

## ANALISI NUMERICA DEL COMPORTAMENTO A FATICA DI UNIONI CHIODATE

### NUMERICAL INVESTIGATION OF FATIGUE LIFE OF RIVETED CONNECTIONS

Annarosa Lettieri, Christian Alfonsi,  
Massimo Latour, Gianvittorio Rizzano  
University of Salerno  
Department of Civil Engineering  
Salerno, Italy  
alettieri@unisa.it, c.alfonsi@studenti.unisa.it,  
mlatour@unisa.it, g.rizzano@unisa.it

Aldo Milone, Mario D'Aniello,  
Raffaele Landolfo  
University of Naples "Federico II"  
Department of Structural Engineering  
Naples, Italy  
aldo.milone@unina.it, mdaniel@unina.it,  
raffaele.landolfo@unina.it

#### ABSTRACT

Old-steel bridges are part of the heritage asset in many countries. The assessment of their remaining life and fatigue strength of their structural riveted details is a key factor in the management of these structures. According to Eurocode 3 part 1-9, fatigue class 71 is recommended to estimate the fatigue strength of riveted details. But the predicted fatigue behaviour is excessive conservative because some geometrical and mechanical properties are not fully considered. In this work, a parametric analysis is performed to evaluate the fatigue strength of riveted connections. Finite element models are developed in ABAQUS and Fe-Safe, accounting the geometrical properties of the riveted details, the stress ratio and the cyclic material properties. The preliminary results are presented and used to quantify the influence of the investigated parameters on the fatigue strength of riveted details.

#### SOMMARIO

I ponti chiodati esistenti sono parte del patrimonio culturale in molti paesi. La loro suscettibilità a fenomeni di degrado per fatica rende necessaria la valutazione della loro vita residua nonché la valutazione della resistenza a fatica dei dettagli costruttivi presenti in tali complessi. In accordo alle attuali prescrizioni fornite dall'Eurocodice 3 parte 1-9, la valutazione della resistenza a fatica dei dettagli chiodati si basa sull'utilizzare il dettaglio 71 delle curve di fatica S-N. Tuttavia, le previsioni ottenute possono risultare eccessivamente penalizzanti con stime molto cautelative. In questo articolo sono riassunti i risultati preliminari di uno studio parametrico condotto con modelli agli elementi finiti sviluppati in ABAQUS e Fe-Safe, per valutare la resistenza a fatica di unioni chiodate, includendo modelli di proprietà locali del materiale, monotone e cicliche nonché va-

riando i parametri geometrici delle unioni e i rapporti di carico delle sollecitazioni cicliche. I risultati numerici ottenuti quantificano l'influenza dei parametri considerati sulla resistenza a fatica delle unioni chiodate, evidenziando la necessità di caratterizzare e categorizzare i dettagli strutturali chiodati in maniera più accurata.

## 1 INTRODUZIONE

I ponti in acciaio chiodati esistenti rappresentano una buona parte dei ponti ferroviari presenti sul territorio Italiano ed Europeo. Costruiti prima degli anni '70, alcuni di essi sono ancora oggi in esercizio e al termine, o quasi, della loro vita utile. La destinazione d'uso di tali strutture implica che esse sono soggette a carichi fluttuanti che generano variazioni tensionali sui dettagli costruttivi (unioni, collegamenti) rendendoli suscettibili a fenomeni di degrado per fatica ([1]-[2]). Per garantire un adeguato livello di sicurezza, gli enti gestori hanno la necessità di valutare la performance residua di tali strutture, in maniera da scegliere e quantificare le tecniche di intervento più idonee.

In accordo alle correnti prescrizioni normative [3], la resistenza a fatica dei dettagli costruttivi è quantificata mediante l'utilizzo delle curve di fatica (curve S-N) concettualizzate da Wöhler. L'Eurocodice 3 parte 1-9 ([3]), non fornisce indicazioni specifiche per le strutture e i dettagli chiodati. Alcuni studi propongono di usare un dettaglio inizialmente indicato per le unioni saldate, caratterizzato da una resistenza a 2 milioni di cicli pari a 71 MPa e una pendenza (m) pari a 3 [4] per tutte le tipologie di dettaglio chiodate, ma l'utilizzo di tale curva comporta stime spesso eccessivamente cautelative. Taras *et al.* [5], sulla base dei risultati sperimentali presenti in letteratura sul comportamento a fatica di collegamenti chiodati propone altre classi di dettaglio specifiche, ma numerosi sono ancora i parametri da investigare che influenzano la vita a fatica [6] e, inoltre, poche sono le prove sperimentali che si riferiscono a dettagli costruttivi semplici quali le unioni chiodate (*e.g.*, [7]-[8]). Recentemente, nell'ambito di progetti di ricerca europei ([9],[10]) è stato investigato il comportamento di unioni semplici a taglio [11]-[13] con analisi sperimentali e numeriche. In tale ambito, Da Silva *et al.* [11], con riferimento ai ponti *Trezói e Alcácer do Sal*, investiga il comportamento a fatica di collegamenti in scala reale (*i.e.*, definite serie R1), di unioni semplici a doppio piano di taglio con una singola fila di chiodi (*i.e.*, serie R2) e doppio piano di taglio con doppia fila di chiodi (*i.e.*, serie R3). I collegamenti in scala reale sono prelevati dai ponti esistenti, mentre le unioni sono fabbricate con l'acciaio utilizzato per la costruzione dei ponti. Il lavoro comprende anche la caratterizzazione ciclica dei materiali costituenti le unioni e lo studio del comportamento di collegamenti più complessi estratti dalle strutture esistenti.

Il presente lavoro ha lo scopo di valutare e quantificare l'influenza che alcuni parametri hanno sulla resistenza a fatica di giunti chiodati semplici. Nello specifico, l'obiettivo è valutare in che misura i parametri geometrici delle unioni, i rapporti di carico delle sollecitazioni cicliche e i parametri ciclici caratteristici del materiale influenzano la loro resistenza a fatica. Sulla base dei risultati sperimentali presentati in Da Silva *et al.* [11], e con particolare riferimento alle unioni chiodate semplici appartenenti alla serie R2, è stato sviluppato un modello numerico utilizzando ABAQUS [14] ed Fe-Safe [15]. Mentre il primo consente sia la modellazione delle unioni sia la loro analisi elastica, il secondo consente di determinare il numero di fluttuazioni dello stato tensionale necessario ad innescare una cricca per fatica. Sulla base del modello numerico calibrato con i dati di letteratura, è svolta un'analisi parametrica variando i parametri investigati e stimando il numero di cicli necessario ad innescare un difetto per fatica.

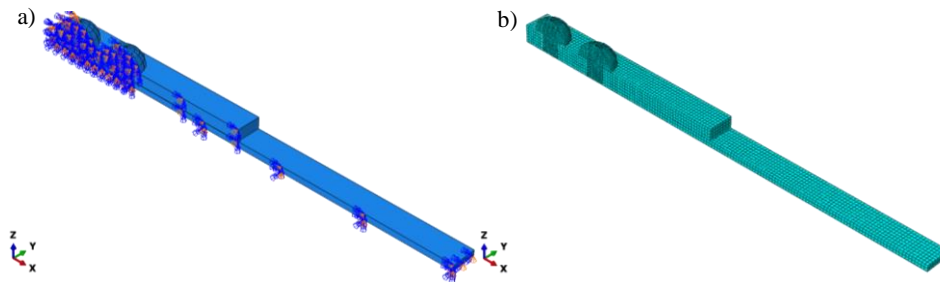
## 2 MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DI UNIONI CHIODATE

Il comportamento a fatica delle unioni chiodate oggetto di studio è investigato attraverso modelli agli elementi finiti sviluppati in ABAQUS [14]. Considerando la simmetria delle connessioni,

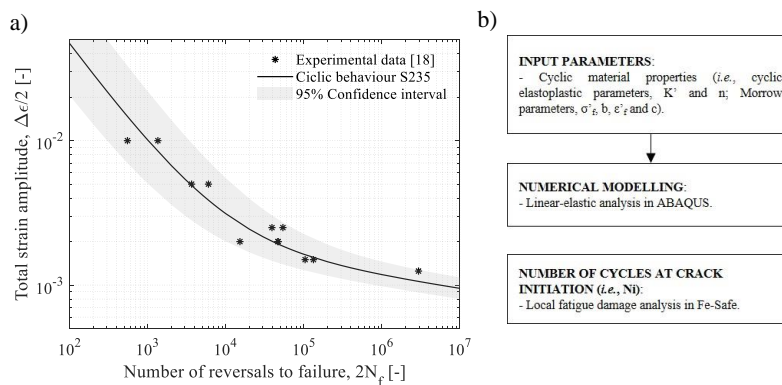
solo  $\frac{1}{4}$  di esse è stato modellato (Fig. 1). Nei modelli, nessuna tolleranza è stata considerata tra i fori e i chiodi della connessione, condizione tipica generata dal processo di battitura del chiodo a caldo. Il materiale è assunto elastico ed isotropico, con un modulo di elasticità pari a 210 GPa e un coefficiente di Poisson pari a 0.27. Il precarico dei chiodi è stato applicato considerando un 'Bolt load'. Tra le superfici in acciaio è stata definita una interazione 'surface-to-surface', con un coefficiente di attrito pari a 0.30.

La previsione del numero di cicli necessari ad innescare una cricca per fatica all'interno delle connessioni è effettuata in Fe-Safe [15]. Il software, a partire da uno stato iniziale degli sforzi ottenuto da una analisi elastica in ABAQUS, consente di calcolare il numero necessario ad innescare un difetto per fatica. In tali modelli, i parametri ciclici del materiale sono descritti dalla legge di Morrow [16]. Nel caso specifico, i parametri ciclici sperimentali del materiale, testati in Da Silva *et al.*, [11], sono analizzati statisticamente considerando un intervallo di confidenza pari al 95%, come mostrato in Fig. 2(a). Fig. 2(b), invece, rappresenta in maniera schematica gli step fondamentali per la stima del numero di cicli per l'innescio del difetto nel modello, utilizzato in questo lavoro.

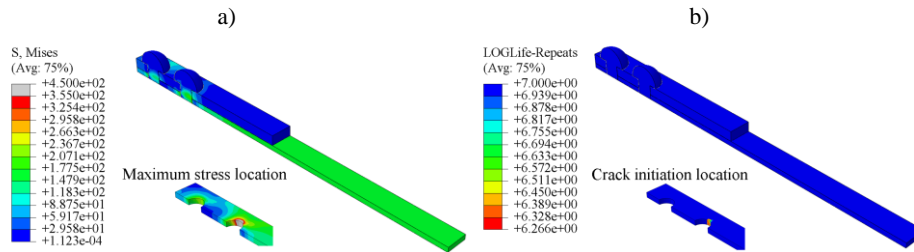
Fig. 3 mostra i risultati per una unione chiodata esaminata. Nello specifico, Fig. 3(a) rappresenta la distribuzione degli stress all'ultimo step dell'analisi elastica, utilizzato come input per l'analisi successiva, mentre in Fig. 3(b) è mostrato l'output di Fe-Safe per l'innescio.



**Fig. 1.** (a) Condizioni al contorno adottate per i giunti chiodati investigati e (b) mesh.

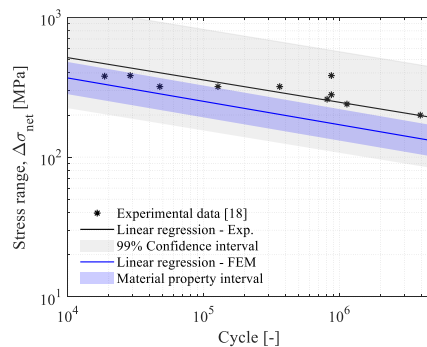


**Fig. 2.** (a) Valutazione statistica dei parametri ciclici del S235; (b) work-flow utilizzato in questo studio per prevedere il numero di cicli necessari all'innescio della cricca.



**Fig. 3.** Risultati dell'analisi elastica in ABAQUS (a); risultato del calcolo a fatica in Fe-Safe (b).

L'approccio di modellazione e analisi descritto, è stato calibrato utilizzando i dati sperimentali delle unioni chiodate riportati in [11]. In Fig. 4 è mostrato il risultato delle simulazioni numeriche. In particolare, sono riportati i dati sperimentali e il rispettivo intervallo di confidenza considerando una probabilità del 99% (area in grigio) e i risultati delle simulazioni FEM considerando le proprietà del materiale come valori medi, inferiori e superiori dell'intervallo di confidenza, precedentemente mostrati in Fig. 2(a). I risultati numerici, si dispongono al di sotto del valore considerato. Questo è riconducibile ad una stima del solo numero di cicli necessari all'innesco (comunque preponderante rispetto alla fase di propagazione) e al contributo del precarico generato dal processo di battitura, sulla resistenza complessiva [11]. A vantaggio di sicurezza, i risultati dello studio mostrati di seguito saranno ottenuti utilizzando le proprietà cicliche del materiale coincidenti con quelle inferiori dell'intervallo di confidenza di Fig. 2(a) e l'influenza dei parametri considerati sul comportamento a fatica delle unioni investigate sarà valutata considerando la sola fase di innesco.



**Fig. 4.** Confronto dei dati sperimentali (provini R2 [11]) con i risultati numerici.

### 3 ANALISI PARAMETRICA

#### 3.1 Parametri investigati

Al fine di valutare l'influenza delle proprietà geometriche sulla resistenza a fatica delle unioni chiodate sono stati considerati diversi valori di interspazio tra i chiodi, spessore dei piatti collegati e diametro dei chiodi. Tabella 1 racchiude i casi analizzati. Il codice identificativo è ottenuto dall'unione delle informazioni circa il diametro dei chiodi ( $\Phi$ ), lo spessore dei piatti collegati ( $t$ ) e il valore del passo dei chiodi adimensionalizzato rispetto al diametro (*i.e.*,  $p/\Phi$ ). Tutti i casi esa-

minati sono caratterizzati dallo stesso valore della larghezza del piatto e della distanza dal bordo adimensionalizzati rispetto al diametro (*i.e.*,  $w/\Phi$  e  $a/\Phi$ ).

**Tabella 1.** Caratteristiche delle unioni chiodate utilizzate per l'analisi parametrica

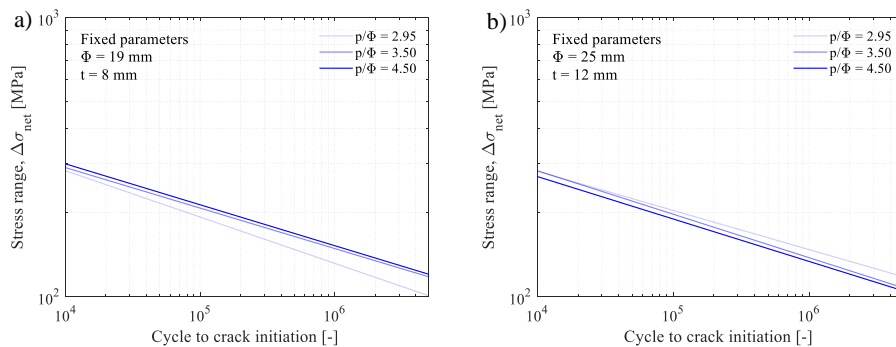
Codice	Diametro, $\Phi$ [mm]	Larghezza piatto, $w$ [mm]	Spessore piatto, $t$ [mm]	Distanza dal bordo, $a$ [mm]	Interasse chiodi, $p$ [mm]	$p/d$ [-]	R [-]
R2-13-8-2.95	13	34.22	8	17.11	38.30	2.95	{0; 0.5}
R2-13-8-3.50	13	34.22	8	17.11	45.50	3.50	{0; 0.5}
R2-13-8-4.50	13	34.22	8	17.11	58.50	4.50	{0; 0.5}
R2-13-12-2.95	13	34.22	12	17.11	38.30	2.95	{0; 0.5}
R2-13-12-3.50	13	34.22	12	17.11	45.50	3.50	{0; 0.5}
R2-13-12-4.50	13	34.22	12	17.11	58.50	4.50	{0; 0.5}
R2-19-8-3.50	19	50.00	8	30.00	66.50	3.50	{0; 0.5}
R2-19-8-4.50	19	50.00	8	30.00	85.50	4.50	{0; 0.5}
R2-19-12-2.95	19	50.00	12	30.00	56.00	2.95	{0; 0.5}
R2-19-12-3.50	19	50.00	12	30.00	66.50	3.50	{0; 0.5}
R2-19-12-4.50	19	50.00	12	30.00	85.50	4.50	{0; 0.5}
R2-25-8-2.95	25	65.80	8	39.50	73.70	2.95	{0; 0.5}
R2-25-8-3.50	25	65.80	8	39.50	87.50	3.50	{0; 0.5}
R2-25-8-4.50	25	65.80	8	39.50	112.50	4.50	{0; 0.5}
R2-25-12-2.95	25	65.80	12	39.48	73.70	2.95	{0; 0.5}
R2-25-12-3.50	25	65.80	12	39.48	87.50	3.50	{0; 0.5}
R2-25-12-4.50	25	65.80	12	39.48	112.50	4.50	{0; 0.5}

### 3.2 Influenza dei parametri geometrici

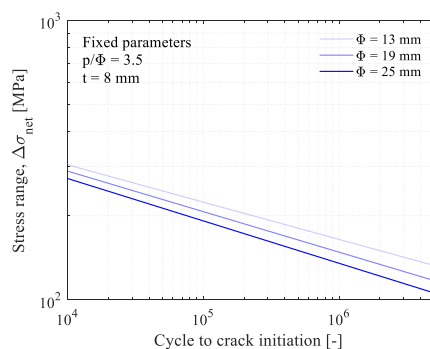
Al fine di investigare l'effetto dell'interspazio tra i chiodi, tre valori del parametro  $p/\Phi$  sono stati adottati: 2.95, 3.50 e 4.50. Fig. 5 mostra le regressioni delle curve di fatica all'innesco ottenute per alcuni casi analizzati. In particolare, Fig. 5(a) mostra i risultati per i casi studio del tipo R2-19-8, mentre Fig. 5(b) si riferisce ai casi R2-25-12, al variare dei passi considerati. Dai risultati si vede come con un diametro del chiodo e uno spessore del piatto minore, l'aumento del passo ha un effetto benefico sull'innesco della cricca. Al contrario, una diminuzione della resistenza a fatica è osservata per i casi caratterizzati da diametro e spessore dei piatti maggiore. L'effetto opposto che si ha nei due casi può essere ricondotto al differente rapporto che sussiste tra la rigidità assiale del piatto e la rigidità a taglio del chiodo, per cui la ripartizione delle tensioni in corrispondenza del foro avviene in maniera più uniforme nel primo caso (Fig. 5(a)).

L'influenza del diametro del chiodo è stata valutando ipotizzando chiodi di diametro pari a 13, 19 e 25 mm. Fig. 6 mostra le regressioni lineari dei risultati per i casi studio con fissati valori del rapporto  $p/\Phi$  e spessore del piatto  $t$ . Come si può osservare, la condizione migliore per l'innesco del danno da fatica è rappresentata dal diametro minore.

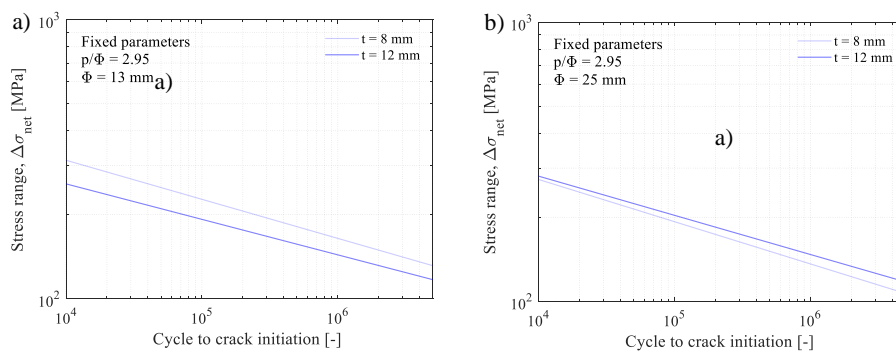
L'influenza che lo spessore dei piatti collegati ha sull'innesco della cricca per fatica è mostrata in Fig. 7, la quale riporta i risultati di alcuni casi studio caratterizzati dallo stesso rapporto  $p/\Phi$  e dallo stesso valore di diametro del chiodo. Le figure mostrano un miglioramento del comportamento a fatica nel caso di diametro piccolo (13 mm, Fig. 7(a)), mentre la condizione opposta si ha per un diametro maggiore (25, Fig. 7(b) mm).



**Fig. 5.** Influenza dell'interasse tra i chiodi per i casi studio (a) R2-19-8 e (b) R2-25-12.



**Fig. 6.** Influenza del diametro del chiodo.

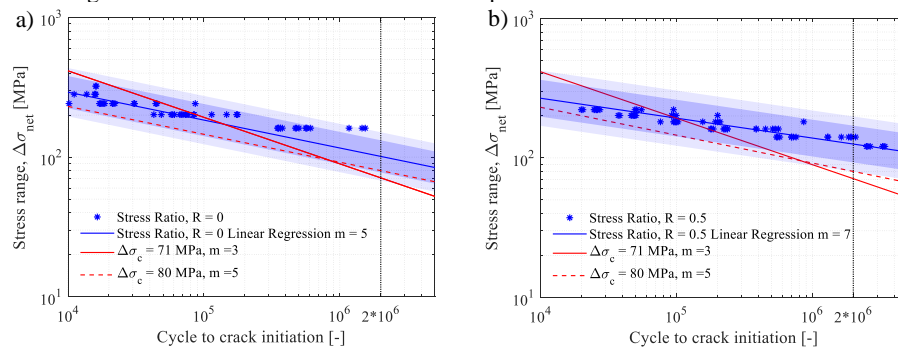


**Fig. 7.** Influenza dello spessore del piatto per i casi studio con diametro (a) 13 mm e (b) 25 mm.

### 3.3 Influenza del rapporto di carico

L'influenza del rapporto tra la tensione minima e massima dell'intervallo di sollecitazione tensoriale (*i.e.*,  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ), è investigato considerando due valori (*i.e.*, 0 e 0.5) e lasciando invariata la tensione massima (i casi con  $R = 0.5$  sono caratterizzati da tensione media maggiore e ampiezza di sollecitazione minore rispetto ai casi con  $R = 0$ ). Fig. 8 mostra i risultati numerici ottenuti

per i due valori del rapporto R. Fig. 8(a) mostra i risultati caratterizzati da R pari a 0, mentre Fig. 8(b) raggruppa i risultati con R uguale a 0.5. La regressione dei risultati numerici è stata eseguita fissando una pendenza pari a 5 e 7, rispettivamente per i due casi. Le aree campite rappresentano gli intervalli di confidenza delle regressioni al 95% e al 99%. In aggiunta, le figure contengono anche le curve di fatica attualmente proposte:  $\Delta\sigma_c = 71$  e  $m = 3$  secondo l'Eurocodice [3], e  $\Delta\sigma_c = 80$  e  $m = 5$  secondo i dettagli proposti da Taras et al., [5]. Infine, il numero di cicli utilizzato per valutare la resistenza a fatica (*i.e.*,  $2 \cdot 10^6$ ) è evidenziato con una linea tratteggiata. Come si può osservare dai grafici, in entrambi i casi il numero di cicli medio (linea blu) necessario alla fase di innesco ottenuto numericamente supera entrambe le curve di fatica attualmente utilizzate nel campo di interesse (*e.g.*,  $N > 500.000$  per i ponti). Una sintesi dei dati osservati, con riferimento ai limiti degli intervalli di confidenza considerati è riportata in Tabella 2.



**Fig. 8.** Influenza del rapporto di carico R: (a) R pari a 0; (b) R pari a 0.5.

**Tabella 2.** Previsione del numero di cicli per l'innesco al variare di R.

R	m	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa] (inferiore, 95%)	$\Delta\sigma_c$ [MPa] (inferiore, 99%)
0	5	101	77	67
0.5	7	125	92	78

#### 4 CONCLUSIONI

Il presente lavoro studia il comportamento a fatica di unioni chiodate caratterizzate da doppio piano di taglio e quattro chiodi disposti su una fila singola. Lo scopo principale del lavoro è valutare l'influenza di alcuni parametri geometrici e del rapporto tra le sollecitazioni minime e massime sul comportamento a fatica delle stesse. Un modello numerico agli elementi finiti è stato sviluppato in ABAQUS e Fe-Safe sulla base di prove sperimentali di letteratura per valutare il numero di cicli necessario ad innescare un difetto per fatica, fase predominante nelle connessioni considerate. I risultati numerici preliminari evidenziano una dipendenza sul comportamento a fatica dei parametri investigati e consentono di fare le seguenti osservazioni: 1) i parametri geometrici influenzano la fase di innesco dei difetti per fatica nelle unioni chiodate e pertanto hanno una influenza sulla loro resistenza a fatica; 2) i rapporti di carico influenzano la vita a fatica e, in particolare, tutti i casi analizzati sono caratterizzati da un numero di cicli necessari all'innesco superiore a quello fornito dalle attuali curve di fatica proposte dalla normativa e dalla letteratura.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Oehme, P., Schäden an Stahltragwerken – eine Analyse (Damage Analysis of Steel Structures), *IABSE Proceedings P-139/89*, 1989
- [2] Kühn, B., Lukić M., Nussbaumer, A., Günther, H.-P., Helmerich, R., Herion, S., Kolstein, M.H., Walbridge, S., Androic, B., Dijkstra, O., Bucak, Ö., Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, *JRC Scientific and Technical Reports – ECCS European Commission*, 2008
- [3] -EN 1998-1, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, *European Committee for Standardization, Brussels*
- [4] Nussbaumer, A., Borges, L., Davaine, L., Fatigue design of steel and composite structures, *European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)*, 2018
- [5] Taras, A., Greiner, R., Development and Application of a Fatigue Class Catalogue for Riveted Bridge Components, *Structural Engineering International*, 2009
- [6] DiBattista J.D., Adamson D.E.J., Kulak, G.L., Fatigue Strength of Riveted Connections, *Journal of Structural Engineering*, 124(7), 792-797, 1998
- [7] Parola, J.F., Chesson, E., Munse, W.H., Effect of bearing pressure on fatigue strength of riveted connections, *Engineering Experiment Station, Bulletin 481*, 1965
- [8] Sire, S., Caiza, P.D.T., Espion, B., Ragueneau, M., Contribution to the study of the influence of the stress ratio on the high cycle fatigue behaviour of riveted joints, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43:3027-3036, 2020.
- [9] Lippi, F., Salvatore, A., Braconi, A., Finetto, M., Wenzel, H., De Roeck, G., Peeters, B., Konke, C., Zabel, V., Cunha, A., Fatigue Damage Control and Assessment for Railway Bridge – FADLESS, *Research Fund for Coal and Steel, Directorate-General for Research and Innovation, Grant Agreement RFSR-CT-2009-00027*, 1 July 2009 to 30 June 2012
- [10] Collin, P., Hällmark, R., Habermehl-Cwirzen, K., Rebelo, C., Correia, J.A., Pedrosa, B., Gervasio, H., Nunez Moreno, E., TiDabolt, M., Rademacher, D., Vesteman, V., Pedersen, C., Möller, M., Collin, P., Geier, R., Ivanov, S., Pipinato, A., Hesselink, B., Gelderblom, R., Van Der Burg, M., Steenbrink, A., Prolonging Life Time of Old Steel and Steel-Concrete Bridges – PROLIFE, *Research Fund for Coal and Steel, Directorate-General for Research and Innovation, Grant Agreement RFSR-CT-2015-00025*, 1 July 2015 to 30 August 2018
- [11] Da Silva, A.L.L., Advanced methodologies for the fatigue analysis of representative details of metallic bridges, *PhD Thesis, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia*, 2015
- [12] Correia, J.A.F., An integral probabilistic approach for fatigue lifetime prediction of mechanical and structural components, *PhD Thesis, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia*, 2014
- [13] Pedrosa, B., Correia, J.A.F.O., Rebelo, C., Lesiuk, G., De Jesus, A.M.P., Fernandes, A.A., Duda, M., Calçada, R., Veljkovic, M., Fatigue resistance curves for single and double shear riveted joints from old Portuguese metallic bridges, *Engineering Failure Analysis*, 96, 255-273, 2019
- [14] ABAQUS – Analysis User’s Manual Version 6.21, Abaqus Inc., 2021
- [15] Dassault, FE-SAFE 2021 User’s Manual, 2021
- [16] Morrow, J.D., Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, *International Friction, Damping and Cyclic Plasticity, ASTM, STP378*, pp.45-87, 1965

**KEYWORDS**

Steel Bridge, Riveted Connection, Fatigue Strength, S-N Curve, Finite Element Model.