

**MODELLAZIONE SEMPLIFICATA DELLA ROTTURA DI
BULLONI AD ALTA RESISTENZA PER ANALISI AGLI
ELEMENTI FINITI**

**SIMPLIFIED MODELLING OF FAILURE IN HIGH STRENGTH
BOLTS FOR FINITE ELEMENT ANALYSES**

Francesco Plaitano, Aurel Stratan
University of Timisoara
Department of Steel Structure and
Structural Mechanics
Timisoara (TM), Romania
francesco.plaitano@student.upt.ro

f.plaitano1@studenti.unisa.it, aurel.stratan@upt.ro

Elide Nastri,
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Fisciano (SA), Italy
enastri@unisa.it,

ABSTRACT

Bolted connections are widely adopted in steel structures, and their behavior affects to a large extent the global response of the system. High strength bolts of type HV are commonly employed. Under pure tension these bolt assemblies usually fail by thread stripping. However, it was observed experimentally that under combined tension and bending, the failure mode changes to fracture of the shank. To be able to analyze the behavior of the structure, Finite Element Method (FEM) analysis is usually employed. In this paper, a simplified approach to be used in the framework of FEM, to model the behavior of high-strength HV bolts able to replicate the failure mechanism of bolts under combined tension and bending is proposed. A conventional modelling of the bolt assembly with continuum elements is used, supplemented by a non-linear spring connecting the nut to the bolt shank. The spring captures in a simplified way the stiffness, resistance, and ductility of the bolt-to-nut thread connection. The bolt shank is modelled with a reduced section corresponding to the threaded length, to capture the strain localization and failure under combined tension and bending of the bolt.

SOMMARIO

I collegamenti bullonati sono ampiamente adottati nelle strutture in acciaio e il loro comportamento influisce in larga misura sulla risposta globale del sistema. Bulloni ad alta resistenza di tipo HV sono comunemente impiegati in tali strutture, i quali, se soggetti a pura tensione, di solito falliscono nella parte filettata per il fenomeno di nut stripping. Tuttavia, è stato osservato sperimentalmente che sotto l'azione combinata di tensione e flessione, la modalità di rottura cambia evidenziando una rottura per taglio del gambo. Per essere in grado di analizzare il comportamento della struttura,

viene solitamente utilizzato il metodo dell'Analisi agli Elementi Finiti (FEM). In questo lavoro, viene proposto un approccio semplificato da utilizzare nelle analisi FEM, per modellare il comportamento dei bulloni ad alta resistenza di tipo HV in grado di replicare il meccanismo di rottura dei bulloni soggetti a tensione e flessione combinati.

Viene utilizzato un modello convenzionale con elementi continui per la modellazione del bullone, integrato da una molla non lineare che collega il dado al gambo del bullone. La molla è in grado di riprodurre in modo semplificato la rigidezza, la resistenza e la duttilità del collegamento filettato bullone-dado. Il gambo del bullone è modellato con una sezione ridotta corrispondente alla lunghezza della parte filettata, per favorire la localizzazione della deformazione e la rottura dello stesso quando questo è soggetto a tenso-flessione.

1 INTRODUZIONE

I collegamenti bullonati nei collegamenti delle strutture in acciaio sono ampiamente utilizzati perché possono offrire molti benefici, come alta resistenza e la possibilità di sostituzione degli elementi eventualmente danneggiati. In questo tipo di sistema, i bulloni rappresentano una delle parti più sollecitate, pertanto, è fondamentale valutare le loro prestazioni e prevedere in anticipo la modalità di rottura del collegamento. Per raggiungere tale scopo, l'uso delle Analisi agli Elementi Finiti (FEM) è una strategia conveniente per analizzare il comportamento di ogni parte del sistema sottoposto a diverse sollecitazioni. Tuttavia, per raggiungere un livello di accuratezza adeguato, è fondamentale utilizzare un modello appropriato della geometria e delle proprietà del materiale per rendere possibile la riproduzione del comportamento effettivo della struttura durante le prove.

Le prove standard su gruppi bulloni vengono eseguite solitamente a pura trazione. In queste condizioni, in caso di bulloni ad alta resistenza di tipo HV, la rottura si verifica solitamente mediante "thread stripping" (Figura 1a). Tuttavia, quando gli stessi insiemi di bulloni sono sottoposti ad azione di trazione e di flessione combinate, ad esempio a causa di grandi deformazioni della piastra terminale, la modalità di rottura passa alla frattura del gambo del bullone nella parte filettata (figura 1b) [1]-[2].

Negli ultimi anni sono state condotti diversi studi [3] per replicare, con una buona precisione, i danni e i meccanismi di rottura dei bulloni sottoposti a un'azione specifica come la pura trazione o il taglio [4]-[9], ma la maggior parte di essi richiede il calcolo dei parametri necessari per implementare il meccanismo di rottura dei materiali e del collegamento dado-bullone stesso. Il calcolo, la calibrazione e l'utilizzo di tali parametri in software FEM come Abaqus [10] possono richiedere un enorme aumento di tempo e risorse per eseguire l'analisi, soprattutto nel caso di assiemi complessi e prove cicliche [4]-[14].



Fig. 1. Rottura di bulloni HV per pura tensione (a) e per azione combinata di taglio e flessione (b) in un flush end-plate bolted link

Le connessioni bullonate possono generalmente presentare due principali meccanismi di rottura come il "nut stripping" (bulloni HV) e la frattura del gambo (bulloni HR). In letteratura esistono

alcuni modelli che possono essere utilizzati per riprodurre il meccanismo di separazione del dado per bulloni HV o la frattura del gambo per bulloni HR [4]-[9], ma non è ancora stato sviluppato un modello in grado di cogliere appieno il comportamento dei bulloni HV sotto azioni combinate di trazione e flessione [3]. Per questo motivo, è stato sviluppato un nuovo approccio semplificato in grado di modellare con precisione il comportamento dei bulloni in tensione e flessione combinata senza ricorrere a modelli basati sulla computazione di parametri di degrado, evitando così l'aumento del tempo necessario per eseguire le analisi FEM. Diverse ricerche [15]-[18] hanno evidenziato il ruolo dei parametri di degrado come lo "stress triaxiality" nelle simulazioni FEM, osservando che attualmente questo tipo di parametro è difficile da calcolare e può influenzare significativamente i risultati delle simulazioni, specialmente in condizioni di carico tridimensionale [17]. L'approccio semplificato proposto ha lo scopo di evitare il calcolo dei parametri di danno rendendo possibile applicare tale metodologia direttamente nelle simulazioni FEM. L'approccio è stato convalidato su un set di bulloni M30 classe 10.9 tipo HV i cui test sono stati eseguiti presso l'Università di Timisoara (UPT). L'uso di questo approccio è computazionalmente efficiente, ottenendo lo stesso grado di accuratezza di metodi più complessi.

2 METODOLOGIA

Lo scopo del lavoro è quello di sviluppare un modello numerico in grado di prevedere il comportamento dei bulloni sottoposti a tensione e flessione combinate. Finora, infatti, non sono state effettuate prove sui bulloni con una combinazione di tensione e flessione; inoltre, non è stato ancora sviluppato alcun modello per rilevare il comportamento effettivo delle modalità di rottura dovute a sollecitazioni miste [3]. Le sollecitazioni miste di taglio e trazione sono comuni nei collegamenti bullonati come i collegamenti a T-stub o i collegamenti delle piastre terminali [19]-[22]. In questi casi, si osserva che la causa principale della rottura è dovuta al carico assiale di trazione anche se in grandi spostamenti la componente di flessione non può essere trascurata. Lo stesso problema può essere evidenziato nei link rimovibili in cui i bulloni subiscono grandi deformazioni (Fig. 1b).

Il punto di partenza di questo lavoro è stato la necessità di catturare con precisione il comportamento di due flush end-plate bolted link le cui prove sperimentali sono state eseguite presso l'Università di Timisoara [1]-[2]. Durante l'esecuzione delle simulazioni FEM attraverso il software Abaqus, è stato evidenziato che la modellazione del comportamento dei bulloni solo in termini di carico assiale non era adeguata a cogliere correttamente il comportamento del collegamento finale e il punto di frattura finale. Pertanto, era necessario tenere conto del comportamento alla flessione dei bulloni. La metodologia adottata per tenere conto anche del comportamento alla flessione dei bulloni parte dalla riproduzione del comportamento a trazione dei bulloni ad alta resistenza testati presso il laboratorio della UPT [1]-[2] durante l'esecuzione di ricerche precedenti [4]-[6]. La parte filettata è stata modellata con un diametro inferiore per riprodurre la sezione dell'area netta. Per quanto riguarda l'interazione bullone-dado, un elemento di tipo molla non lineare viene introdotto per mezzo di un elemento "wire" capace di considerare il danno plastico del collegamento. Infine, il criterio di avvio del danno si applica alle proprietà plastiche del materiale. Calibrando le proprietà di interazione bullone-dado e modificando correttamente la curva di deformazione plastica è stato possibile tenere conto anche del comportamento a flessione del bullone.

3 MODELLAZIONE DI BULLONI HV PER SOLO SFORZO NORMALE

3.1 Geometria del bullone e modellazione FEM

L'impostazione del modello è partita dai risultati di cinque prove di trazione su bulloni eseguite presso l'Università di Timisoara (UPT) considerando diverse dimensioni di gambo e filettature. La

lunghezza del gambo è di 61.2 mm con un diametro di 29.8 mm, mentre la parte filettata è lunga 48,6 mm con un diametro di 25.5 mm.

La geometria è stata modellata in Abaqus considerando il bullone, il dado e la rondella come riportato in Fig. 2. Gli elementi finiti utilizzati sono di tipo C3D8R (elemento brick a otto nodi con integrazione ridotta) da 5 mm per tutte le parti. Le condizioni al contorno sono applicate su due “reference points” (RP) per replicare i vincoli e le azioni della macchina di prova. In dettaglio, come illustrato nella Figura 2, RP1 è accoppiato con la parte interna della rondella sinistra mentre RP2 è accoppiato con la parte interna della rondella destra. RP2 è bloccato mentre a RP1 viene applicato uno spostamento di 10 mm lungo la direzione assiale del bullone.

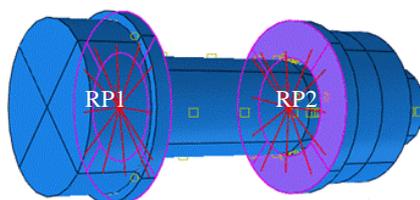


Fig. 2. Posizione dei RP usati per applicare le boundary conditions

3.2 Modellazione delle proprietà dei materiali

Le proprietà nominali dei materiali sono 940 MPa e 1040 MPa rispettivamente per f_y e f_u . La massa per unità di volume è di 7.85 g/cm^3 , il coefficiente di Poisson è di 0.3 e il modulo di Young è di 210000 MPa. Per la modellazione del materiale del bullone, della rondella e del dado, è stata calcolata la curva true stress-true strain tenendo conto di una deformazione nominale alla rottura del 9%. La risultante curva sforzo-deformazione è riportata nella figura 3. Inoltre, il criterio di inizio del danneggiamento è stato calcolato secondo [13] con riferimento alla curva sforzo-deformazione ingegneristica in figura 4. In particolare, lo sforzo equivalente all'inizio del danno è stato fissato a 0.058 mentre il parametro stress triaxiality, definito come il rapporto tra la sollecitazione media e la sollecitazione equivalente di von Mises [17], è calcolato come $\eta = -p/q = 0.33$ [14], dove p è la pressione idrostatica e q è lo sforzo equivalente di Mises.

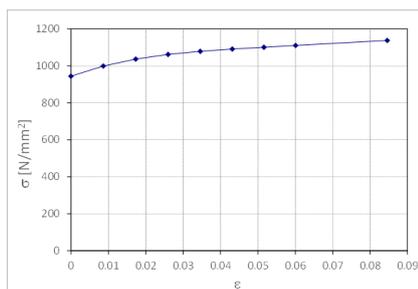


Fig. 3. Curva sforzo – deformazione plastica per bulloni M30 10.9

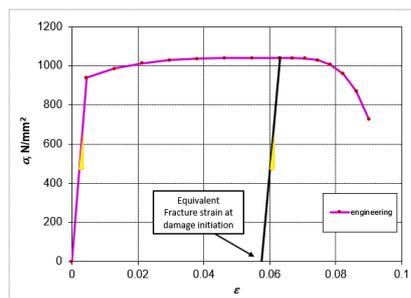


Fig. 4. Calcolo dello sforzo equivalente all'inizio del danno

3.3 Simulazione dell'interazione dado-bullone

I bulloni HV di solito falliscono a causa del fenomeno dello strappaggio dei dadi, anche quando sono precaricati. Per questo motivo, è fondamentale prestare attenzione alla legge costitutiva dell'interazione bullone-dado da utilizzare nel modello FEM. A partire da [4], è stato scelto di implementare un modello FEM utilizzando un duplice approccio:

- 1) Viene stabilito un contatto tipo surface to surface tra filettatura e dado, con comportamento tangenziale senza attrito e comportamento normale tipo penalty standard.
- 2) Vengono introdotti due reference point (RP) che collegano la superficie esterna della parte filettata e la superficie interna del dado utilizzando un vincolo continuum distribution coupling con le superfici citate (Figura 5). I due RP sono quindi collegati utilizzando una molla assiale (wire), come illustrato in Fig. 6.

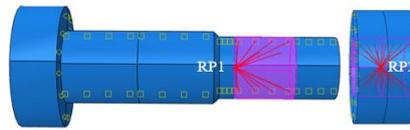


Fig. 5. Reference Point per la parte filettata del bullone e per la parte interna del dado

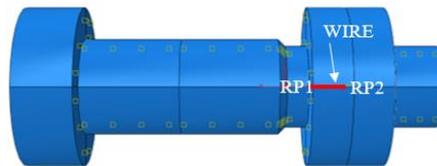


Fig. 6. Molla assiale tra RP1 e RP2

Per modellare con precisione la legge costitutiva dell'elemento wire che rappresenta il comportamento della parte filettata, vengono calcolati parametri di elasticità, plasticità e di danno a partire dalle prove sperimentali effettuate nel laboratorio dell'UPT.

- *Elasticità*. La rigidità iniziale della filettatura si ottiene supponendo che il comportamento dell'insieme bullone – dado sia composto da due componenti che agiscono in serie: il gambo del bullone e il collegamento filettato tra il dado e il gambo:

$$K_{th} = \left(\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_{sh}} \right)^{-1} \quad (1)$$

Dove K_{th} è la rigidità iniziale della parte filettata; K_b è la rigidità iniziale dell'insieme bullone – dado e K_{sh} è la rigidità iniziale del gambo.

- *Plasticità*. La deformazione plastica della parte filettata è ottenuta sottraendo alla deformazione totale della stessa quella elastica:

$$x_{pl} = x - \frac{F}{K_{th}} \quad (2)$$

Dove x è la deformazione della parte filettata, F è la forza e K_{th} è la rigidità iniziale.

- *Danno*. L'opzione plastic motion è stata scelta come criterio di inizio del danno, mentre come evoluzione del danno è stata utilizzata l'opzione linear motion damage evolution. Per fare ciò, devono essere selezionati due punti: il primo coincidente con l'inizio della plasticizzazione e il secondo corrispondente alla deformazione plastica alla rottura. Entrambi i punti sono stati presi

dalla curva sperimentale $F-\Delta$: il primo (punto 1 della figura 7) è il punto che coincide con la forza massima raggiunta, mentre il secondo è il punto dopo il quale la curva inizia a diminuire rapidamente (punto 2 della figura 7).

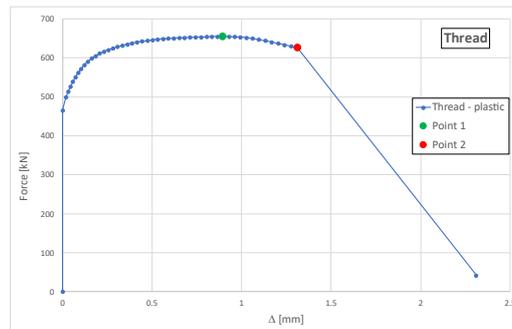


Fig. 7. Parametri utilizzati per definire il danno nell'interazione dado – bullone

3.4 Risultati dei test a trazione assiale

I risultati del confronto tra risposta sperimentale e risposta numerica di un bullone isolato sottoposto a tensione assiale pura sono riportati nella figura 8. È possibile apprezzare la buona sovrapposizione tra la curva sperimentale e quella relativa alla simulazione FEM. La modellazione proposta consente di ottenere un grado di precisione molto buono, soprattutto per quanto riguarda l'interazione tra bulloni e dadi. Infatti, si ottiene la replicazione del fenomeno dello stripping del dado e si riproducono adeguatamente la rigidità e la forza ultima evidenziate nel bullone sperimentale.

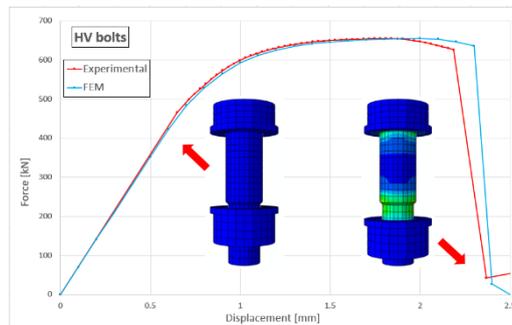


Fig. 8. Confronto tra prova monotona sperimentale e analisi FEM su un bullone soggetto a fenomeno di nut stripping

4 MODELLAZIONE DI BULLONI TIPO HV SOGGETTI A TRAZIONE E TAGLIO

La novità proposta in questo lavoro riguarda la rappresentazione del comportamento dei bulloni HV sottoposti ad azione combinata di trazione e flessione. Si precisa che la stessa procedura adottata per i bulloni HV sottoposti a tensione pura è stata applicata per modellare l'interazione bullone-dado.

Per ottenere una corretta modellazione del comportamento dei bulloni è necessario un modello completo per il comportamento plastico del materiale. In particolare, per tenere conto della degradazione del materiale dovuta al momento flettente è stato introdotto un ramo soft nelle proprietà del materiale plastico come riportato in Figura 9. In letteratura ci sono molti studi sul ruolo dei parametri di danno come il fracture strain e lo stress triaxiality [14]-[18] nelle simulazioni FEM, ma il calcolo di questi parametri, nel caso di azioni multiple, è difficile da ottenere e l'uso degli stessi rende i modelli molto sensibili anche in caso di cambiamenti molto piccoli. Partendo da questa considerazione, il processo di calibrazione della plasticità del materiale dei bulloni è iniziato con l'obiettivo di evitare l'uso di questi parametri senza rinunciare alla precisione dei risultati.

Un approccio semplificato per modellare la frattura del materiale è stato sviluppato sulla base della curva di deformazione plastica precedentemente riportata in Figura 3. In questa fase, una procedura iterativa di prova per errori è stata utilizzata per determinare il ramo soft del materiale per replicare il suo degrado. È stata creata una curva plastica modificata, che si sovrappone alla curva plastica precedentemente calcolata fino al raggiungimento della tensione di trazione nominale massima nel bullone (1040 N/mm^2 con una deformazione corrispondente di 0.017); la seconda parte è stata calibrata considerando l'allungamento massimo indicato dalla norma ISO 898-1 [17] per i bulloni M30 ($\epsilon_r = 0,09$ o 9%).

È stato osservato che l'introduzione di un ramo soft con una riduzione del 20% della tensione nominale massima del bullone (Figura 9) corrispondente ad una deformazione finale del 9% è sufficiente per tener conto della degradazione del bullone dovuta alla presenza di momento flettente. La procedura è stata convalidata utilizzando nei modelli FEM di un flush end-plate bolted link e di un extended end-plate bolted link. Dalla Figura 10 è possibile osservare che la deformazione ottenuta nei bulloni delle simulazioni FEM è del tutto paragonabile con quella osservata nelle prove sperimentali.

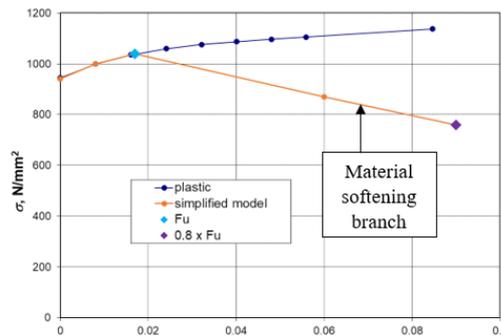


Fig. 9. Modifica della curva true stress – true strain per ottenere il degrado del materiale

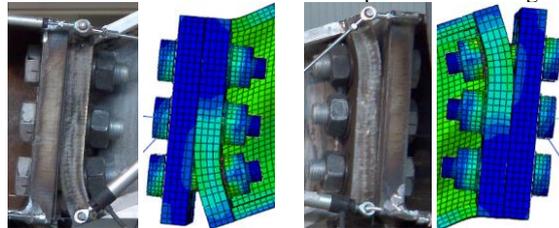


Fig. 10. Confronto tra la deformata dei test sperimentali e quella delle simulazioni FEM in cui viene evidenziata la deformazione flessionale dei bulloni.

5 DISCUSSIONE

Come indicato in precedenza, non esiste un metodo standardizzato per testare assieme di bulloni sottoposti ad azione combinata di tensione e flessione. Per questo motivo, gli effetti dei criteri di modellazione per il materiale del bullone e per l'interazione bullone – dado sono stati osservati utilizzando tale approccio nella modellazione di un flush end-plate bolted link e di un extended end-plate bolted link. Precedenti analisi condotte presso UPT nel 2020 [2] su questi sistemi hanno dimostrato l'importanza di modellare i collegamenti bullonati per ottenere lo stesso comportamento globale del modello numerico rispetto a quello mostrato nei test.

Il confronto tra la prova sperimentale e l'analisi numerica del flush end-plate bolted link mostra l'efficacia dei criteri di modellazione adottati per replicare il comportamento del bullone. In Fig. 11 è evidenziato il meccanismo di rottura del bullone a causa del fenomeno di flessione, che è ben replicato utilizzando l'approccio semplificato proposto in questo documento.

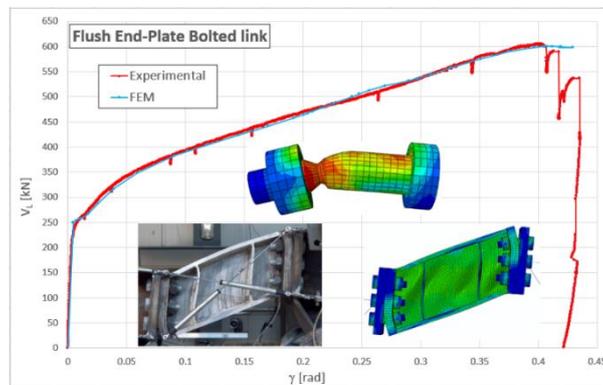


Fig. 11. Confronto tra i risultati di una prova monotona sperimentale e una analisi FEM eseguite su un flush end-plate bolted link

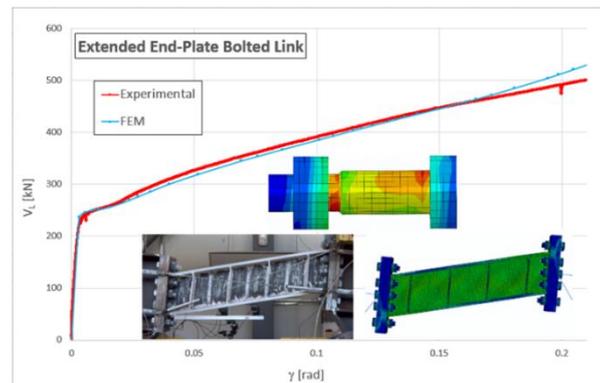


Fig. 12. Confronto tra i risultati di una prova monotona sperimentale e una analisi FEM eseguite su un extended end-plate bolted link

CONCLUSIONI

Le prove sperimentali hanno evidenziato due diverse modalità di rottura: mediante nut stripping in caso di tensione pura e mediante frattura del gambo in caso di azione combinata di tensione e flessione. L'obiettivo principale di questo lavoro era quello di sviluppare un approccio semplificato di modellazione del fallimento di bulloni HV ad alta resistenza classe 10.9 in tensione combinata e flessione: è stato sviluppato un modello numerico ad elementi finiti per riprodurre le modalità di rottura osservate sperimentalmente con un buon grado di accuratezza. Infatti, grazie all'utilizzo di una molla assiale per la modellazione semplificata della filettatura insieme ad una dimensione del gambo variabile e un modello di degrado semplificato del materiale del bullone è stato possibile localizzare la deformazione e la successiva frattura del gambo sotto l'azione combinata di tensione e flessione, ottenendo un risultato molto simile a quello evidenziato nei test sperimentali.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato sostenuto da una sovvenzione del Ministero dell'Istruzione e della Ricerca Rumeno, CCCDI - UEFISCDI, numero di progetto PN-III-P2-2.1-PED-2019-5427, con-in PNCDI III.

RIFERIMENTI

- [1] A. Chesoa, A. Stratan, C. Neagu, D. Dubina. Experimental investigation of the length influence on removable links. In: Proceedings IRF2020: 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure. pp. 977–986. J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid (editors), INEGI-FEUP (2020).
- [2] F. Plaitano. Experimental tests and FEM simulations of bolted links with flush and extended end plates connections under monotonic and cyclic loads. Thesis dissertation. University of Salerno and Politehnica University Timisoara (2020).
- [3] M. Warren, A. Antoniu, L. Stewart. A review of experimentation and computational modeling of dynamic bolt fracture. *Journal of Constructional Steel Research* 194 (2022) 107293.
- [4] D. Jakab, A. Stratan, D. Dubina. Numerical testing of steel beam-to-column bolted extended end-plate connection with haunches. *ITM Web of Conferences* 29, 02008 (2019), <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192902008>. ICCMAE 2018.
- [5] M. D'Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo. Simplified criteria for finite element modelling of European preloadable bolts. *Steel and Composite Structures*, Vol. 24, No. 6 (2017) 643-658, DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2017.24.6.643>.
- [6] M. D'Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo. Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable gr10.9 bolt assemblies. *Journal of Constructional Steel Research* 124 (2016) 77–90.
- [7] E. L. Grimsmo, A. Aalberg, M. Langseth, A.H. Clausen. Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 126, 15–25 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.023>.
- [8] A. Hedayat, E. A. Afzadi, A. Iranpour. Prediction of the Bolt Fracture in Shear Using Finite Element Method. *Structures* 12 (2017) 188-210.
- [9] B. Reeder, P. Grimmer, J. Emery, Cohesive zone models for reduced-order fastener failure, in: AIAA SciTech Forum, 2019. San Diego, CA.
- [10] ABAQUS user manual, (2022). Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

- [11] W. Cai, J. Jiang, G.-Q. Li. Prediction of fracture behavior for high-strength steel bolts at elevated temperatures. SiF 2020 – The 11th International Conference on Structures in Fire. The University of Queensland, Brisbane, Australia, 30th November - 2nd December 2020
- [12] H. Xin, J. L. M. Veljkovic, Y. Liu, Q. Sun. Evaluating the strength of grade 10.9 bolts subject to multiaxial loading using the micromechanical failure index: MCEPS. *Steel Construction*. <https://doi.org/10.1002/stco.202100029> (2022).
- [13] N. Mavrodontis. Modeling Bolted Connections with Abaqus FEA; <https://info.simuleon.com/blog/modeling-bolted-connections-with-abaqus-fea> Simuleon FEA Blog (2018).
- [14] R. H. N. Wagner. ABAQUS Tutorial: Damage for Ductile Metals - Material Model Explained - Ductile Damage. ResearchGate (2021).
- [15] R. Kiran, K. Khandelwal. A triaxiality and Lode parameter dependent ductile fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics* 128 (2014) 121–138
- [16] H. U. Sajid, R. Kiran. Influence of high stress triaxiality on mechanical strength of ASTM A36, ASTM A572 and ASTM A992 steels. *Construction and Building Materials* 176 (2018) 129–134
- [17] M. Brünig, S. Gerke, V. Hagenbrock. Micro-mechanical studies on the effect of the stress triaxiality and the Lode parameter on ductile damage. *International Journal of Plasticity* 50 (2013) 49–65
- [18] H. U. Sajid, R. Kiran. Influence of high stress triaxiality on mechanical strength of ASTM A36, ASTM A572 and ASTM A992 steels. *Construction and Building Materials* 176 (2018) 129–134
- [19] E. Nistri, F. Plaitano. A review on the removable link in eccentrically braced frames: Benefits and performances. International conference of numerical analysis and applied mathematics ICNAAM 2020, Published on: AIP Conference Proceedings 2425, 120008 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0081521> Published Online: 06 April 2022.
- [20] M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano. Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 146, pp. 33-48 (2018).
- [21] M. Latour, G. Rizzano. Experimental behavior and mechanical modeling of dissipative T-stub connections. *Journal of Structural Engineering*, 138 (2), pp. 170-182 (2012).
- [22] F. Iannone, M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano. Experimental analysis of bolted steel beam-to-column connections: Component identification. *Journal of Earthquake Engineering*, 15 (2), pp. 214-244 (2011).
- [23] ISO 898-1. Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread. International Standard (2009).

KEYWORDS

Abaqus, FEM, HV, Bolted connections, Bolt failure, Modelling criteria