni aggiuntive. In particolare, a causa delle condizioni di compatibilità e della traslazione orizzontale della punta della piastra, possono insorgere ulteriori forze membranali (N) derivanti dall'attivazione del bullone a taglio. Quando gli spostamenti sono relativamente piccoli, non c'è contatto tra il gambo del bullone e il foro e si sviluppano solo forze di attrito (V_μ). Al contrario, quando si verificano grandi spostamenti, lo spostamento orizzontale della piastra può superare la dimensione del gap bullone-foro, attivando forze membranali significative dovute all'instaurazione del contatto tra il foro e il gambo del bullone [9]. In questa condizione, nei bulloni si sviluppano forze di taglio rilevanti e il collasso del T-stub può essere anticipato da modalità di rottura che non sono direttamente spiegate nella teoria tradizionale (Fig.2).

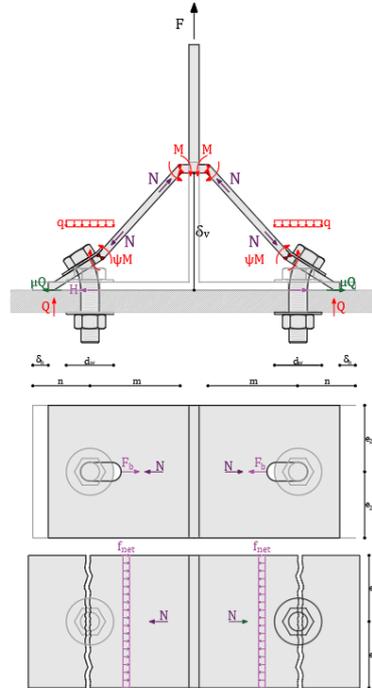


Fig. 2. Comportamento del T-stub in condizioni di carico ultimo

Per considerare questi aspetti, nel modello proposto in [8], il comportamento della piastra è definito adottando un approccio di plasticità concentrata per mezzo di cerniere plastiche non lineari poste nella flangia T-stub, secondo EC3, in corrispondenza dell'asse del bullone e nella sezione flangia-anima del T-stub [4]. Le caratteristiche delle cerniere plastiche sono derivate a partire dalla legge momento-curvatura della sezione ($M-\chi$) della piastra, considerando l'influenza delle forze membranali (N) sulla resistenza a flessione della piastra. In modo analogo, anche le molle non lineari che modellano il comportamento a trazione e a taglio del bullone sono caratterizzate a partire dalla conoscenza della legge sforzo-deformazione del materiale di base. Il collasso del T-stub si ottiene al raggiungimento di una delle seguenti condizioni: i) viene raggiunta la deformazione ultima nella fibra più esterna della piastra; ii) si raggiunge la deformazione ultima del bullone in trazione o a taglio; iii) viene raggiunta la resistenza della sezione trasversale netta della piastra.

3 ANALISI SPERIMENTALE DEI COLLEGAMENTI TRAVE-COLONNA

Con l'obiettivo di analizzare il comportamento ultimo in grandi spostamenti di collegamenti trave-colonna con doppio T-stub, sono state eseguite prove monotone su 3 provini presso il laboratorio STRENGTH (STRuctural ENGineerign Test Hall) dell'Università di Salerno.

I provini sono stati dotati di T-stub con diverse proprietà geometriche (spessore della flangia t_{Tf} e diametro del bullone d) e meccaniche (classe di resistenza) per ottenere diverse modalità di rottura del T-stub favorendo lo sviluppo degli effetti del secondo ordine. I profili della trave e della colonna sono rispettivamente IPE270 in acciaio S355 e HE200B in acciaio S275 mentre i collegamenti del T-stub alla trave e alla colonna sono realizzati mediante bulloni HV-10.9.

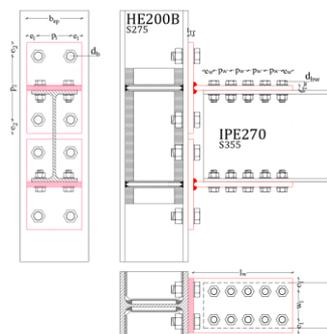
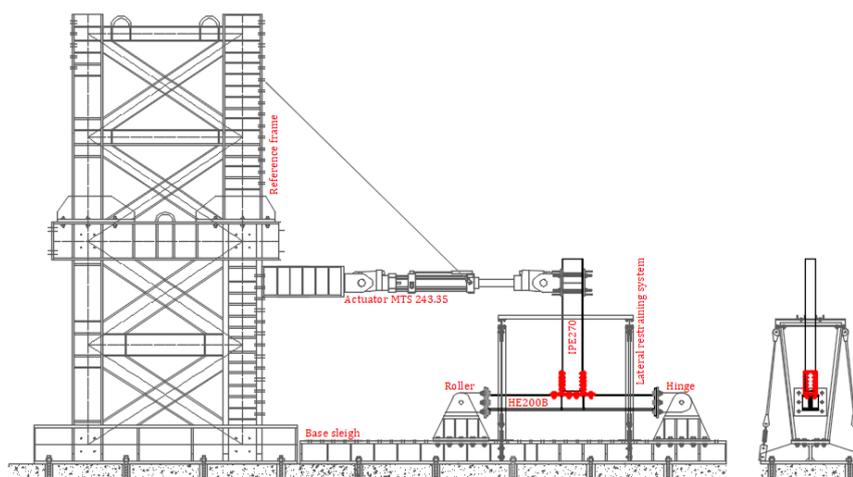


Fig. 2. Geometria del T-stub

Tabella 2. Parametri geometrici e meccanici dei T-stub[mm]

	b_{ep}	e_1	p_1	e_2	p_2	e_w	p_w	e_l	p_l	t_{Tw}	t_{Tf}	d	d_{bw}	STEEL GRADE
NODO 1	160	32.5	95	40	188	30	50	38.3	83.4	15	15	24	18	S275
NODO 2	180	47.5	105	40	198	30	50	58.3	83.4	15	15	20	18	S275
NODO 3	160	32.5	95	40	188	30	50	38.3	83.4	15	18	27	18	S355

Durante i test, è stato impiegato un attuatore MTS 243.35 con portata massima pari a 245 kN e corsa del pistone pari a +/- 508 mm. L'attuatore è stato collegato all'estremità della trave per applicare la storia di spostamento monotono (Fig.3). Per monitorare il comportamento locale delle componenti nodali, sono stati impiegati trasduttori a spostamento lineare (LDT). In particolare, per tutti i provini sono stati monitorati i seguenti spostamenti: i) spostamento orizzontale della flangia del T-stub; ii) lo spostamento verticale della flangia del T-stub; iii) il sollevamento del bullone che collega la flangia del T-stub alla flangia della colonna, la deformazione a taglio della zona del pannello della colonna.



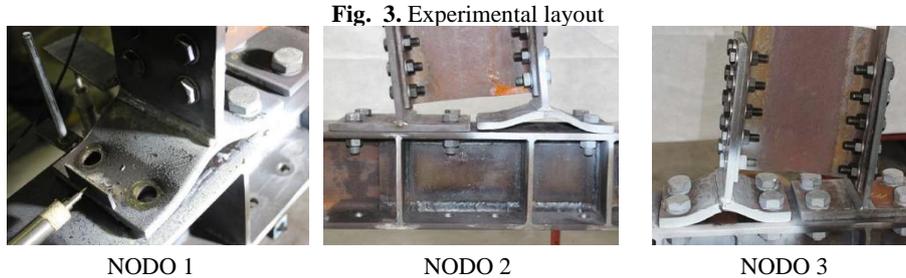


Fig. 3. Experimental layout

NODO 1

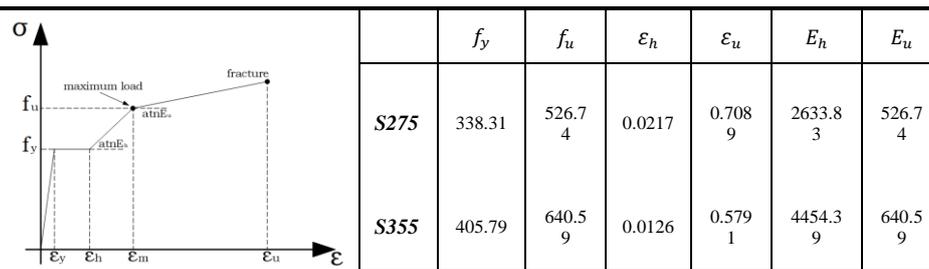
NODO 2

NODO 3

Fig. 4. Collegamenti in condizioni ultime

4 APPLICAZIONE DEL MODELLO MECCANICO E ANALISI DEI RISULTATI

Il modello meccanico descritto nella sezione 2 è stato applicato con riferimento ai provini testati per confrontare i risultati sperimentali con i risultati numerici. Al fine di valutare con precisione la resistenza ultima della connessione, sono state eseguite prove sul materiale che compone il T-stub. Partendo dai risultati ottenuti, l'acciaio che compone la flangia del Tstub è modellato attraverso una curva multilineare "true-stress - true-strain" modellata con una legge quadrilineare [8].



Al contrario, non sono state eseguite prove dedicate alla caratterizzazione delle resistenze a trazione e taglio dei bulloni HV, sia in termini di resistenza che di duttilità. Tuttavia, recenti prove sperimentali di trazione su bulloni precaricabili HV di classe 10.9, eseguite da [10], hanno mostrato una deformazione a rottura pari a circa 0.06. Nell'applicazione del modello proposto sono stati adottati come riferimento i valori proposti da [10]. Il comportamento nodale in termini di curva forza-spostamento dei provini testati è stato riportato in Fig. 5. I confronti tra la previsione numerica ed i risultati sperimentali evidenziano una previsione soddisfacente della curva forza-spostamento nodale, in termini di resistenza ultima, spostamenti ultimi ma anche nella previsione della modalità di rottura. I risultati sono anche confrontati numericamente nella Tab. 3. Questa tabella mostra che in termini di spostamento ultimo, il valore medio del rapporto $\frac{\delta_{v,th}}{\delta_{v,exp}}$ è pari a 0,98, con un CoV pari a 0,12. Analogamente, il valore medio del rapporto $\frac{F_{th}}{F_{exp}}$ è pari a 1,05, con un CoV pari a 0,06 a testimonianza di un'elevata accuratezza della metodologia proposta.

CONCLUSIONI

In questo articolo, il metodo delle componenti viene applicato per definire il comportamento ultimo dei collegamenti introducendo un modello meccanico [8] per predire il comportamento ultimo dei

T-stub considerando gli effetti del secondo ordine che diventano non trascurabili quando la componente è soggetta a grandi spostamenti.

Tabella 3. Comparison between experimental results and analytical previsions

	risultati sperimentali		previsione numerica		$\frac{\text{previsione numerica}}{\text{risultati sperimentali}}$	
	$\delta_{v,exp}$	F_{exp}	$\delta_{v,th}$	F_{th}	$\frac{\delta_{v,th}}{\delta_{v,exp}}$	$\frac{F_{th}}{F_{exp}}$
	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[-]	[-]
NODO 1	35,10	562,01	30,62	551,16	0,87	0,98
NODO 2	29,60	420,99	28,67	462,60	0,97	1,10
NODO 3	29,25	717,02	32,49	768,32	1,11	1,07

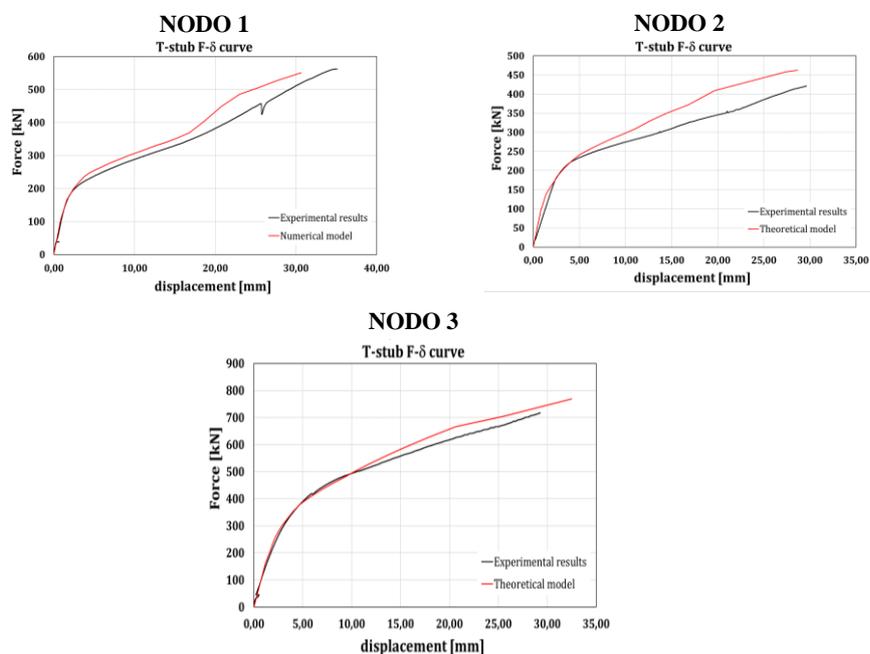


Fig. 5. Curve Forza-spostamento

L'accuratezza del modello viene valutata confrontando la previsione teorica con i risultati sperimentali ottenuti durante una campagna sperimentale eseguita presso il Laboratorio STRENGTH dell'Università degli Studi di Salerno su tre collegamenti trave-colonna a doppio T-stub.

Dai confronti si sottolinea che gli effetti del secondo ordine devono essere presi in considerazione nella previsione del comportamento ultimo dei collegamenti bullonati perché influenzano fortemente il comportamento strutturale. Inoltre, l'approccio del metodo delle componenti combinato con il modello proposto che è in grado di fornire il comportamento ultimo del T-stub quando soggetto a grandi spostamenti fornisce una previsione accurata sia della resistenza massima che della capacità di spostamento finale. Questa validazione mostra che il modello meccanico può essere utilizzato per prevedere con precisione il comportamento di connessioni più complesse

attraverso l'applicazione del metodo delle componenti codificato in EC3 parte 1.8 dove la componente dissipativa può essere modellata mediante il T-stub equivalente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] V. R. Gomes, A. Tenchini, L. Lima, and P. Vellasco, "Robustness assessment of semi-rigid steel multi-storey frames," *Structures*, vol. 25, Jun. 2020;
- [2] D. Cassiano, M. D'Aniello, C. Rebelo, R. Landolfo, L. S. da Silva, "Influence of Seismic design rules on the robustness of steel moment resisting frames," *Steel and Comp. Struc.*, 2016.
- [3] J. F. Demonceau, F. Cerfontaine, J. P. Jaspart, "Resistance of steel and composite connections under combined axial force and bending including group effects: Analytical procedures and comparison with laboratory tests," *Journal of Const. Steel Research*, 2019;
- [4] EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints.
- [5] C. Faella, v. Piluso, and G. Rizzano, *Structural Steel Semirigid Connections: theory, design and software*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., 1999.
- [6] A. F. Santos, A. Santiago, M. Latour, and G. Rizzano, "Robustness analysis of steel frames subjected to vehicle collisions," *Structures*, vol. 25, pp. 930–942, 2020.
- [7] M. A. Bravo and R. A. Herrera, "Performance under cyclic load of built-up T-stubs for Double T moment connections," *Journal of Const. Steel Research*, 2014;
- [8] A.B. Francavilla, M. Latour, G. Rizzano, "Ultimate behaviour of bolted T-stubs under large displacements: A mechanical model", *Journal of Const. Steel Research*, 2022;
- [9] R. Tartaglia, M. D'Aniello, and M. Zimbru, "Experimental and numerical study on the T-Stub behaviour with preloaded bolts under large deformations," *Structures*, 2020;
- [10] A. C. Faralli, M. Latour, P. J. Tan, G. Rizzano, P. Wrobel, "Experimental investigation and modelling of T-stubs undergoing large displacements," *Journal of Constr. Steel Research*, 2021.

KEYWORDS

T-stub, Robustezza strutturale, Grandi spostamenti, modello teorico, analisi sperimentale