



# Duttilità e resistenza al degrado oligo-ciclico di connessioni nelle strutture in legno

Daniele Casagrande<sup>a</sup>, Stefano Bezzi<sup>b</sup>, Giuseppe D'Arenzo<sup>c</sup>, Andrea Polastri<sup>a</sup>, Massimo Fragiaco<sup>d</sup>, Maurizio Piazza<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Istituto di Bioeconomia - Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IBE), via Biasi 75, 38010 San Michele all'Adige (Italy)

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile Meccanica e Ambientale, Università di Trento, via Mesiano 77, 38123 Trento (Italy)

<sup>c</sup> Università degli Studi di Enna "Kore"- Cittadella Universitaria 94100 Enna (Italy)

<sup>d</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale, Università di L'Aquila, Via Giovanni Gronchi 18 - Zona industriale di Pile, 67100 L'Aquila (Italy)

*Keywords: fatica oligociclica, degrado di resistenza, duttilità, prove cicliche*

## ABSTRACT

The capacity of timber connections to undergo plastic deformations limiting the strength degradation in fully reversed low-cycle tests represent a fundamental requirement to ensure large amounts of energy dissipation in timber structures in case of seismic event. Although the current Standard documents for the seismic design of timber structures (NTC18 and Eurocode 8) express the seismic demand for dissipative connections in terms of both ductility and impairment of strength, the European Standard for cyclic testing of joints made with mechanical fasteners (EN12512) does not provide a unique and detailed data processing method to calculate the low-cycle fatigue strength of joints. This paper presents a new proposal for the calculation of the ductility capacity of timber connections, taking into account in the determination of ultimate condition a fixed limit value of the impairment of strength between the 1st and the 3rd cycle. The proposal will be developed by integrating the current procedure of EN12512. The Equivalent Energy Elasto Plastic method reported in ASTM E2126 will be proposed as an alternative method for the evaluation of the yield deformation. The results obtained from cyclic tests within an experimental programme carried out on screwed and dowelled timber-to-timber connection as well as hold-downs will be analysed according to the new proposal. The relationship between ductility capacity and strength degradation for the tested connections will be presented and critically discussed.

## 1 INTRODUZIONE

La dissipazione energetica nelle costruzioni in legno in caso di terremoti di elevati intensità è tipicamente affidata ai collegamenti mediante lo snervamento dei connettori metallici a gambo cilindrico. Le zone dissipative sono per tanto localizzate nelle unioni meccaniche mentre le membrature lignee, a causa della natura intrinsecamente fragile del materiale legno, devono essere considerate a comportamento elastico.

Al fine di garantire una risposta sismica delle strutture in legno coerente con la classe di duttilità prescelta in fase di progettazione, le connessioni nelle zone dissipative sono progettate al fine di esibire un'adeguata resistenza a fatica oligociclica. La capacità delle connessioni di deformarsi in campo plastico (duttilità), mantenendo valori di

resistenza quasi costanti a cicli ripetuti di carico (resistenza al degrado oligociclico), rappresenta infatti un requisito fondamentale al fine di garantire elevati livelli di dissipazione energetica nelle strutture lignee.

Le normative vigenti inerenti alla progettazione sismica delle costruzioni in legno, NTC18 (2018) e Eurocodice 8 (2013), definiscono i requisiti minimi in termini di resistenza a fatica oligociclica delle connessioni dissipative, in relazione sia alla duttilità che alla riduzione di resistenza al degrado.

Il comportamento ciclico delle connessioni dissipative nelle strutture in legno è generalmente determinato mediante prove sperimentali che prevedono l'esecuzione di tre cicli ad inversione completa secondo livelli crescenti di scorrimento, in accordo alla norma europea EN12512 (2001).

All'interno di tale norma non viene riportato tuttavia un metodo specifico per la determinazione

della resistenza a fatica oligociclica delle connessioni. Duttilità e degrado sono infatti considerati come parametri indipendenti, senza un riferimento specifico a quanto richiesto all'interno delle NTC18 (2018) e dall' Eurocodice 8 (2013).

Per tale ragione, anche in relazione al processo di revisione dell' Eurocodice 8 condotto dal Project Team PT8.2 sotto la supervisione del Working Group WG3 "Timber" del CEN TC250/SC8 (Follesa et al., 2018), il presente articolo presenta una proposta per la revisione della procedura contenuta nella norma EN12152 (2001). La proposta si basa sulla definizione di un metodo univoco per la valutazione della resistenza a fatica oligociclica delle connessioni, mediante una correlazione fra duttilità e degrado di resistenza.

A supporto di tale proposta sono discussi ed analizzati i risultati ottenuti da una campagna di prove sperimentali su differenti tipologie di connessioni.

## 2 DOMANDA E CAPACITA' DELLA RESISTENZA A FATICA OLIGOCICLICA

### 2.1 La domanda della resistenza fatica oligociclica secondo le NTC18 e l' Eurocodice 8

La domanda in termini di resistenza a fatica oligociclica per le connessioni dissipative nelle strutture in legno è definita al punto §7.7.3.1 delle NTC18 (2018) e al punto §8.8.3 dell' Eurocodice 8 (2013). In caso di progettazione dissipativa della struttura, è espressamente richiesto infatti che *"le zone considerate dissipative devono essere progettate al fine di deformarsi plasticamente per almeno tre cicli ad inversione completa con un rapporto di duttilità statica pari a 4, per le strutture in classe di duttilità media (CD "B"), e pari a 6, per le strutture in classe di duttilità alta (CD "A") senza che si verifichi una riduzione della loro resistenza maggiore del 20%"*.

Se per quanto riguarda la duttilità non esiste alcun dubbio sul procedimento volto alla sua determinazione e riportato all'interno della versione attuale della EN12512 (2001), l'interpretazione in merito al concetto di *"riduzione di resistenza"* risulta essere non completamente univoca.

E' importante notare infatti che, se per le connessioni in legno il degrado di resistenza oligociclico viene generalmente valutato come riduzione del carico fra il primo ed il terzo ciclo

allo stesso livello di scorrimento  $\Delta F_{1-3}$ , Figura 1, il medesimo approccio non è applicato per la valutazione del degrado di resistenza delle componenti strutturali di altri materiali.

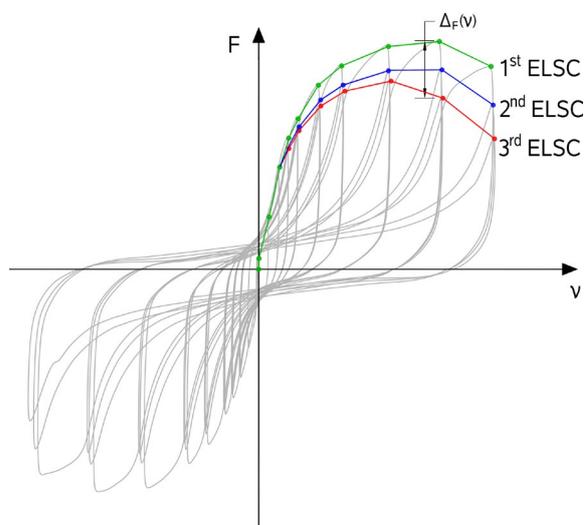


Figura 1. Prove cicliche su connessioni in legno. valutazione del degrado di resistenza come riduzione del carico fra 1° e 3° ciclo

Per i nodi trave-colonna in acciaio, ad esempio, i test ciclici sono generalmente effettuati mediante cicli singoli ad inversione completa secondo livelli di scorrimento crescente. Il degrado di resistenza oligociclica viene definito con riferimento alla riduzione di carico rispetto ad un valore nominale di resistenza (ANSI/AISC 341-10, 2010), determinato attraverso delle procedure di calcolo presenti nei vari documenti normativi. La condizione ultima del comportamento ciclico dei nodi in acciaio è altresì valutata facendo riferimento ad un valore limite del carico raggiunto nella fase di "post-picco" (softening) della curva di involuppo ciclica e pari all'80% del valore nominale di resistenza.

Un approccio simile è in realtà adottato nella stessa EN12512 (2001) per la valutazione delle condizioni ultime delle connessioni nelle strutture in legno. E' importante precisare come in questo caso, tuttavia, venga fatto riferimento non tanto alla riduzione di carico rispetto ad una prefissata resistenza nominale ma quanto alla riduzione della forza massima raggiunta dalla stessa curva di involuppo.

### 2.2 Valutazione della duttilità e del degrado di resistenza secondo la EN12512

La valutazione della capacità in termini di duttilità e degrado di resistenza delle connessioni dissipative viene effettuata mediante prove cicliche in accordo alla norma EN12512 (2001).

Due differenti procedure, “completa” e “ridotta”, sono previste per l’esecuzione dei test: la procedura “completa” prevede l’esecuzione di gruppi di tre cicli ad inversione completa, effettuati per il medesimo valore di scorrimento, ad ampiezza di scorrimento crescente; la procedura “ridotta” è caratterizzata al contrario da un singolo gruppo di tre cicli ad una prefissata ampiezza di scorrimento. L’ampiezza di ciascun gruppo di tre cicli viene definita in relazione ad un valore di scorrimento di snervamento  $v_{y,est}$  stimato in base a calcoli analitici, prove di tipo monotone o in relazione all’esperienza dell’operatore. Nessuna indicazione è riportata tuttavia in merito alla scelta della procedura di prova né per il metodo di valutazione dello scorrimento di snervamento  $v_{y,est}$  da utilizzare per la definizione del protocollo di prova per i test ciclici.

La duttilità  $\mu$  è definita all’interno della EN12512 (2001) come il rapporto fra lo scorrimento ultimo  $v_u$  e lo scorrimento a snervamento  $v_y$ , eq.1, valutati con riferimento alla curva di inviluppo carico-scorrimento riferita al 1° ciclo (1<sup>st</sup> Envelope Load-Slip Envelope Curve – 1st ELSC).

$$\mu = \frac{v_u}{v_y} \quad (1)$$

Lo scorrimento ultimo  $v_u$  è ottenuto come il valore di scorrimento minimo fra quelli facenti riferimento a: *i*) la rottura della connessione, *ii*) una riduzione pari al 20% del carico nel tratto post-picco della curva di inviluppo riferita al solo 1° ciclo, *iii*) 30 mm.

Per il calcolo dello scorrimento a snervamento,  $v_y$ , sono previsti due differenti metodi in relazione al fatto che sulla curva di inviluppo carico-scorrimento possano essere individuati o meno due tratti lineari ben distinti. In caso affermativo,  $v_y$  è semplicemente definito dall’intersezione dei due tratti (metodo *a*). In caso contrario  $v_y$  è ottenuto dall’intersezione della retta “elastica”, passante per i punti sulla curva relativi rispettivamente al 10% ed al 40% del carico massimo, e la retta tangente alla curva di inviluppo (retta plastica) avente una pendenza pari ad 1/6 di quella della retta elastica (metodo *b*), Figura 2.

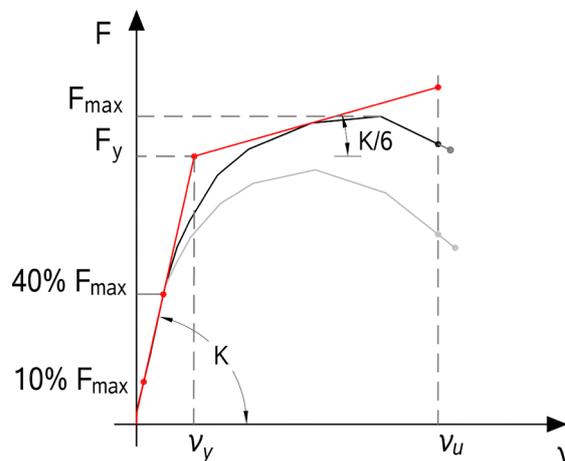


Figura 2. Metodo b della EN12512 per il calcolo dello scorrimento a snervamento  $v_y$  con riferimento alla curva di inviluppo carico-scorrimento riferita al 1° ciclo

Il degrado di resistenza  $\Delta F_{1-3}$ , è definito come la riduzione in termine di resistenza tra il primo ed il terzo ciclo ad uno stesso livello di scorrimento  $v$  per ciascun gruppo di tre cicli, così come riportato nell’eq.2 ed evidenziato precedentemente in Figura 1.

$$\Delta F_{1-3}(v) = F_1(v) - F_3(v) \quad (2)$$

In relazione alle procedure di esecuzione di prova e di analisi dei risultati riportati all’interno della EN12512 (2001), è possibile evidenziare le seguenti criticità:

- la possibilità di adottare due differenti procedure di prova (“corta” e “completa”) senza una chiara specifica sulla scelta delle stesse, può portare ad una differenza significativa dei valori di duttilità e riduzione di resistenza;

- la valutazione dello scorrimento a snervamento  $v_y$  è basata su due differenti procedure, in relazione alla presenza o meno di due tratti ben distinti sulla curva di inviluppo carico-scorrimento del 1° ciclo. Anche per tale aspetto, il risultato potrebbe essere dunque influenzato dal metodo adottato;

- all’interno della versione attuale della EN12512 (2012), non viene fatto alcun riferimento specifico al requisito in termini di duttilità e riduzione di resistenza come richiesto dalle NTC18 (2018) e dall’Eurocodice 8 (2013);

- duttilità  $\mu$  e degrado di resistenza  $\Delta F_{1-3}$  sono definiti in maniera indipendente. Non viene per tanto stabilito un metodo univoco per la valutazione della resistenza a fatica oligociclica tale da correlare la capacità delle connessioni di deformarsi in campo plastico ad un valore limite del degrado di resistenza.

### 3 UNA PROPOSTA PER LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A FATICA OLIGOCICLICA

In relazione alle criticità presenti nell'attuale versione della EN12512 (2001), all'interno di questo lavoro è presentata una nuova proposta per la valutazione della resistenza a fatica oligociclica delle connessioni nelle strutture in legno.

Si definisce innanzitutto come fattore di degrado  $\eta_{deg}$ , ad una determinata ampiezza dello scorrimento  $v$ , il rapporto fra il valore del carico  $F_3(v)$ , relativo alla curva di involucro riferita al 3° ciclo, ed il valore del carico  $F_1(v)$  relativo alla curva di involucro del 1° ciclo, come riportato nell'eq. 4. La relazione fra fattore di degrado  $\eta_{deg}$  e l' ampiezza dello scorrimento  $v$  è generalmente di tipo decrescente come mostrato in Figura 3.

$$\eta_{deg}(v) = \frac{F_3(v)}{F_1(v)} \leq 1 \quad (4)$$

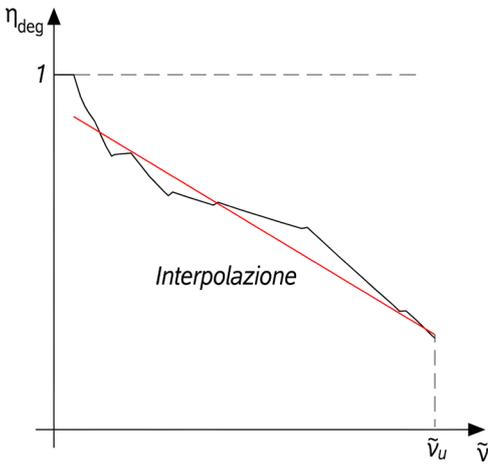


Figura 3. Rappresentazione del fattore del degrado di resistenza  $\eta_{deg}$  e valore di scorrimento

Per la determinazione dello scorrimento ultimo si propone di considerare il degrado di resistenza come condizione aggiuntiva a quelle già presenti nella EN12512. Più precisamente, si propone che il valore dello scorrimento ultimo da considerare nel calcolo della duttilità della connessione  $v_{u,deg}$  sia determinato come il valore minimo fra lo scorrimento ultimo  $v_u$  ottenuto dai tre criteri già presenti all'interno della EN12512 ed il valore di scorrimento per cui si raggiunge un valore limite del fattore di degrado di resistenza  $\eta_{deg,lim}$ , come espresso nell'eq. 5 e mostrato in Figura 4.

$$v_{u,deg} = \min[v_u; v(\eta_{deg} = \eta_{deg,lim})] \quad (5)$$

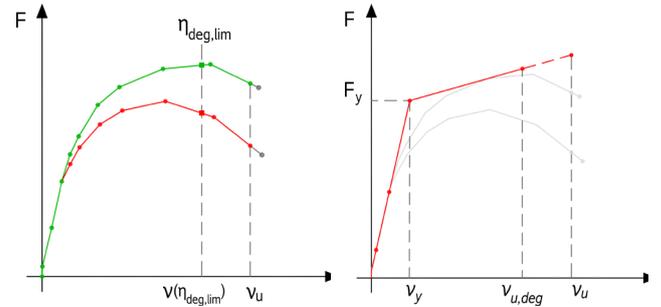


Figura 4. Determinazione scorrimento ultimo  $v_{u,deg}$

Coerentemente con quanto effettuato per i giunti in acciaio nella ANSI/AISC 341-10 (2010), si propone inoltre di verificare che il valore di resistenza della curva di involucro riferita al 1° ciclo in corrispondenza dello scorrimento  $v_{u,deg}$  sia maggiore dell'80% del valore nominale di resistenza della connessione,  $F_N$ , definita da un test monotono precedente o da formulazioni analitiche. Si definisce a questo proposito, un parametro adimensionale  $\tilde{f}_{deg}$ , come riportato in eq.6 e mostrato in Figura 5a.

$$\tilde{f}_{deg}(v_{deg}) = \frac{F_1(v_{deg})}{F_N} \geq 0.8 \quad (6)$$

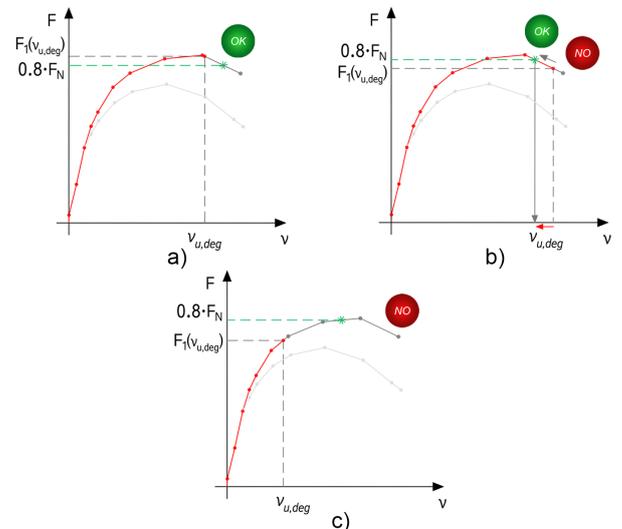


Figura 5. Verifica della condizione riportata nell'eq. 6

Nel caso in cui l'eq.6 non sia rispettata, il valore di  $v_{u,deg}$  può essere ridotto come illustrato in Figura 5b. Se l'eq.6 non è soddisfatta per nessun valore dell'ampiezza di scorrimento, Figura 5c, la resistenza oligo-ciclica della connessione non dovrebbe essere considerata adeguata per essere utilizzata come componente dissipativa.

Definito lo scorrimento  $v_{u,deg}$  in accordo all'eq. 5, e soddisfatta la condizione riportata nell'eq. 6, si procede al calcolo della duttilità  $\mu_{deg}$  come riportato nell'eq. 7.

$$\mu_{deg} = \frac{v_{u,deg}}{v_y} \quad (7)$$

### 3.1 Un nuovo metodo di valutazione della resistenza oligo-ciclica all'interno della EN12512

La determinazione della duttilità secondo la proposta riportata nel capitolo precedente, può essere articolata nei seguenti punti con specifico riferimento alla norma EN12512:

1. Esecuzione di una prova monotona. Calcolo dello scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  unicamente secondo il metodo *b* della EN12512. Valutazione della resistenza nominale  $F_N$  pari al valore massimo del carico ottenuto dalla prova monotona per valori dello scorrimento inferiori a 15 mm (in accordo a quanto riportato nella EN26891).
2. Esecuzione di una prova ciclica secondo un protocollo facente riferimento al valore dello scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  ottenuto dalla prova monotona. Definizione delle curve di inviluppo carico-scorrimento al 1° e al 3° ciclo (ELSCs).
3. Valutazione dello scorrimento ultimo  $v_u$  secondo i criteri attuali della norma EN12512 (criteri *i*, *ii* e *iii* riportati alla sezione 2.1). Valutazione dello scorrimento a snervamento  $v_y$  in accordo al metodo *b* della EN12512.
4. Calcolo dello scorrimento ultimo  $v_{u,deg}$  tenendo conto del degrado oligo-ciclico fra primo e terzo ciclo secondo l'eq. 5.
5. Verifica della condizione inerente alla resistenza della connessione in corrispondenza allo scorrimento ultimo  $v_{u,deg}$ , secondo l'eq. 6.
6. Calcolo della duttilità  $\mu_{deg}$  come riportato nell'eq. 7.

### 3.2 Il metodo EEEP come alternativa per la determinazione dello scorrimento a snervamento:

Con il fine di effettuare un confronto fra differenti metodi di valutazione dello scorrimento a snervamento  $v_y$ , i risultati di un'estesa campagna sperimentale realizzata presso il Laboratorio di Prove Meccaniche dell'Istituto di Bioeconomia del CNR sono stati analizzati facendo riferimento sia al metodo *b* della EN12512 (2001) sia al

metodo proposto all'interno della ASTM E2126 (2018). Quest'ultimo metodo si basa sulla definizione di una curva elasto-perfettamente plastica secondo il metodo dell'energia equivalente (*Equivalent Energy Elasto Plastic – EEEP*). Lo scorrimento a snervamento  $v_y$  è definito in tale metodo come l'intersezione fra la retta elastica, ottenuta congiungendo l'origine con il punto della curva di inviluppo al 1° ciclo caratterizzato da un valore del carico pari al 40% della forza massima, e la retta plastica ottenuta da un'equivalenza delle aree sottese fra curva EEEP e curva di inviluppo al 1° ciclo, per valori di scorrimento inferiori al valore di scorrimento ultimo  $v_u$  (Figura 6).

La procedura di analisi presentata al punto 3.1 può essere infatti applicata anche nel caso di un metodo alternativo alla determinazione di  $v_y$  rispetto a quello proposto dal metodo *b* della EN12512. La valutazione dello scorrimento ultimo  $v_{u,deg}$  è infatti indipendente dalla procedure adottate per la determinazione di  $v_y$ .

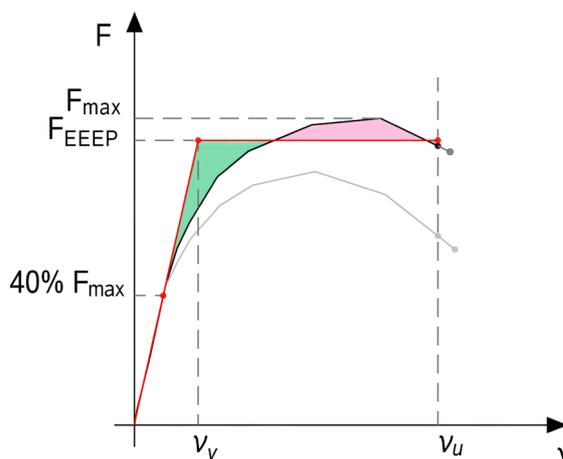


Figura 6. Metodo EEEP per la determinazione dello scorrimento a snervamento  $v_y$ .

## 4 MATERIALE E METODI

### 4.1 Test e set-up

La campagna sperimentale è stata condotta su tre tipologie di connessioni: connessioni legno-legno con viti, connessioni legno-legno con spinotti ed elementi di tipo hold-down. Per tutte e tre le tipologie, gli elementi in legno sono stati realizzati utilizzando pannelli X-Lam a 3 strati, con uno spessore di 100 mm (33V-34H-33V), Figure 7 e 8.

Le caratteristiche geometriche degli elementi di collegamento e dei provini per ciascun test sono riportati in Tabella 1.

I test con viti da legno e spinotti sono stati effettuati su una connessione a due piani di taglio con lunghezze dei connettori rispettivamente pari a 300 mm e 280 mm. Tre differenti diametri, rispettivamente pari a 6, 8 e 10 mm, sono stati utilizzati per i test sulle viti da legno mentre per gli spinotti è stato adottato un diametro pari a 12 mm. Per gli spinotti (SP) e le viti da legno con diametro pari a 10 mm (VL\_10) è stata eseguita una prova ciclica. Per le viti da legno di diametro pari a 6 (VL6) e 8 mm (VL8) sono state condotte due prove cicliche variando, come descritto in seguito, l'ampiezza dei cicli di carico. I collegamenti con hold-down sono stati realizzati utilizzando chiodi anker 4x60mm con uno spessore della piastra in acciaio pari a 3 mm. Un numero di chiodi pari a 20, 30 e 45 è stato adottato rispettivamente nei test HD\_AN\_2, HD\_AN\_1 e HD\_AN\_3.

I test sono stati effettuati presso il Laboratorio di Prove Meccaniche dell'Istituto CNR di Bioeconomia (CNR-IBE).

Tabella1: caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini adottati nella campagna sperimentale

Test	Connettori	Elemento 1	Elemento 2
VL6_1	VL - 6 x 300 mm -n.5 - sp: 160 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
VL6_2	VL - 6 x 300 mm -n.5 - sp: 160 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
VL8_1	VL - 8 x 300 mm -n.5 - sp: 160 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
VL8_2	VL - 8 x 300 mm -n.5 - sp: 160 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
VL10_1	VL - 10 x 300 mm -n.5 - sp: 160 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
SP_1	SP - 12 x 280 mm -n.5 - sp: 160 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
Test	Connettori	Hold-down	Elemento Ligneo
HD_A N_1	AN - 4 x 60 mm -n.30 - sp: 20 mm	2 Hold-down - S275 - t: 3 mm - 440x60x63 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
HD_A N_2	AN - 4 x 60 mm -n.20 - sp: 20 mm	2 Hold-down - S275 - t: 3 mm - 440x60x63 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>
HD_A N_3	AN - 4 x 60 mm -n.45 - sp: 20 mm	2 Hold-down - S275 - t: 3 mm - 540x60x63 mm	CLT - t: 100 mm- $\alpha:0^\circ$ - in: $90^\circ$ - $\rho=420$ kg/m <sup>3</sup>

*t*: spessore del pannello X-Lam o della piastra metallica dell'hold-down; *sp*: spaziatura dei connettori;  $\alpha$ : angolo fra la direzione del carico e direzione della fibra della tavola esterna del pannello X-Lam; in: angolo tra l'asse del connettore e direzione della fibra della tavola esterna del pannello X-Lam;  $\rho$ : densità del pannello X-Lam

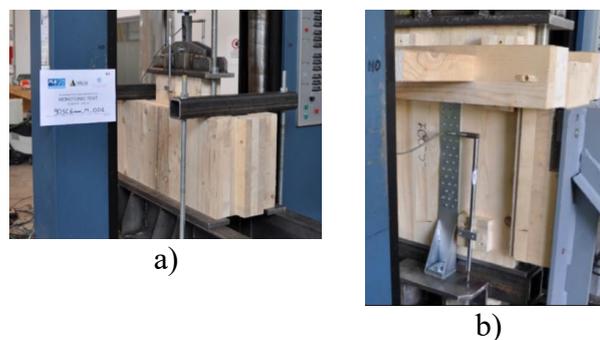


Figura 7. Test VL6\_1 (a) e HD\_45 (b)

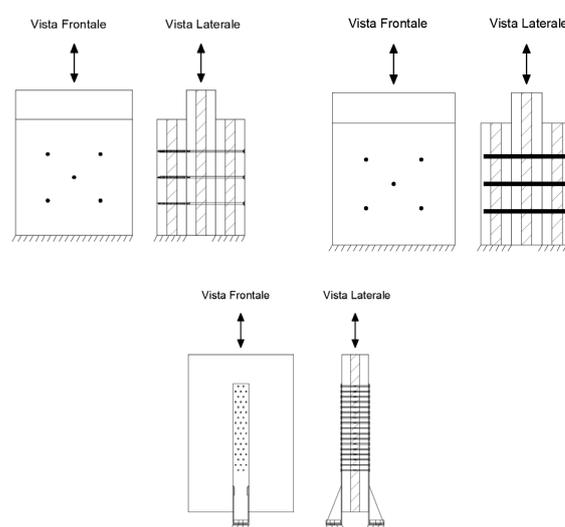


Figura 8. Test set-up per viti, spinotti ed hold-down

#### 4.2 Protocollo di prova

E' stata condotta una prova monotona per ciascuna connessione al fine di determinare lo scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  per l'implementazione del protocollo di prova per il test ciclico, adottando una velocità di prova pari a 0.1 mm/s. Per i test ciclici è stato implementato un protocollo di prova "modificato" rispetto a quello previsto dalla EN12512. Al fine di valutare l'influenza del numero di cicli sul degrado delle connessioni, sono stati introdotti infatti alcuni step di scorrimento aggiuntivi come riportato in Tabella 2.

Tabella2: protocollo di prova EN12512 e EN12512 modificato

Step	EN12512 "modificato"		EN12512	
	N. cicli	Ampiezza ( $v_{y,est}$ )	N. cicli	Ampiezza ( $v_{y,est}$ )
1	1	0.2	1	0.25
2	1	0.4	1	0.50
3	3	0.6	3	0.75
4	3	0.8	3	1.00
5	3	1.0	3	2.00
6	3	1.5	3	4.00
7	3	2.0	3	6.00
8	3	3.0	3	8.00
...	...	...	...	...
n	3	(+1.0)	3	(+2.0)

Per le prove su viti da legno di diametro 6 mm e 8 mm (VL6 e VL8) sono state condotte due prove cicliche considerando due differenti valori dello scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  nell'implementazione del protocollo di prova. Se per i test VL6\_2 e VL8\_2 sono stati considerati i valori di scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  ottenuti dalla prova monotona, per i test VL6\_1 e VL8\_1 si è adottato uno scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  maggiore. Tale scelta è stata effettuata al fine di verificare l'effettiva influenza sulla scelta dello scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  nell'implementazione del protocollo di prove cicliche per connessioni soggette a degrado. I valori di  $v_{y,est}$  adottati per tutti i test sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3: valori dello scorrimento a snervamento  $v_{y,est}$  utilizzato nell'implementazione della prova ciclica.

Test	$v_{y,est}$ [mm]
VL6_1	10
VL6_2	7
VL8_1	8
VL8_2	5
VL10_1	5
SP_1	2
HD_AN_1	7
HD_AN_2	12
HD_AN_3	6

## 5 RISULTATI E DISCUSSIONE

Si riportano in questa sezione i risultati in termini di fattore di degrado e duttilità delle prove cicliche effettuate nella campagna sperimentale.

### 5.1 Determinazione del fattore di degrado di resistenza

Il fattore di degrado  $\eta_{deg}$  è determinato in funzione dell'ampiezza di scorrimento  $v$  per ciascun test secondo come mostrato in Figura 9. Al fine di effettuare un confronto diretto fra le differenti connessioni è stata definita un'ampiezza di scorrimento adimensionale,  $\tilde{v}$  come:

$$\tilde{v} = \frac{v}{v_y} \quad (7)$$

dove  $v_y$  è determinato con riferimento al metodo  $b$  della EN12512.

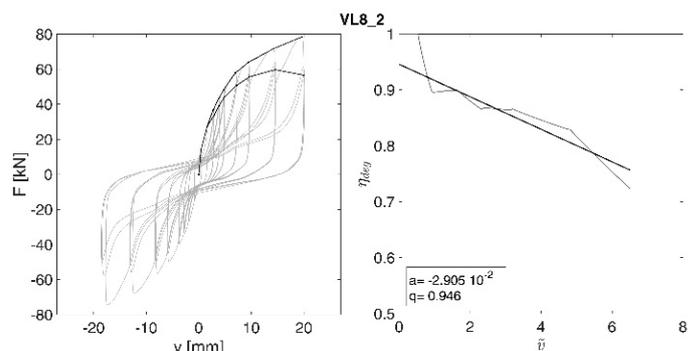


Figura 9. Prova ciclica e fattore di degrado per il test VL8\_2

Poiché dai risultati ottenuti è stato possibile osservare come esista una relazione quasi lineare fra degrado e ampiezza di scorrimento, si è proceduto ad un'interpolazione della funzione  $\eta_{deg}-\tilde{v}$  secondo la seguente espressione:

$$\eta_{deg}(\tilde{v}) = \alpha \cdot (\tilde{v} - 1) + \beta \leq 1; \quad (7)$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono stati ricavati con il metodo dei minimi quadrati e riportati in Tabella 4.

Tabella 4: coefficienti della funzione lineare che descrive la relazione tra il fattore di degrado  $\eta_{deg}$  e l'ampiezza adimensionale  $\tilde{v}$ .

Test	$\alpha (10^{-2})$	$\beta$
VL6_1	-7.55	0.9234
VL6_2	-7.55	0.9102
VL8_1	-3.91	0.9672
VL8_2	-6.19	0.8994
VL10_1	-0.38	0.9095
SP_1	-0.02	0.9426
HD_AN_1	-13.08	0.8790
HD_AN_2	-9.32	0.9153
HD_AN_3	-10.08	0.9270

In figura 10 è riportato l'andamento del fattore di degrado per i test delle connessioni legno-legno con viti e spinotti, evidenziando una forte dipendenza del fattore di degrado dal diametro del connettore. Per le viti con diametro pari a 6 mm, si nota infatti una forte dipendenza del degrado di resistenza con l'ampiezza di scorrimento  $\tilde{v}$ , con valori di  $\alpha(10^{-2})$  pari a -7.55 per i test VL6\_1 e VL6\_2. Al contrario, valori del fattore di degrado superiori a 0.9 con una dipendenza trascurabile dalla l'ampiezza di scorrimento sono stati osservati per le viti con diametro pari a 10 mm. Un valore di  $\alpha(10^{-2})$  è pari a -0.38 per tale tipologia di viti. Un comportamento analogo è stato riscontrato per gli spinotti con valore del fattore di degrado sempre superiore a 0.95.

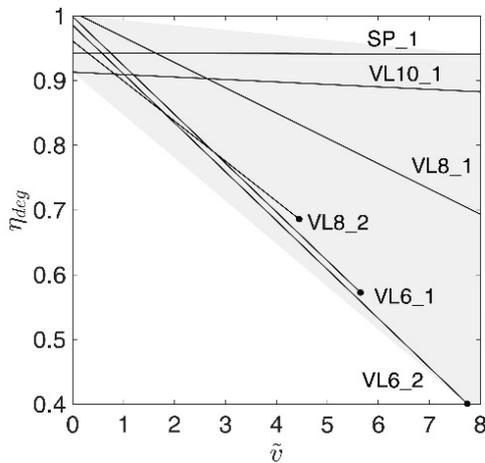


Figura 10. Verifica della condizione riportata nell'eq. 6

Dai valori riportati nella Tabella 1 si può notare anche, che per le viti di diametro pari a 6 mm il degrado non è influenzato dal valore dello scorrimento di snervamento  $v_{y,m}$  scelto per definire il protocollo di prova ciclico. Al contrario per le viti di diametro pari a 8 mm il degrado è fortemente influenzato dallo scorrimento di snervamento  $v_{y,m}$ .

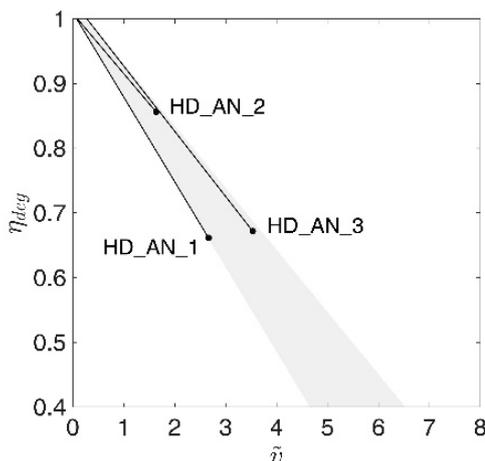


Figura 11. Verifica della condizione riportata nell'eq. 6

In figura 11 è riportato l'andamento del fattore di degrado per i test eseguiti sugli hold-down con valori del coefficiente  $\alpha(10^{-2})$  compresi tra 9.32 e 13.08.

### 5.2 Relazione tra fattore di degrado e duttilità

In questa sezione vengono riportati i valori di duttilità ricavati secondo la procedura riportata nel capitolo 3, tenendo conto del degrado di resistenza nella valutazione dello scorrimento ultimo. Sia il metodo b della EN12512 sia il metodo EEEP sono stati considerati nel calcolo dello scorrimento a snervamento  $v_y$  per la determinazione della duttilità  $\mu_{deg}$ . Le analisi sono state effettuate considerando due differenti valori per il fattore limite di degrado  $\eta_{deg,lim}$ , rispettivamente pari a 0.7 e 0.8, come riportato in Tabella 5. Al fine di

effettuare un confronto diretto con la procedura attuale della EN12512, la duttilità è stata valutata anche per il caso in cui il valore limite del fattore di degrado  $\eta_{deg,lim}$  non è tenuto in conto (w/o) nella valutazione dello scorrimento ultimo.

Tabella 5: Valori di duttilità  $\mu_{deg}$  secondo il metodo b della EN12512 ed il metodo EEEP

Test	$\mu_{deg}$					
	Metodo b EN12512 §3.1			Metodo EEEP §3.2		
	w/o	$\eta_{deg,lim}$		w/o	$\eta_{deg,lim}$	
		0.7	0.8		0.7	0.8
VL6_1	5.65	4.26	2.47	4.35	3.28	1.90
VL6_2	7.74	3.82	2.23	5.66	2.79	1.63
VL8_1	9.92	7.35	5.93	6.94	5.13	4.14
VL8_2	4.45	4.13	2.64	3.61	3.35	2.14
VL10_1	11.36	11.36	9.64	7.85	7.85	6.66
SP_1	18.26	18.26	18.26	14.84	14.84	14.84
HD_AN_1	2.43	2.03	1.76	2.31	1.94	1.69
HD_AN_2	1.64	1.64	1.64	1.65	1.65	1.65
HD_AN_3	3.35	2.82	2.46	2.97	2.49	2.18

Sia per il metodo b della EN12512 che per il metodo EEEP le connessioni con viti da legno mostrano un calo significativo della duttilità considerando o meno il degrado di resistenza nella determinazione dello scorrimento ultimo. Considerando infatti un valore di  $\eta_{deg,lim}$  pari a 0.8 (coerentemente con l'attuale versione dell'Eurocodice 8), la duttilità passa da 5.65 e 7.74 a 2.47 e 2.23 rispettivamente per i test VL6\_1 e VL6\_2 secondo il metodo EN12512. Una variazione inferiore, seppur ancora significativa, è stata considerata per le viti con diametro pari a 8 mm (da 9.92 a 5.93 per il test VL8\_1) mentre le viti con diametro 10 mm hanno evidenziato un'interazione trascurabile fra duttilità e degrado (si passa infatti da 11.36 a 9.64 per il test VL10\_1) in relazione del ridotto degrado di resistenza evidenziato nelle prove cicliche anche per ampiezze di scorrimento significative. Anche per gli spinotti, in relazione ad un degrado pressoché nullo in campo plastico, il valore di duttilità è indipendente del fattore di degrado  $\eta_{deg,lim}$ .

Per quanto riguarda gli hold-down, non si nota una sostanziale influenza del degrado sul calcolo della duttilità. Tuttavia, al contrario dei collegamenti realizzati con viti o spinotti, i valori di duttilità raggiunti nei test risultano sempre inferiori a 4 anche non considerando il fattore di degrado. Tale risultato è spiegabile dal fatto che, a differenza delle connessioni con viti e spinotti, gli hold-down non riescono a sviluppare ampie deformazioni plastiche. Per tale ragione lo scorrimento ultimo è condizionato dalla rottura

della connessione piuttosto che dal degrado di resistenza.

E' interessante infine notare come il metodo EEEP fornisca sempre valori di duttilità inferiori al metodo b della EN12512, ad eccezione del test HD\_AN\_2 dove è stato ottenuto lo stesso valore di duttilità.

In relazione ai risultati ottenuti dai test, le connessioni testate sono classificate in quattro differenti categorie. Se la connessione è in grado di sviluppare una duttilità maggiore o uguale 6 per un determinato fattore di  $\eta_{deg,lim}$  è considerata in *I* categoria mentre se per lo stesso limite del fattore di degrado la duttilità è compresa fra 4 e 6 la connessione è considerata in *II* categoria. Una connessione in grado di raggiungere una duttilità maggiore o uguale a 4 alla sola condizione di non considerare il fattore di degrado (w/o  $\eta_{deg,lim}$ ) è posta in *III* categoria. Le connessioni non in grado di raggiungere una duttilità pari a 4 indipendentemente del valore limite del fattore di degrado sono considerate in *IV* categoria,

Nelle Tabelle 6 e 7 si riporta la classificazione delle connessioni con riferimento al metodo b della EN12512 facendo riferimento ad un valore limite del fattore di degrado  $\eta_{deg,lim}$  pari a 0.8 e 0.7.

Le viti con diametro pari a 10 mm e spinotti possono essere considerate per entrambi valori limite del fattore di degrado in *I* categoria mentre i test su viti con diametro pari a 8 mm VL8\_1 e VL8\_2 subiscono un declassamento di una categoria incrementando il valore limite del fattore di degrado da 0.7 a 0.8. Le viti con diametro da 6 mm sono classificate in *III* categoria ad eccezione del test VL6\_1 che può essere considerato in *II* categoria per un valore di  $\eta_{deg,lim}$  pari a 0.7 anziché 0.8. Nessuno dei tre test su hold-down ha evidenziato valori di duttilità superiori a 4 indipendentemente dal fattore di degrado e per tale ragione sono classificati in *IV* categoria.

Tabella 7: Classificazione tenendo in considerazione un fattore di degrado pari a  $\eta_{deg} = 0.70$ .

IV	III	II	I
HD_AN_1	VL6_2	VL8_2	VL10_1
HD_AN_2		VL6_1	SP_1
HD_AN_3			VL8_1

Tabella 8: Classificazione tenendo in considerazione un fattore di degrado pari a  $\eta_{deg} = 0.80$ .

IV	III	II	I
HD_AN_1	VL6_1	VL8_1	VL10_1
HD_AN_2	VL6_2		SP_1
HD_AN_3	VL8_2		

## 6 CONCLUSIONI

Con il presente lavoro viene presentata una proposta per la valutazione della resistenza oligociclica delle connessioni dissipative nelle strutture in legno. A differenza della procedura contenuta nella versione vigente della EN12512 ma in accordo a quanto riportato nelle NTC18 ed Eurocodice 8, il degrado di resistenza oligociclica è considerato esplicitamente nella valutazione della duttilità delle connessioni, sia in termini di riduzione di carico fra il 1° ed il 3° ciclo sia come riduzione rispetto alla forza nominale della connessione. E' stata condotta una campagna di prove sperimentali su sette differenti tipologie di connessioni al fine di valutare la consistenza metodologica ed applicativa della proposta. La determinazione del fattore di degrado in funzione dell'ampiezza di scorrimento ha permesso una valutazione e comparazione diretta del degrado di resistenza delle connessioni testate. Il calcolo della duttilità secondo differenti valori limiti di degrado di resistenza ha altresì mostrato la correlazione diretta fra tali parametri nella valutazione della resistenza oligo-ciclica della connessioni. E' stato effettuato un confronto in termini di duttilità e degrado oligo-ciclico fra le diverse connessioni testate. Di particolare interesse sono state le analisi condotte sul comportamento ciclico delle viti da legno soggette a taglio, evidenziando un significativo incremento della resistenza oligociclica al crescere del diametro nominale.

## RINGRAZIAMENTI

Le attività di ricerca presentate all'interno del presente articolo sono state finanziate da FederLegnoArredo. Gli autori ringraziano in particolare il dott. Marco Lucchetti per il supporto fornito. Un sentito ringraziamento va a Mario Pinna e a Diego Magnago (CNR IBE), i quali hanno collaborato alla preparazione e all'esecuzione dei test sperimentali.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- American Society Standard Method (ASTM) E2126 - 11(2018) - Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings
- ANSI/AISC 341-10 (2010) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American institute of steel construction.
- Follesa M, Fragiaco M, Casagrande D, Tomasi R, Piazza M, Vassallo D, Canetti D, Rossi S. (2018) The new provisions for the seismic design of timber buildings in Europe. *Eng Struct* 2018;168:736–47.
- NTC18 (2018), DM 17/01/2018, Norme Tecniche per le Costruzioni NTC2018. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Italia 2018.
- EN 1998-1:2004+A1:2013, Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, (2013). Brussels, Belgium: CEN, European Committee for Standardization.
- EN 12512:2001+A1:2005, Timber structures – Test methods – cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. Brussels, Belgium: CEN.
- EN 26891: 1991, Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics