

**ANALISI SPERIMENTALE DI TRAVI IN ALLUMINIO  
SOGGETTE A FLESSIONE NON UNIFORME**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ALUMINIUM BEAMS UNDER  
NON-UNIFORM BENDING MOMENT**

Ciro Esposito, Elide Nastri, Francesco Perri, Vincenzo Piluso, Alessandro Pisapia  
University of Salerno  
Department of Civil Engineering  
Salerno, Italy  
ciesposito@unisa.it, enastri@unisa.it, fperri@unisa.it, v.piluso@unisa.it,  
alpisapia@unisa.it

**ABSTRACT**

An experimental campaign dealing with box aluminium beams subjected to non-uniform bending is presented and discussed. In particular, three-point bending tests have been performed on 12 extruded SHS aluminium beams with different width-to-thickness ratios. The mechanical and geometric properties, the maximum flexural resistance, the rotation capability, and the failure mode are reported in the manuscript. The experimental results are compared with the current European design provisions, given in EN 1999-1-1. The results obtained have shown that the ultimate resistance predicted by the codified provisions given in the general part of EN 1999-1-1 is, generally, on the safe side.

**SOMMARIO**

Una campagna sperimentale condotta su travi in alluminio con sezione scatolare e a doppio T soggette a flessione non uniforme viene presentata e discussa nel presente lavoro. Nello specifico, prove a flessione su tre punti sono state condotte su 12 travi scatolari con differenti rapporti di larghezza-spessore dei piatti. Le proprietà meccaniche e geometriche, la massima resistenza a flessione, la capacità rotazionale e le modalità di rottura sono state riportate all'interno del presente lavoro. I risultati sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti dalle attuali prescrizioni dell'Eurocodice 9. Dal confronto è emerso che le prescrizioni fornite dalla parte generale dell'EN 1999-1-1 sono, generalmente, a vantaggio di sicurezza.

## 1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, l'utilizzo dell'alluminio come materiale strutturale è cresciuto notevolmente, in particolare, nella realizzazione di coperture di grande luce, nelle strutture offshore e nei sistemi prefabbricati [1],[2]. Esso presenta diversi vantaggi: leggerezza, resistenza a corrosione, flessibilità nelle forme strutturali e sostenibilità economica ed ambientale. Nell'ambito delle strutture sismo-resistenti, le leghe in alluminio possono essere impiegate nella realizzazione di elementi dissipativi come: elementi di tipo *link*, smorzatori isteretici e pareti a taglio [3]-[5].

Tuttavia, l'alluminio strutturale è caratterizzato da diversi svantaggi: l'elevato costo iniziale, sensibilità alle variazioni termiche, drastica riduzione della resistenza per effetto delle saldature ed elevata sensibilità ai fenomeni di instabilità. In particolare, uno dei principali problemi di stabilità dei profili in alluminio è relativo ai fenomeni di instabilità locale e distorsionale che influenzano notevolmente il comportamento ultimo delle membrature riducendone la resistenza e la capacità deformativa.

Attualmente, L'Eurocodice 9 [6] tiene conto di tali fenomeni adottando una classificazione delle sezioni trasversali in maniera del tutto analoga a quanto prescritto dall'Eurocodice 3 [7] per le membrature in acciaio. Nello specifico, la resistenza dei profili di quarta classe, affetti dai fenomeni di instabilità locale in campo elastico, è valutato attraverso il metodo dello spessore efficace (ETM). I sopracitati approcci sono basati sull'ipotesi che il materiale abbia un comportamento elastico-perfettamente plastico.

Tuttavia, è ben noto che le attuali prescrizioni forniscono dei valori di resistenza estremamente conservativi rispetto al reale comportamento delle membrature in alluminio in quanto vengono trascurati due aspetti essenziali: 1) il materiale è caratterizzato da un comportamento fortemente incrudente e privo del tipico ramo di *plateau* plastico caratterizzante l'acciaio; 2) L'interazione dei piatti non è portata in conto nella valutazione della resistenza.

Conseguentemente, sono stati condotti molti lavori di ricerca per migliorare l'accuratezza nella predizione della risposta inelastica delle membrature in alluminio soggette a differenti condizioni di carico. Nel presente lavoro, l'attenzione è focalizzata alle travi in alluminio sottoposte a flessione. Dal punto di vista sperimentale, i primi test sono stati condotti da Panlio [8] e Welo [9]. Successivamente, Ophem [10] ha condotto prove a 4 punti su travi di lega 6082-T4. Nel 1999, Moen et al [11] hanno effettuato prove a 3 e 4 punti su travi di sezione scatolare e a doppio T di lega 6082-T4, 6082-T6 e 7108-T7, evidenziando che la capacità rotazionale dipende, fortemente, dal comportamento inelastico del materiale e dall'intensità del momento flettente. Recentemente, Su et al [12] hanno condotto una campagna sperimentale su profili SHS e RHS di leghe 6061-T6 e 6063-T5, proponendo un confronto con differenti normative dedicate all'alluminio e con il *Continuous Strength Method* (CSM) sviluppato dagli stessi autori. Infine, Li et al [13] hanno testato 16 travi di alluminio 7404-T6 di sezione scatolare soggette a flessione non uniforme.

Sebbene, il numero di prove sperimentali è cresciuto notevolmente negli ultimi anni, risulta ancora limitato se paragonato ai medesimi test effettuati per le travi in acciaio. Per tal motivo, una nuova campagna sperimentale è stata condotta presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno. Nello specifico, 12 prove a flessione su tre punti sono state condotte su travi a sezione scatolare di lega 6060-T66. Le sezioni investigate sono di 4 tipi caratterizzate da rapporti di snellezza dei piatti che variano da 20 a 50. Inoltre, al fine di valutare l'influenza della lunghezza a taglio, sono state selezionate tre lunghezze di prova: 1300, 800 e 500 mm. Infine, i risultati sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti dalle attuali prescrizioni delle EN1999-1-1[6].

## 2 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEI PROVINI

Il programma sperimentale è caratterizzato da 12 travi in alluminio di lega EN AW 6060-T66 sottoposte a prove di flessione a 3 punti. La lega investigata è essenzialmente costituita da silicio e

magnesio, la cui composizione chimica è riportata in Tabella 1 in accordo all'EN 573-3 [14]. Il trattamento termico "T66" è caratteristico dei materiali sottoposti a processi di invecchiamento artificiale a temperature basse (100-200° C). Le proprietà meccaniche nominali sono riportate in Tabella 2 in accordo all'Eurocodice 9 [6]. Con la lettera  $t$  è indicato lo spessore dei piatti, mentre  $f_{0.2}$  e  $f_u$  rappresentano, rispettivamente, la tensione convenzionale di snervamento e la massima resistenza a trazione della lega;  $BC$  indica la curva di instabilità da adottare per il materiale in esame, ed infine  $n$  è il coefficiente di Ramberg-Osgood [15].

In riferimento alla Fig. 1,  $B_1$  e  $B_2$  sono, rispettivamente, larghezza e altezza della sezione scatolare,  $t_i$  indica lo spessore di ciascun piatto,  $t_f$  è lo spessore medio tra i piatti di flangia ( $t_1$  e  $t_3$ ), mentre  $t_w$  è lo spessore medio tra i piatti di anima ( $t_2$  e  $t_4$ ). Infine,  $b_f$  e  $b_w$  indicano le dimensioni interne dello scatolare. I valori sperimentali geometrici per ciascun provino sono riportati in Tabella 3. In accordo a quanto prescritto dall'EN1999-1-1[6], Le sezioni SHS40 sono di prima classe, mentre tutte le altre sezioni appartengono alla quarta classe. Infine,  $L_{tot}$  indica la lunghezza totale dei provini, ma le lunghezze di prova sono indicate con L1, L2 e L3, uguali, rispettivamente, a 1300 mm, 800 mm e 500 mm.

Al fine di caratterizzare dal punto di vista meccanico le travi da testare, sono state effettuate prove a trazione standardizzate in accordo alla Norma UNI EN ISO 6892-1-1 [16] che regola le prove a trazione su materiali metallici. Le provette sono state estratte per ciascun piatto di ogni sezione testata (Fig. 2) e sono state sottoposte a prove di trazione con riferimento al Metodo A2 riportato nella sopracitata norma. Le dimensioni geometriche delle provette sono riportate in Tabella 4, mentre i risultati dei test sperimentali a trazione sono indicati in Tabella 5. In particolari sono stati ricavati i seguenti parametri sperimentali: il modulo di Young ( $E_{exp}$ ), la tensione corrispondente allo 0.1% di deformazione residua ( $f_{0.1}$ ), la tensione convenzionale di snervamento ( $f_{0.2}$ ), la tensione massima ( $f_u$ ), la deformazione corrispondente alla tensione massima ( $\epsilon_u$ ), il livello di deformazione a rottura ( $\epsilon_r$ ) ed infine i valori dell'esponente di Ramberg-Osgood ( $n$ ) sia in campo inelastico che in quello plastico in accordo a quanto prescritto dall'Annesso E dell'EN1999-1-1[6]. Di seguito, viene riportata la legge di Ramberg-Osgood che descrive il legame matematico tra deformazione e tensione del materiale:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

**Tabella 1.** Composizione chimica della Lega 6060 in accordo all'EN 573-3 [15]

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
Min	0.30	0.10	-	-	0.35	-	-	-	Each	Total rest
Max	0.60	0.30	0.10	0.10	0.60	0.05	0.15	0.10	0.05	0.15 rest

**Tabella 2.** Proprietà meccaniche in accordo al prEN 1999-1-1 [14]

Alloy	Product form	Temper	$t$ [mm]	$f_{0.2}$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	BC	n
6060	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	B	16
	EP	T66	$3 < t \leq 15$	150	195	B	18

**Tabella 3.** Dimensioni sperimentali dei provini

Provino	$L_{tot}$ [mm]	$B_1$ [mm]	$B_2$ [mm]	$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_f$ [mm]	$t_w$ [mm]	$b_f/t_f$ [-]	$b_w/t_w$ [-]	Classe
SHS100 - L1	1499	100.3	100.3	2.25	2.04	2.12	2.37	2.18	2.20	43.94	43.52	4
SHS100 - L2	900	100.3	100.3	2.37	2.25	2.04	2.12	2.20	2.18	43.56	43.94	4
SHS100 - L3	598	100.3	100.3	2.37	2.25	2.04	2.12	2.20	2.18	43.56	43.94	4
SHS80 - L1	1491	80.06	80.17	2.00	1.98	1.90	1.89	1.95	1.94	39.09	39.41	4

Provino	$L_{tot}$	$B_1$	$B_2$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_f$	$t_w$	$b_f/t_f$	$b_w/t_w$	Classe
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	
SHS80 - L2	900	80.06	80.17	1.98	2.00	1.89	1.90	1.94	1.95	39.35	39.15	4
SHS80 - L3	599	80.06	80.17	1.98	2.00	1.89	1.90	1.94	1.95	39.35	39.15	4
SHS60 - L1	1495	60.31	60.4	2.00	2.09	2.00	2.16	2.00	2.12	28.03	26.57	4
SHS60 - L2	900	60.31	60.4	2.00	2.16	2.00	2.09	2.00	2.12	28.03	26.57	4
SHS60 - L3	598	60.31	60.4	2.00	2.16	2.00	2.09	2.00	2.12	28.03	26.57	4
SHS40 - L1	1501	40.11	40.18	2.20	2.09	2.00	1.99	2.10	2.04	17.18	17.66	1
SHS40 - L2	898	40.18	40.11	1.99	2.20	2.09	2.00	2.04	2.10	17.66	17.18	1
SHS40 - L3	599	40.18	40.11	1.99	2.20	2.09	2.00	2.04	2.10	17.66	17.18	1

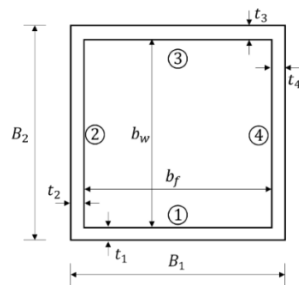


Fig. 1. Geometria della sezione scatolare

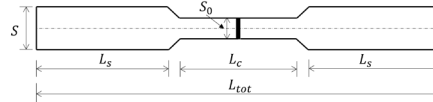


Fig. 2. Schema della provetta in trazione

Tabella 4. Dimensioni geometriche provetta

Provino	$S_0$	$S$	$L_c$	$L_s$	$L_{tot}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
SHS40/SHS60	15	30	80	90	275
SHS80/SHS100	20	40	100	100	320

Tabella 5. Proprietà meccaniche sperimentali dei test a trazione

Specimen		$E_{exp}$	$f_{0.1}$	$f_{0.2}$	$f_u$	$\epsilon_u$	$\epsilon_r$	$n_i$	$n_p$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]
SHS 40	P <sub>1</sub>	73054	171.00	181.75	207.85	0.055	0.075	11.34	22.96
	P <sub>2</sub>	75767	176.70	182.59	203.03	0.046	0.062	21.14	28.22
	P <sub>3</sub>	71465	160.83	174.03	202.17	0.053	0.074	8.78	20.35
	P <sub>4</sub>	66793	154.92	166.92	192.36	0.057	0.072	9.29	23.53
SHS 60	P <sub>1</sub>	65669	210.11	227.32	252.65	0.054	0.064	8.80	30.38
	P <sub>2</sub>	61254	207.09	215.00	238.83	0.065	0.088	18.49	33.09
	P <sub>3</sub>	65277	224.68	231.39	252.22	0.065	0.082	23.55	38.62
	P <sub>4</sub>	72674	213.20	226.59	253.58	0.069	0.095	11.38	31.90
SHS 80	P <sub>1</sub>	69665	210.82	224.17	246.02	0.039	0.064	11.29	35.70
	P <sub>2</sub>	75975	199.00	211.00	253.41	0.061	0.068	11.84	18.66
	P <sub>3</sub>	65174	226.46	236.92	255.41	0.042	0.050	15.35	39.65
	P <sub>4</sub>	63341	217.45	231.12	253.71	0.070	0.091	11.37	38.07
SHS 100	P <sub>1</sub>	71564	168.65	174.75	199.10	0.060	0.088	19.51	26.39
	P <sub>2</sub>	70044	165.38	175.61	201.80	0.060	0.098	11.55	24.83
	P <sub>3</sub>	66906	140.02	152.86	187.38	0.080	0.103	7.90	17.64
	P <sub>4</sub>	69317	155.32	169.36	195.79	0.060	0.085	8.00	22.51

### 3 PROVE DI FLESSIONE A TRE PUNTI

I test a flessione a tre punti sono stati effettuati per ciascuna sezione investigata (SHS40, SHS60, SHS80, SHS100) e per tre lunghezze di prova (L1, L2, L3) per un totale di 12 test a flessione. Il

setup di prova è riportato in Fig. 3. Il provino è stato semplicemente appoggiato su due semicilindri in acciaio ed è stato sottoposto ad un carico verticale in corrispondenza della propria mezzzeria attraverso l'attuatore idraulico della macchina universale di prova (Schenck Hydropuls S56 testing machine). I valori di carico sono stati registrati sia dalla cella di carico propria della macchina, mentre gli abbassamenti in mezzzeria sono stati valutati attraverso due trasduttori di spostamento localizzati ai due lati del provino nella zona centrale (LDT-C1 e LDT-C2), mentre altri due trasduttori sono stati collocati in corrispondenza degli appoggi (LDT-S e LDT-D). Inoltre, al fine di valutare i valori di curvatura durante la fase di carico, sono stati fissati quattro estensimetri (strain gauges) tipo FLAB-3-23 ai piatti d'anima dei provini, così come mostrato in Fig. 3.

Le prove sono state condotte in controllo di spostamento e la velocità di prova è stata calibrata in funzione della lunghezza della trave da testare. Nello specifico, due velocità sono state definite per ciascuna lunghezza: una velocità iniziale ( $v_i$ ) fino al valore di spostamento limite di snervamento stimato ( $\delta^*$ ) e una velocità finale ( $v_f$ ) fino al collasso del provino testato (Tabella 6). Le curve forza-spostamento sono mostrate in Fig. 4, mentre i principali risultati sperimentali sono riportati in Tabella 7. In particolare,  $F_{u.exp}$  rappresenta il massimo carico sperimentale,  $\delta_{u.exp}$  indica lo spostamento in mezzzeria corrispondente al massimo valore di carico,  $\chi_{u.exp}$  rappresenta il valore della curvatura nella sezione di mezzzeria corrispondente al massimo carico. Invece, il massimo momento in mezzzeria  $M_{u.exp}$  e la corrispondente rotazione alla corda  $\theta_{u.exp}$  sono state definite attraverso le seguenti relazioni:

$$M_{u.exp} = \frac{F_{u.exp}L}{4} \quad \theta_{u.exp} = \frac{2\delta_{u.exp}}{L} \quad (2)$$

I risultati delle prove hanno evidenziato che le sezioni SHS40 e SHS60 con luci di 1300 mm e 800 mm presentano una certa sovra resistenza flessionale e duttilità, mentre tutti gli altri provini sono stati caratterizzati da fenomeni di instabilità e collasso in campo elastico. Altresì, è evidente che, a parità di sezione, la resistenza delle travi cresce al diminuire della luce di prova, mentre la corrispondente rotazione alla corda si riduce. Infine, i provini SHS60-L3, SHS80-L2, SHS80-L3, SHS100-L2 e SHS100-L3 hanno manifestato crisi per forza concentrata in corrispondenza dei piatti d'anima.

**Tabella 6.** Velocità di prova

Lunghezza [mm]	$v_i$ [mm/min]	$\delta^*$ [mm]	$v_f$ [mm/min]
$L_1 = 1300$	5	20	15
$L_2 = 800$	3	12	9
$L_3 = 500$	1	4	3

**Tabella 7.** Risultati sperimentali delle prove a flessione

Provino	$F_{u.exp}$ [kN]	$\delta_{u.exp}$ [mm]	$M_{u.exp}$ [kNm]	$\theta_{u.exp}$ [rad]	$\chi_{u.exp}$ [m <sup>-1</sup> ]
SHS40-L1	2.50	35.17	0.81	0.054	0.503
SHS40-L2	4.04	11.46	0.81	0.029	0.320
SHS40-L3	6.56	5.19	0.82	0.021	0.362
SHS60-L1	6.71	18.99	2.18	0.029	0.167
SHS60-L2	10.40	7.17	2.08	0.018	0.163
SHS60-L3	15.31	3.03	1.91	0.012	0.122
SHS80-L1	9.18	10.54	2.98	0.016	0.096
SHS80-L2	13.05	3.89	2.61	0.010	0.084
SHS80-L3	17.07	1.67	2.13	0.007	0.098
SHS100-L1	11.24	6.42	3.65	0.010	0.076
SHS100-L2	14.57	2.76	2.91	0.007	0.046
SHS100-L3	18.20	1.41	2.28	0.006	0.062

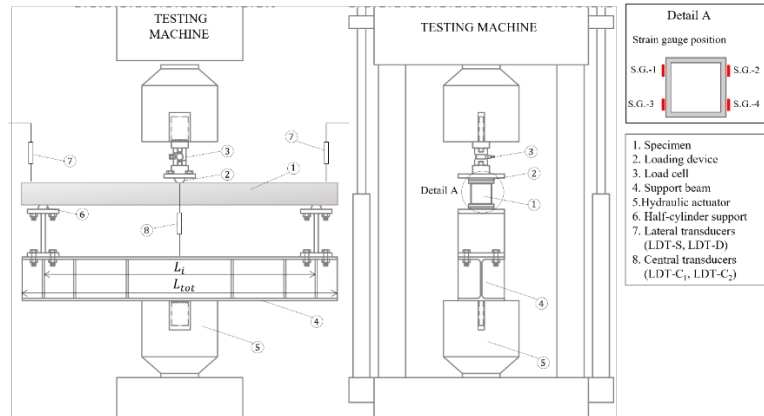


Fig. 3. Setup di prova di flessione a tre punti

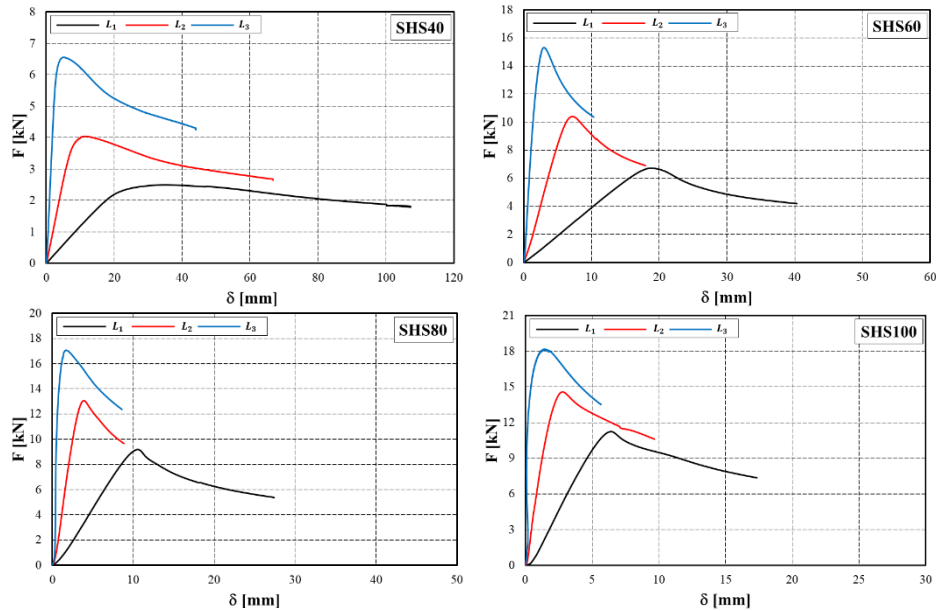


Fig. 4. Curve sperimentali forza-spostamento

#### 4 CONFRONTO CON L'EUROCODICE 9

Nel seguente paragrafo è riportato un confronto tra i valori sperimentali, precedentemente presentati, e i corrispondenti valori di resistenza definiti in accordo alle vigenti prescrizioni riportate nell'EN1999-1-1 [6]. In particolare, in accordo a quanto osservato sperimentalmente, sono stati considerati due principali meccanismi di collasso: 1) crisi per pura flessione in corrispondenza della sezione di mezzeria  $F_{1,EC9}$ ; 2) crisi per carico concentrato in corrispondenza dei piatti d'anima.

Riguardo la prima modalità di crisi, il massimo momento è stato calcolato in accordo al paragrafo 6.2.5 dell'EN1999-1-1:

$$M_{1.EC9} = \alpha W_{el} f_{0.2} \quad (3)$$

dove  $W_{el}$  rappresenta il modulo di resistenza elastica e  $\alpha$  indica un fattore di forma funzione della classe del profilo analizzato. Dall'Eq.(2). È possibile ricavare inversamente il valore del carico massimo per flessione:

$$F_{1.EC9} = \frac{4M_{1.EC9}}{L} \quad (4)$$

Il secondo meccanismo di crisi è stato valutato in accordo al paragrafo 6.7.5 dell'EN1999-1-1. Nello specifico, la massima resistenza dei piatti d'anima per carico concentrato è data da:

$$F_{3.EC9} = L_{eff} t_w f_{0.2.w} \quad (5)$$

dove  $t_w$  è lo spessore del piatto d'anima,  $f_{0.2.w}$  è la tensione convenzionale di snervamento dei piatti d'anima ed infine  $L_{eff}$  è una lunghezza efficace espressa come:

$$L_{eff} = \chi_F l_y \quad (6)$$

dove  $l_y$  rappresenta la lunghezza effettiva caricata (Paragrafo 6.7.5.5 dell'EN1999-1-1) e  $\chi_F$  indica un fattore riduttivo per effetto dei fenomeni di instabilità locale. Il carico di collasso  $F_{u.EC9}$  sarà definito come il valore minimo tra  $F_{1.EC9}$  e  $F_{2.EC9}$ . Il confronto tra i valori sperimentali e quelli valutati in accordo all'Eurocodice 9 sono riportati in Tabella 8. Valutando la media  $\mu$  e la deviazione standard  $\sigma$  dei rapporti  $F_{u.EC9}/F_{u.exp}$ , si può concludere che, tendenzialmente, le attuali prescrizioni normative sono più conservative del reale comportamento delle travi testate.

**Tabella 8.** Confronto tra le prove sperimentali e l'Eurocodice 9

<i>Provino</i>	$F_{u.exp}$ [kN]	$F_{1.EC9}$ [kN]	$F_{2.EC9}$ [kN]	$F_{u.EC9}$ [kN]	$\frac{F_{u.EC9}}{F_{u.exp}}$
SHS40-L1	2.55	<b>2.16</b>	8.80	2.16	0.85
SHS40-L2	4.07	<b>3.46</b>	8.78	3.46	0.85
SHS40-L3	6.59	<b>5.55</b>	8.78	5.55	0.84
SHS60-L1	6.79	<b>5.54</b>	14.20	5.54	0.82
SHS60-L2	10.44	<b>9.00</b>	14.20	9.00	0.86
SHS60-L3	15.33	14.45	<b>14.20</b>	14.20	0.93
SHS80-L1	9.21	<b>8.30</b>	11.85	8.30	0.90
SHS80-L2	13.05	13.44	<b>11.96</b>	11.96	0.92
SHS80-L3	17.06	21.59	<b>11.99</b>	11.99	0.70
SHS100-L1	11.24	<b>11.10</b>	13.11	11.10	0.99
SHS100-L2	14.56	18.14	<b>12.94</b>	12.94	0.89
SHS100-L3	18.20	29.14	<b>12.99</b>	12.99	0.71
Mean [ $\mu$ ]					0.86
St. Dev. [ $\sigma$ ]					0.08

## CONCLUSIONI

In questo lavoro, è stata presentata una campagna sperimentale su travi in alluminio di sezione scatolare sottoposte a prove di flessione a tre punti. In particolare, 12 profili SHS di lega EN AW 6060-T66 con differenti rapporti di snellezza dei piatti e per tre lunghezze di prova sono stati sottoposti a flessione non uniforme.

Quasi tutte le travi testate hanno evidenziato un comportamento di tipo flessionale, eccetto 5 provini (SHS60-L3, SHS80-L2, SHS80-L3, SHS100-L2, SHS100-L3) che hanno manifestato una crisi prematura dei piatti d'anima per azione concentrata.

Successivamente, è stato effettuato un confronto numerico con le attuali prescrizioni dell'EN1999-1-1. Dall'analisi dei risultati ottenuti, è emerso che le attuali prescrizioni dell'EC9 hanno fornito in tutti i casi esaminati valori più conservativi rispetto a quelli sperimentali.

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- [1] Mazzolani F.M., 3D aluminium structures, *Thin-Walled Structures*, 61, pp. 258-266, 2012
- [2] Georgantzia E., Gkantou M., Kamaris G.S., Aluminium alloys as structural material: A review of research, *Engineering Structures*, 227, art. no. 111372, 2021
- [3] De Matteis G., Brando G., Mazzolani F.M., Hysteretic behaviour of bracing-type pure aluminium shear panels by experimental tests, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(10), pp.1143–1162, 2011
- [4] De Matteis G., Brando G., Metal shear panels for seismic protection of buildings: recent findings and perspectives, *Ingegneria Sismica*, 33 (3), pp. 5–27, 2016
- [5] De Matteis G., Brando G., Caldosio F., D’Agostino F., Seismic performance of dual steel frames with dissipative metal shear panels, *Ingegneria Sismica*, 35(2), pp.124–141, 2018
- [6] EN 1999-1-1. Eurocode 9: Design of Aluminium Structures – Part 1.1: General Structural Rules. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 2007
- [7] EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, 2005
- [8] Panlio F., The theory of limit design applied to magnesium alloy and aluminium alloy structures, *R Aerinaut Soc*, pp. 534-571, 1947
- [9] Welo T., Inelastic deformation capacity of flexurally-loaded aluminium alloy structures, Norwegian University of Science and Technology, 1990
- [10] B.S. Opheim, Bending of thin-walled aluminium extrusions, Norwegian University of Science and Technology, 1996
- [11] Moen L.A., Hopperstad O.S., Langseth M., Rotational capacity of aluminum beams under moment gradient. I: Experiments, *Journal of Structural Engineering*, 125 (8), pp. 910-920, 1999
- [12] Su M.N., Young B., Gardner L., Deformation-based design of aluminum alloy beams, *Engineering Structures*, 80, pp. 339-349, 2014
- [13] Li B., Wang Y., Zhang Y., Yuan H., Zhi X., Baniotopoulos C., Flexural behaviour of 7A04-T6 high-strength aluminium alloy SHS and RHS beams under moment gradient, *Engineering Structures*, 259, art.no. 114138, 2022
- [14] UNI-EN 573-3: Alluminio e leghe di alluminio - Composizione chimica e forma dei prodotti semilavorati - Parte 3: Composizione chimica e forma dei prodotti, 2019
- [15] Ramberg W., WR Osgood WR., Description of stress-strain curves by three parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, NACA Technical Note n. 902, Washington, 1943
- [16] UNI-EN-ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, European Standard, 2020

**PAROLE CHIAVE**

Prove a flessione, leghe di alluminio, instabilità locale, profili scatolari, metodo dello spessore efficace