



ELEMENTO IN ALLUMINIO PRESSO-FLESSO CON SALDATURE LOCALIZZATE

Domenico Leone

ELEMENTO IN ALLUMINIO PRESSO-FLESSO CON SALDATURE LOCALIZZATE

Domenico Leone

Il Prof. Domenico Leone vanta un'esperienza più che trentennale nel campo della progettazione e realizzazione di strutture metalliche sia in campo industriale che infrastrutturale e civile ed è titolare del laboratorio di "Costruzione dell'Architettura" presso la facoltà di Architettura di Genova in qualità di professore a contratto. E' consulente di azienda avendo occupato in precedenza il ruolo di Responsabile del settore di progettazione di opere in carpenteria metallica prima presso la Società Italimpianti S.p.A. e successivamente presso le Società SMS-Demag e Paul-Wurth S.p.A.. Ha partecipato alla progettazione di grandi impianti industriali di produzione e trasformazione dell'acciaio e ne ha seguito la realizzazione con le imprese costruttrici e di montaggio acquisendo ampia esperienza in tutti i settori del ciclo di esecuzione di opere metalliche .

Per il suo impegno in campo internazionale vanta ampia conoscenza delle norme di settore utilizzate in varie nazioni con particolare riguardo agli Eurocodici.

Ha esercitato ed esercita tuttora attività formativa in ambito Aziendale, Universitario, Pubblico, Privato e dell'Ordine Professionale.

E' autore di varie pubblicazioni tecniche e dei volumi "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali, "Lamiere grecate e pannelli coibentati" edito da Mediasoft s.a.s., "Componenti strutturali in acciaio" e "Elementi di completamento strutturale in acciaio" editi da Wolters Kluwer Italia nonché di numerosi programmi di calcolo automatico, basati sulle direttive europee e nazionali, dedicati sia alla progettazione di strutture in acciaio di impianti industriali che alla progettazione di componenti strutturali e di dettaglio proprie degli edifici civili e delle infrastrutture (pacchetto SAITU edito da Stadata s.r.l.)

La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto dell'autore.

S.T.A. DATA srl
Corso Raffaello, 12 - 10126 Torino
tel. 011 6699345 www.stadata.com

ELEMENTO IN ALLUMINIO PRESSO-FLESSO CON SALDATURE LOCALIZZATE

APPLICAZIONE DELLA NORMA EN 1999-1-1

Calcolo di resistenza e stabilità di una sezione estrusa tenendo conto anche della presenza di saldature localizzate (HAZ) con confronto dei risultati delle verifiche.
Classificazione e calcolo della sezione efficace.

L'articolo è estratto dal volume in via di pubblicazione dal titolo “**Componenti strutturali in alluminio** – progettare componenti e connessioni secondo Eurocodici e Norme Tecniche per le Costruzioni” contenente i seguenti argomenti:

INDICE

1. INTRODUZIONE

2. MATERIALE ALLUMINIO

2.1 GENERALITA' SULLE LEGHE DI ALLUMINIO PER LE COSTRUZIONI

2.1.1 Alluminio strutturale

2.1.2 Durabilità delle strutture in alluminio

2.2 ELEMENTI COMPOSTI SALDATI

2.2.1 Unioni saldate

2.2.2 Zone termicamente alterate (HAZ)

2.3 BULLONI PER GIUNTI DI COMPONENTI IN ALLUMINIO

3. PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN ALLUMINIO

3.1 AZIONI SULLE COSTRUZIONI

3.1.1 Generalità

3.1.2 Azioni permanenti o carichi permanenti

3.1.3 Azioni variabili o carichi variabili

3.1.3.1 Carichi di impianto

3.1.3.2 Carichi di esercizio

3.1.3.3 Azione della neve

3.1.3.4 Azioni dei carroponte

3.1.3.5 Azione del vento

3.1.3.6 Azione sismica

3.1.3.7 Variazioni di temperatura

3.1.3.8 Cedimenti delle fondazioni

3.2 METODI DI CALCOLO E COMBINAZIONE DEI CARICHI

3.2.1 Generalità

3.2.2 Metodo di calcolo agli stati limite

3.2.3 Combinazioni dei carichi per lo S.L.U.

3.2.4 Combinazioni dei carichi per lo S.L.E.

3.2.4.1 Limiti di deformazione

3.2.5 Progettazione antisismica

3.3 VERIFICHE DI RESISTENZA DELLE MEMBRATURE

3.3.1 Generalità

3.3.2 Classificazione delle sezioni

3.3.3 Sezione efficace di elementi di classe 4

- 3.3.4 Sezioni tese
- 3.3.5 Sezioni compresse
- 3.3.6 Sezioni flesse
- 3.3.7 Sezioni presso-flesse
- 3.3.8 Effetto del taglio
- 3.3.9 Interazione taglio, momento e forza assiale

3.4 VERIFICHE DI STABILITA'

- 3.4.1 Generalità
- 3.4.2 Stabilità di elementi compressi
- 3.4.3 Stabilità di elementi flessi
- 3.4.4 Stabilità di elementi presso-flessi
- 3.4.5 Stabilità al taglio delle anime
- 3.4.6 Stabilità degli involucri (cenni sulle strutture a guscio)

3.5 VERIFICHE A FATICA

- 3.5.1 Generalità
- 3.5.1.1 Criteri di verifica

3.6 VERIFICA DI RESISTENZA DEI COLLEGAMENTI

- 3.6.1 Collegamenti saldati
- 3.6.2 Collegamenti bullonati
- 3.6.2.1 Unione a taglio con squadrette o piatti
- 3.6.2.2 Unione ad attrito
- 3.6.2.3 Unione a flangia
- 3.6.2.4 Unione di continuità
- 3.6.2.5 Unione con perni

3.7 ANCORAGGIO DI BASE DELLE COLONNE

- 3.7.1 Generalità
- 3.7.2 Criteri di calcolo

4. PROGETTAZIONE DEI RIVESTIMENTI

4.1 ELEMENTI DI RIVESTIMENTO

- 4.1.1 Generalità
- 4.1.2 Elementi in lamiera grecata
- 4.1.3 Pannelli monolitici coibentati
- 4.1.4 Regole pratiche di progettazione ed esecuzione

5. ESEMPI DI CALCOLO DI ELEMENTI PRESSO-FLESSI

- 5.1** Sezione complessa parzialmente chiusa ; calcolo completo in condizioni sismiche
- 5.2** Sezione aperta di classe 4 con input agevolato
- 5.3** Sezione aperta di classe 4 con input coordinate nodali (confronto)
- 5.4** Sezione scatolare complessa; influenza delle zone HAZ

6 VERIFICA DI UN GIUNTO A FLANGIA BULLONATA TRAVE-COLONNA

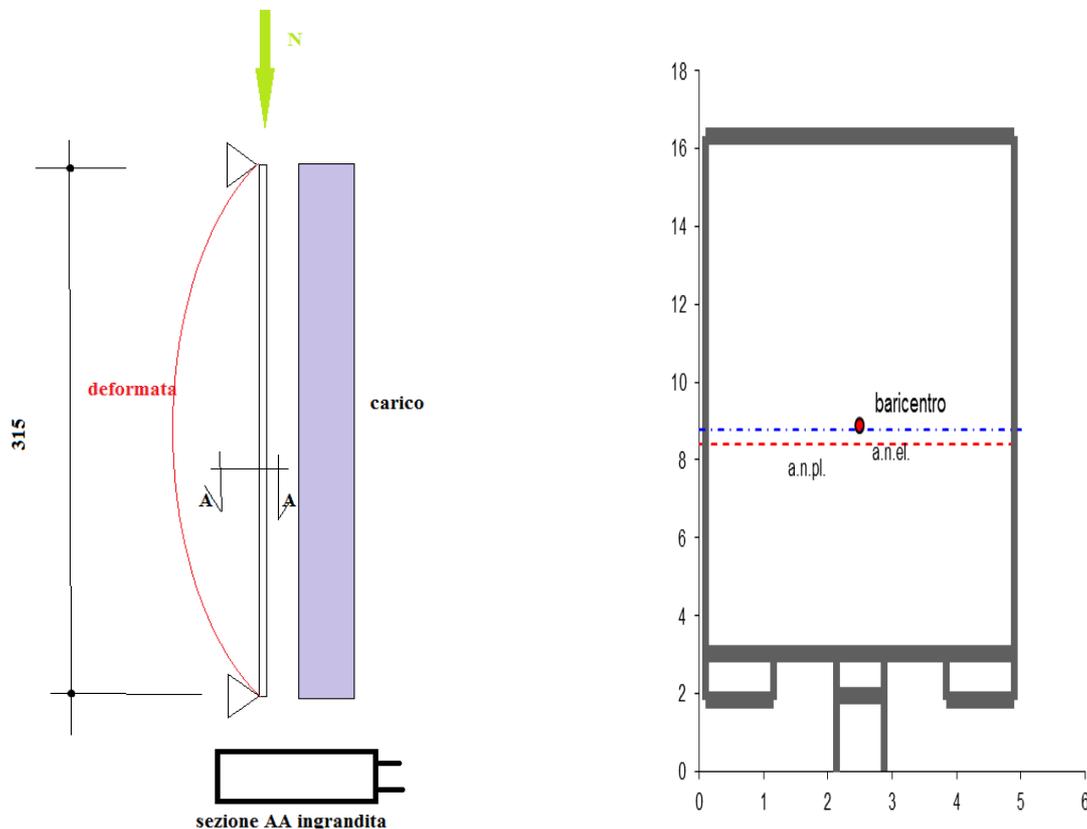
- 6.1** Condizioni iniziali di progetto
- 6.2** Verifica della saldatura trave-flangia e degli irrigidimenti
- 6.3** Verifica della flangia e dei bulloni di giunto a parziale resistenza
- 6.4** Verifica globale del nodo a parziale resistenza (resistenza delle componenti nodali)
- 6.5** Verifica globale del nodo a piena resistenza
- 6.6** Verifica globale del nodo in condizioni sismiche (struttura dissipativa a bassa duttilità)
- 6.7** Verifica delle componenti del nodo in condizioni sismiche
- 6.8** Considerazioni finali

7 VERIFICA DI UN GIUNTO CON SQUADRETTE BULLONATO

- 7.1** Generalità
- 7.2** Calcolo elastico di un giunto bullonato su piatto singolo
- 7.3** Considerazioni e analisi critica della norma
- 7.4** Calcolo plastico
- 7.5** Calcolo ad attrito

- Elemento con sezione chiusa estrusa; effetto delle saldature localizzate :

di seguito si riporta un caso reale relativo ad una struttura mono-piano controventata le cui colonne e travi sono costituite da un profilo estruso e sono collegate tra loro da giunti bullonati. Lo schema statico è rappresentato nella seguente figura insieme alla sezione disegnata dal programma “PrefleEC9AI”:



La colonna scatolare ha dimensioni 166 x 50 mm ed è realizzata in lega di alluminio EN AW 6060 ExT6 con spessore tabellato massimo di 15 mm

MATERIALE	EN AW 6060 Ex T6 - t < 15	$f_o = 14,00 \text{ kN/cm}^2$	$f_u = 17,00 \text{ kN/cm}^2$	$\epsilon =$	1,34
SEZIONE	LAMINATA O ESTRUSA	TIPO: COLONNA	MONO-SIMMETRICA	$\gamma_{M1} =$	1,1

Le sollecitazioni non sismiche sono le seguenti :

SOLLECITAZIONI DI PROGETTO :			resistenza	stabilità
combinazione di carichi NON sismica	Momento flettente :	$M_{Ed} = \text{kNcm}$	366	366
	Taglio congruente :	$V_{Ed} = \text{kN}$	3,49	3,49
	Compress. assiale :	$N_{Ed} = \text{kN}$	1,07	1,07

La sezione è descritta attraverso le coordinate nodali come rappresentato dal seguente foglio del programma automatico individuando come “flange esterne” le parti orizzontali estreme della sezione, “flangia interna” il lato di chiusura inferiore del profilo rettangolare composto da 5 segmenti e “anime” tutte le parti a sviluppo verticale (10 segmenti) :

ELEMENTO	H = cm	16,6	coordinate nodi elemento				geometria della sezione				
	B = cm	5	nodo sx		nodo dx		lunghezza	dist. g-z	dist. g-y	rotazione	AREA
	COMPON. SEZIONE	SPESSORE s = cm	y cm	z cm	y cm	z cm	l cm	y _g cm	z _g cm	α °	A cm ²
1	FLANGIA INFERIORE E FLANGIA INTERNA	0,18	0,1	1,85	1,16	1,85	1,06	0,63	1,85	0	0,1908
2		0,23	2,13	1,95	2,87	1,95	0,74	2,5	1,95	0	0,1702
3		0,18	3,84	1,85	4,9	1,85	1,06	4,37	1,85	0	0,1908
4		0,23	0,1	3,02	1,16	3,02	1,06	0,63	3,02	0	0,2438
5		0,23	1,16	3,02	2,09	3,02	0,93	1,625	3,02	0	0,2139
6		0,23	2,09	3,02	2,91	3,02	0,82	2,5	3,02	0	0,1886
7		0,23	2,91	3,02	3,84	3,02	0,93	3,375	3,02	0	0,2139
8		0,23	3,84	3,02	4,9	3,02	1,06	4,37	3,02	0	0,2438
9							0	0	0	0	0
10							0	0	0	0	0
1	ANIME VERTICALI E INCLINATE	0,15	0,1	1,85	0,1	3,02	1,17	0,1	2,435	90	0,1755
2		0,15	1,16	1,85	1,16	3,02	1,17	1,16	2,435	90	0,1755
3		0,25	2,13	0	2,13	1,95	1,95	2,13	0,975	90	0,4875
4		0,18	2,13	1,95	2,13	3,02	1,07	2,13	2,485	90	0,1926
5		0,25	2,87	0	2,87	1,95	1,95	2,87	0,975	90	0,4875
6		0,18	2,87	1,95	2,87	3,02	1,07	2,87	2,485	90	0,1926
7		0,15	3,84	1,85	3,84	3,02	1,17	3,84	2,435	90	0,1755
8		0,15	4,9	1,85	4,9	3,02	1,17	4,9	2,435	90	0,1755
9		0,21	0,1	3,02	0,1	16,32	13,3	0,1	9,67	90	2,793
10		0,21	4,9	3,02	4,9	16,32	13,3	4,9	9,67	90	2,793
11							0	0	0	0	0
12							0	0	0	0	0
1	FLANGIA SUPERIORE E FLANGIA INTERNA	0,57	0,1	16,32	4,9	16,32	4,8	2,5	16,32	0	2,736
2							0	0	0	0	0
3							0	0	0	0	0
4							0	0	0	0	0
5							0	0	0	0	0
6							0	0	0	0	0
7							0	0	0	0	0
8							0	0	0	0	0
9							0	0	0	0	0
10							0	0	0	0	0
larghezza flangia superiore				4,8 cm						TOTALE	12,040
larghezza flangia inferiore				7,66 cm							

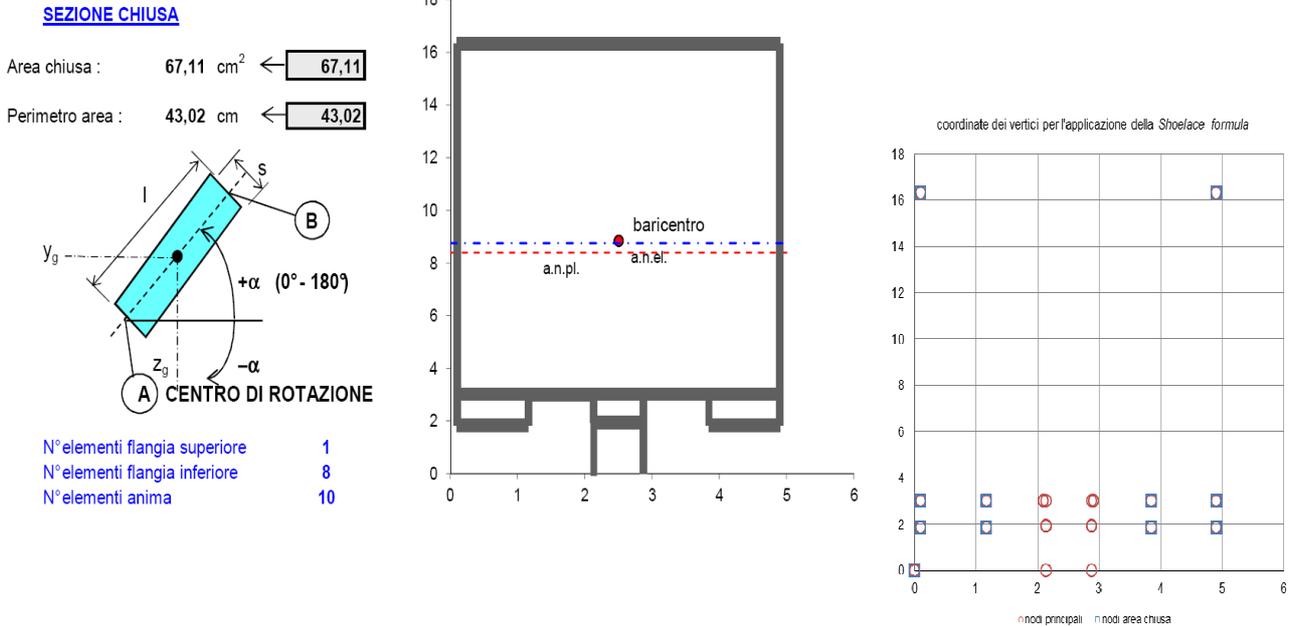
Da cui discende il riepilogo del calcolo delle caratteristiche geometriche di seguito riportato :

COORDINATE DEL BARICENTRO :		$y_G =$	2,50	cm
asse neutro elastico		$z_G =$	8,86	cm
$z_{N,\psi} =$	8,76			
MOMENTI DI INERZIA DELLA SEZIONE :		$J_y =$	409	cm ⁴
		$J_z =$	44	cm ⁴
SEZIONE CHIUSA		$J_t =$	101	cm ⁴ ←

L'area chiusa della sezione è calcolata con la "shoelace formula" che per sezioni complesse come questa offre risultati approssimati ma sufficienti a definire caratteristiche geometriche torsionali

valide per la verifica di resistenza alla instabilità flessio-torsionale. Nel caso in esame, area chiusa e perimetro relativo sono stati calcolati a parte e inseriti nel programma automatico.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE LORDA



Generalmente le sezioni scatolari (chiuso) non sono suscettibili di instabilità flessio-torsionale o perlimento oppongono a tale effetto una alta resistenza per cui l'esatta individuazione dell'area chiusa e del relativo perimetro per determinare il momento di inerzia torsionale non è indispensabile.

Il processo di classificazione illustrato nella parte teorica di questo volume e nei precedenti esempi individua una sezione di classe 4 per le due anime della sezione scatolare :

CLASSIFICAZIONE (tab. 6.2 e nota)	el. 1	el. 2	el. 3	el. 4	el. 5	el. 6	el. 7	el. 8	el. 9	el. 10	el. 11	el. 12
Anime $\beta = \eta \cdot d / t_w =$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,91	29,91	0,00	0,00
$\eta =$	1,06	1,06	1,09	1,06	1,09	1,06	1,06	1,06	0,47	0,47	0,70	0,70
$\psi =$	1,20	1,20	1,29	1,19	1,29	1,19	1,20	1,20	-0,76	-0,76	0,00	0,00
CLASSE	1	4	4	1	1							
Flangia superiore $\beta = c/t =$	8,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
CLASSE	1											
Flangia inferiore $\beta = c/t =$	5,89	3,22	5,89	4,61	4,04	3,57	4,04	4,61	0,00	0,00		
CLASSE	1											

Larghezza/spessore anime interne e anime di sezione a T

classe 1	$\beta_1 =$	14,70
classe 2	$\beta_2 =$	21,38
classe 3	$\beta_3 =$	29,40

controllo flange interne	$\alpha =$	0,032	
$\Psi_{f, is} =$	0,96	$\Psi =$	-1,12
$\Psi_{f, ii} =$	-0,73	$\eta =$	0,378

Larghezza/spessore flange e anime sporgenti

classe 1	$\beta_1 =$	4,01
classe 2	$\beta_2 =$	6,01
classe 3	$\beta_3 =$	8,02

ELEMENTI SPORGENTI	classe 1	$\beta_1 =$	14,70	ELEMENTI INTERNI
	classe 2	$\beta_2 =$	21,38	
	classe 3	$\beta_3 =$	29,40	

CLASSE DI INSTABILITA' (BC - tab. 3.2)

A

CLASSE SEZIONE

4

La sezione efficace è determinata col metodo iterativo attraverso 4 step. La prima iterazione è rappresentata nel seguente foglio di calcolo in cui si notino le attribuzioni di parti interne ed esterne a ciascun segmento della sezione raggruppati in flange e anime.

CALCOLO DEI MODULI DI RESISTENZA EFFICACI E DELL'AREA EFFICACE - EN 1999-1-1 item 6.1.5

1) calcolo dell'area efficace ($A_{eff,f}$) della flangia superiore: n° elementi = 1 (orizzontali)

E = elemento esterno

I = elemento interno

		el. 1	el. 2	el. 3	el. 4	el. 5	el. 6	el. 7	el. 8	el. 9	el. 10		
		I ▼	E ▼	E ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼		
costante di riduzione	$C_1 =$	32	10	10	32	32	32	32	32	32	32		
costante di riduzione	$C_2 =$	220	24	24	220	220	220	220	220	220	220		
fattore di riduzione	$\rho_c =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
$t_{r,eff} = \rho_c \cdot t$	$t_{r,eff} =$ cm	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
area efficace flangia	$A_{eff,f} =$ cm ²	2,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
												$A_{eff,f} =$ cm ²	2,736

2) calcolo dell'area efficace ($A_{eff,i}$) della flangia inferiore: n° elementi = 8 (orizzontali)

		el. 1	el. 2	el. 3	el. 4	el. 5	el. 6	el. 7	el. 8	el. 9	el. 10		
		I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼		
costante di riduzione	$C_1 =$	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
costante di riduzione	$C_2 =$	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220		
fattore di riduzione	$\rho_c =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
$t_{r,eff} = \rho_c \cdot t_i$	$t_{r,eff} =$ cm	0,18	0,23	0,18	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,00	0,00		
area efficace flangia	$A_{eff,i} =$ cm ²	0,19	0,17	0,19	0,24	0,21	0,19	0,21	0,24	0,00	0,00	$A_{eff,i} =$	1,6558
area eff. compress. unif.	$A_{eff,i} =$ cm ²	0,19	0,17	0,19	0,24	0,21	1,89	9,12	0,00	0,65	0,32	$A_{eff,i} =$	1,656

3) calcolo dell'area efficace ($A_{eff,w}$) dell'anima : n° elementi = 10

limitaz. di ρ_w per "T" = 1

		el. 1	el. 2	el. 3	el. 4	el. 5	el. 6	el. 7	el. 8	el. 9	el. 10	el. 11	el. 12
		I ▼	I ▼	E ▼	I ▼	E ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	I ▼	E ▼	E ▼
costante di riduzione	$C_1 =$	32	32	10	32	10	32	32	32	32	32	10	10
costante di riduzione	$C_2 =$	220	220	24	220	24	220	220	220	220	220	24	24
fattore di riduzione	$\rho_w =$	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9905	0,9905	1	1
$t_{w,eff} = \rho_w \cdot t_w$	$t_{w,eff} =$ cm	0,15	0,15	0,25	0,18	0,25	0,18	0,15	0,15	0,21	0,21	0,00	0,00
area eff. presso-fless.	$A_{eff,w} =$ cm ²	0,18	0,18	0,49	0,19	0,49	0,19	0,18	0,18	2,78	2,78	0,00	0,00
area eff. compress. unif.	$A_{eff,w} =$ cm ²	0,18	0,18	0,49	0,19	0,49	0,19	0,18	0,18	1,61	1,61	0,00	0,00
										$A_{eff,w} =$ cm ²	7,618	$A_{v,eff,w} =$ cm ²	7,618

Le parti di anima compresse di classe 4 sono ridotte dal coefficiente $\rho = 0,99$

Il processo iterativo è riassunto nella seguente tabella in cui si noti l'immediata convergenza già al secondo step e la non riduzione per taglio della sezione efficace essendo quest'ultimo inferiore al 50% della resistenza a taglio :

4) calcolo dell'area e dei moduli di resistenza efficaci: item 6.7.2 (6)

metodo iterativo		I° step	II° step	III° step	IV° step	rid. per taglio	
Area sez. ridotta	$A_{eff} =$	12,01	12,04	12,04	12,04	12,04	cm ²
Posizione baricentro	$z_{G,eff} =$	8,85	8,86	8,86	8,86	8,86	cm
Momento di inerzia	$J_{y,eff} =$	408	409	409	409	409	cm ⁴
Modulo di res. sup.	$W_{eff,s} =$	53	53	53	53	53	cm ³
Modulo di res. inf.	$W_{eff,i} =$	46	46	46	46	46	cm ³

Area resistente a taglio : $\beta = d / t = 94 > 39 \varepsilon = 52,1$ $b_{haz} =$ cm $A_v =$ cm²
 Resistenza di progetto a taglio : $v_1 = 0,47$ $V_{Rd} = v_1 \cdot A_v \cdot (f_o / 3^{1/2}) / \gamma_{M1} =$ kN
 $a =$ cm $V_{Ed} < 50\% V_{Rd}$ $\rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2 =$

La verifica di resistenza della sezione presso-flessa estrusa produce il risultato di seguito riportato in cui si noti il valore 1,3 dell'esponente η_0 dell'espressione di verifica valido per sezioni scatolari (item 6.2.9.2 (1) EN 1999-1-1)

Verifica di resistenza per sezione di classe **4**

$$f_d = f_o / \gamma_{M1} = 12,727 \text{ kN/cm}^2$$

$A_{f1} = 2,74 \text{ cm}^2$	$A_{f2} = 1,66 \text{ cm}^2$	$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_d = 816,55$	kNcm
$R = [1 - (N_{Ed} / (A_{f1} + A_{f2}) / f_d)^2]$	$M_{y,Rd} = \alpha_y \cdot W_{y,el} \cdot f_d$	$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot R = 816,25$	kNcm
$\alpha_y = 1$	$\eta_o = 1,3$	$\gamma_o = \xi_o = 1$	$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_d = 586,99$
elemento senza saldature locali o fori		$\gamma_{M2} = 1,25$	$N_{Rd} = A_{eff} \cdot f_d = 153,24$
in assenza di taglio : $\omega_o = 1$			$[N_{Ed} / (\omega_o \cdot N_{Rd})]^{10} + [M_{Ed} / (\omega_o \cdot M_{y,Rd})]^{10} = 0,625$
per $V_{Ed} > 50\% V_{Rd}$ $f_{o,V} = f_o \cdot [1 - \rho]$			$[N_{Ed} / (\omega_o \cdot N_{V,Rd})]^{10} + [M_{Ed} / (\omega_o \cdot M_{yV,Rd})]^{10} = 0,000$
interazione $M_{Ed} / M_{c,Rd} = 0$			$(M_{Ed} + M_{f,Rd}) / 2 \cdot M_{N,Rd} + V_{Ed} / V_{Rd} \cdot (1 - M_{f,Rd} / M_{N,Rd}) = \dots$

Per la verifica di stabilità della colonna le condizioni geometriche e di vincolo sono le seguenti :

- Lunghezza effettiva coincidente con quella di instabilità $L = 3,15 \text{ m}$
- Vincolo di estremità a cerniera in entrambe le direzioni : $k_y = k_z = 1$
- Sezione senza vincoli rotazionali e distorsionali alle estremità : $k = k_w = 1$
- Diagramma di carico parabolico
- Carico applicato nel baricentro della sezione

In queste condizioni il momento critico elastico è di seguito calcolato :

RESISTENZA ALL'INSTABILITA'

Lunghezza dell'elemento tra gli appoggi :	$L = 315 \text{ cm}$	$k_y = 1$
Lunghezza libera nel piano principale :	$L_y = 315 \text{ cm}$	$k_z = 1$
Momenti principali di estremità (+;-)	$M_{Ed,1} = 0$	$M_{Ed,2} = 0$ kNcm
(1) Momento dovuto ai carichi laterali nel piano	$ M_Q = 366$	$\Delta M = 366$ kNcm
Diagramma del momento flettente (*) :	(l,p,t,q) = p	parabolico
Fattore di lunghezza effettiva k (0,5-0,7-1)	$k = 1$	rotazione z-z libera delle estremità
Fattore di lunghezza effettiva k_w (0,5-0,7-1)	$k_w = 1$	distorsione libera delle estremità
Fattore di distribuzione momenti estremi :	$\psi = 0,00$	$-1 < \psi < 1$
Dist. sezione da appoggio o punto di flesso :	$x_s = 157,5$	conferma ! $157,5 \text{ cm}$
nota (1) : momento calcolato per trave semplicemente appoggiata		
Coeff. di forma (*) :	$C1 = 1,127$	$C2 = 0,46$ $C3 = 0,525$
Dist. centro di taglio - baricentro $e = \text{cm}$	$0,000$	$k_{wt} = 0$
Carico applicato all'estradosso della sezione ? (S , N)	N	$\zeta_g = 0$
Distanza centro di taglio - centro di carico $z_g = \text{cm}$	$0,00$	$\zeta_j = 0,013801$
I.1.2 (1) $\psi_f = (J_{tf} - J_{ti}) / (J_{tf} + J_{ti})$	$\psi_f = 0,20$	$\mu_{cr} = 1,13$ (*)
$z_j = 0,45 \cdot \psi_f \cdot h_s$	$z_j = \text{cm}$	$N_{cr,y} = 284,4677$ kN
$I_w = (1 - \psi_f^2) \cdot J_z \cdot (h_s/2)^2$	$I_w = \text{cm}^6$	$N_{cr,z} = 30,49117$ kN

Momento critico : $M_{cr} = \mu_{cr} \cdot \pi \cdot [E \cdot J_z \cdot G \cdot J_t]^{0,5} / L = 3253$ kNcm **EN 1999-1-1**

Tutti i fattori di stabilità sia flessionale che flessio-torsionale descritti nella parte teorica di questo volume sono di seguito definiti insieme alla capacità flessionale dell'elemento :

Lunghezza libera nel piano laterale :

Raggi di inerzia nei due piani :

Snellezze effettive per presso-flessione :

Snellezze adimensionali corrispondenti :

Limite della snell. adim. per flessio-torsione :

Snellezza per l'instabilità flessio-torsionale :

$L_z =$	315	cm	EC9	▼	
$i_y =$	5,83	cm	$i_z =$	1,91	cm
$\lambda_y =$	54		$\lambda_z =$	165	< 250
$\bar{\lambda}_y =$	0,770		$\bar{\lambda}_z =$	2,351	<= 2
$\bar{\lambda}_0 =$	0,1		$\alpha'_y =$	1	< W_{pl} / W_{el}
$\bar{\lambda}_{LT} =$	0,446		$\bar{\lambda}_{LT,0} =$	0,4	

verifica di stabilità flessio-torsionale necessaria

Coeff. di imperfezione per presso-flessione :

$\alpha_y =$	0,2	$\alpha_z =$	0,2
--------------	-----	--------------	-----

Coeff. di imperfezione per flessio-torsione :

$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT0})] + \bar{\lambda}_{LT}^2$

$\phi_y =$	0,863	$\phi_z =$	3,489
------------	-------	------------	-------

$\alpha_{LT} =$	0,20	$\alpha'_{LT} =$	1
-----------------	------	------------------	---

$\phi_{LT} =$	0,604		
---------------	-------	--	--

Coeff. di riduzione per presso-flessione :

$\chi_y =$	0,797	$\chi_z =$	0,165
------------	-------	------------	-------

Coeff. di riduzione per flessio-torsione :

$\chi_{LT} =$	0,989	$\chi_{min} =$	0,165
---------------	-------	----------------	-------

Fattori di progetto della sezione :

mom. estremi disuguali e/o azioni trasversali	▼
nessuna saldatura locale lungo l'elemento	▼

$\omega_o =$	1,000	$\eta_c ; \xi_{yc} =$	0,800
--------------	-------	-----------------------	-------

$\omega_x =$	1,000	$\gamma_c =$	1,000
--------------	-------	--------------	-------

$\omega_{LT} =$	1,000	$\alpha''_y =$	1
-----------------	-------	----------------	---

Capacità del momento flettente intorno a y : $M_{y,Rd} = \alpha''_y \cdot W_y \cdot f_c / \gamma_{M1} =$ **587** kNcm

La verifica di resistenza flessionale e flessio-torsionale dell'elemento in esame produce il seguente risultato :

VERIFICA DI STABILITA' PER PRESSO-FLESSIONE - item 6.3.3.1 (1)-(5)

$[N_{Ed} / (\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd})]^{\eta_c} + [M_{y,Ed} / (\omega_o \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_c} =$ **0,703** < 1 **OK!**

VERIFICA DI STABILITA' PER FLESSIO-TORSIONE - item 6.3.3.2 (1)-(2)

$[N_{Ed} / (\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd})]^{\eta_c} + [M_{Ed} / (\omega_{LT} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_c} =$ **0,710** < 1 **OK!**

Da cui si evidenzia l'instabilità primaria flessio-torsionale anche se tale verifica non sarebbe secondo la norma applicabile a sezioni chiuse.

Si noti che, pur essendo la sezione scatolare, la verifica di stabilità flessio-torsionale sarebbe comunque richiesta non essendo soddisfatta la seguente condizione :

$\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$

0,446 > 0,4

Se l'elemento prevedesse saldature di estremità come ad esempio ad una piastra di base o ad un piatto nodale di giunzione si avrebbe un indebolimento locale per la presenza di zone HAZ. In questo caso il rischio di instabilità verrebbe esaltato e la verifica nella sezione $x_s = 0$ produrrebbe il seguente risultato :

VERIFICA DI STABILITA' PER PRESSO-FLESSIONE - item 6.3.3.1 (1)-(5)

$[N_{Ed} / (\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd})]^{\eta_c} + [M_{y,Ed} / (\omega_o \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_c} =$ **1,088** < 1 **NO!**

VERIFICA DI STABILITA' PER FLESSIO-TORSIONE - item 6.3.3.2 (1)-(2)

$[N_{Ed} / (\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd})]^{\eta_c} + [M_{Ed} / (\omega_{LT} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_c} =$ **1,088** < 1 **NO!**

Sofferamoci un momento sulla **stabilità di elementi presso-flessi in cui siano presenti zone HAZ dovute a saldature localizzate** ma tali che la loro estensione lungo l'elemento non sia maggiore della minima larghezza dell'elemento stesso.

La norma distingue tra **saldature locali lungo l'elemento** e **saldature locali alle estremità dell'elemento** consentendo in quest'ultimo caso una maggiore resistenza anche se molto inferiore a quella ottenuta considerando l'elemento senza saldature locali. L'effetto della presenza di saldature localizzate è condizionato dai valori dei seguenti fattori già descritti nella parte teorica di questo volume :

- Per saldature localizzate lungo l'elemento si può assumere : (& 6.3.3.3 (1))

$$\omega_0 = \omega_x = \omega_{xLT} = \frac{\rho_{u,haz} f_u / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \text{ but } \leq 1,00$$

- Per saldature alle estremità dell'elemento si può assumere : (& 6.3.3.3 (2))

$$\omega_x = \frac{\omega_0}{\chi + (1 - \chi) \sin \frac{\pi x_s}{l_c}}$$

$$\omega_{xLT} = \frac{\omega_0}{\chi_{LT} + (1 - \chi_{LT}) \sin \frac{\pi x_s}{l_c}}$$

$$\omega_0 = \frac{\rho_{u,haz} f_u / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \text{ but } \omega_0 \leq 1,00$$

In cui :

x_s è la distanza della zona HAZ dall'appoggio più vicino e nel nostro caso vale 0 trattandosi di saldatura di estremità

l_c è la lunghezza di instabilità che nel caso in esame coincide con la distanza tra i vincoli di estremità.

Siccome nella nostra ipotesi di progetto sono previste solo **saldature alle estremità dell'elemento**, la verifica di resistenza continua ad essere fatta in corrispondenza del momento flettente massimo lungo l'elemento ovvero in mezzaria dove non vi sono zone HAZ e quindi non varia, mentre la verifica di stabilità deve essere eseguita tenendo conto dell'effetto instabilizzante delle zone HAZ alle estremità dell'elemento.

Il calcolo dei fattori di riduzione ω produce i seguenti risultati :

Coeff. di riduzione per presso-flessione :	$\chi_y =$	0,797	$\chi_z =$	0,165
Coeff. di riduzione per flessione-torsione :	$\chi_{LT} =$	0,989	$\chi_{min} =$	0,165
Fattori di progetto della sezione :	$\omega_o =$	0,629	$\eta_c ; \xi_{yc} =$	0,800
mom. estremi disuguali e/o azioni trasversali ▼	$\omega_x =$	0,788	$\gamma_c =$	1,000
saldature locali alle estremità dell'elemento ▼	$\omega_{LT} =$	0,636	$\alpha''_y =$	1

La verifica di stabilità porta ai risultati anticipati attraverso il seguente iter progettuale eseguito dal programma "PrefleEC9AI"

- Definizione delle condizioni di vincolo dell'elemento, della distribuzione dei momenti di estremità e intermedio e della posizione della zona HAZ ovvero della distanza della saldatura dall'appoggio più vicino.

RESISTENZA ALL'INSTABILITA'

Lunghezza dell'elemento tra gli appoggi :	L = 315 cm	k _y = 1		
Lunghezza libera nel piano principale :	L _y = 315 cm	k _z = 1		
Momenti principali di estremità (+;-)	M _{Ed,1} =	M _{Ed,2} =	kNcm	
(1) Momento dovuto ai carichi laterali nel piano	M _Q = 366	ΔM = 366	kNcm	
Diagramma del momento flettente (*) :	(l,p,t,q) = p	parabolico		
Fattore di lunghezza effettiva k (0,5-0,7-1)	k = 1	rotazione z-z libera delle estremità		
Fattore di lunghezza effettiva k _w (0,5-0,7-1)	k _w = 1	distorsione libera delle estremità		
Fattore di distribuzione momenti estremi :	ψ = 0,00	-1 < ψ < 1		
Dist. sezione da appoggio o punto di flesso :	x _s = 157,5	conferma !	0 cm	

b) Calcolo dei coefficienti di forma e dei parametri necessari a definire il momento critico elastico

nota (1) : *momento calcolato per trave semplicemente appoggiata*

Coeff. di forma (*) :	C1 = 1,127	C2 = 0,46	C3 = 0,525	
Dist. centro di taglio - baricentro e = cm	0,000		k _{wt} = 0	
Carico applicato all'estradosso della sezione ? (S, N)	N		ζ _g = 0	
Distanza centro di taglio - centro di carico z _g = cm	0,00		ζ _j = 0,013801	
I.1.2 (1) ψ _f = (J _{tf} -J _{ti}) / (J _{tf} +J _{ti})		ψ _f = 0,20	μ _{cr} = 1,13 (*)	
z _j = 0,45 · ψ _f · h _s	z _j = cm	1,31	N _{cr,y} = 284,4677 kN	
I _w = (1-ψ _f ²) · J _z · (h _s /2) ²	I _w = cm ⁶	0	N _{cr,z} = 30,49117 kN	

Momento critico : $M_{cr} = \mu_{cr} \cdot \pi \cdot [E \cdot J_z \cdot G \cdot J_t]^{0,5} / L =$ **3253** kNcm EN 1999-1-1

c) Calcolo dei parametri e dei fattori di instabilità

Lunghezza libera nel piano laterale :	L _z = 315 cm	EC9		
Raggi di inerzia nei due piani :	i _y = 5,83 cm	i _z = 1,91 cm		
Snellezze effettive per presso-flessione :	λ _y = 54	λ _z = 165	< 250	
Snellezze adimensionali corrispondenti :	λ̄ _y = 0,770	λ̄ _z = 2,351	<= 2	
Limite della snell. adim. per flesso-torsione :	λ̄ ₀ = 0,1	α _y = 1	< W _{pl} / W _{el}	
Snellezza per l'instabilità flesso-torsionale :	λ̄ _{LT} = 0,446	λ̄ _{LT,0} = 0,4		
verifica di stabilità flesso-torsionale necessaria				
Coeff. di imperfezione per presso-flessione :	α _y = 0,2	α _z = 0,2		
	φ _y = 0,863	φ _z = 3,489		
Coeff. di imperfezione per flesso-torsione :	α _{LT} = 0,20	α' _z = 1		
φ _{LT} = 0,5 · [1 + α _{LT} · (λ̄ _{LT} - λ̄ _{LT,0})] + λ̄ _{LT} ²	φ _{LT} = 0,604			
Coeff. di riduzione per presso-flessione :	χ _y = 0,797	χ _z = 0,165		
Coeff. di riduzione per flesso-torsione :	χ _{LT} = 0,989	χ _{min} = 0,165		
Fattori di progetto della sezione :	ω ₀ = 0,629	η _c ; ξ _{yc} = 0,800		
mom. estremi disuguali e/o azioni trasversali	ω _x = 0,788	γ _e = 1,000		
saldature locali alle estremità dell'elemento	ω _{LT} = 0,636	α'' _y = 1		

Capacità del momento flettente intorno a y : $M_{y,Rd} = \alpha''_y \cdot W_y \cdot f_o / \gamma_{M1} =$ **587** kNcm

Se fossero previste saldature localizzate lungo l'elemento si deve ipotizzare che la verifica di resistenza sia eseguita in corrispondenza di una zona HAZ e che la stabilità dell'elemento sia ulteriormente compromessa dal diffuso indebolimento. In questo caso i risultati della verifica sarebbero i seguenti :

VERIFICA DI RESISTENZA					
Area resistente a taglio :	$\beta = d / t = 94 > 39 \epsilon = 52,1$	$b_{\text{haz}} =$ <input type="text" value=""/>	$A_v =$ <input type="text" value="7,65"/>	cm^2	
Resistenza di progetto a taglio :	$v_1 = 0,47$	$V_{Rd} = v_1 \cdot A_v \cdot (f_o / 3^{1/2}) / \gamma_{M1} =$	<input type="text" value="26,49"/>	kN	
$a = \text{cm}$ <input type="text" value="100"/>	$V_{Ed} < 50\% V_{Rd}$	$\rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2 =$	<input type="text" value="0"/>		
Verifica di resistenza per sezione di classe			<input type="text" value="4"/>	$f_d = f_o / \gamma_{M1} =$	<input type="text" value="12,727"/>
$A_{f1} =$ <input type="text" value="2,74"/>	cm^2	$A_{f2} =$ <input type="text" value="1,66"/>	cm^2	$M_{\text{pl,Rd}} = W_{\text{pl,y}} \cdot f_d =$	<input type="text" value="816,55"/>
$R = [1 - (N_{Ed} / (A_{f1} + A_{f2}) / f_d)^2]$		$M_{y,Rd} = \alpha_y \cdot W_{y,el} \cdot f_d$	$M_{N,Rd} = M_{\text{pl,Rd}} \cdot R =$	<input type="text" value="816,25"/>	kNcm
$\alpha_y =$ <input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	$\eta_o =$ <input type="text" value="1,3"/>	$\gamma_o = \xi_o =$ <input type="text" value="1"/>	$M_{c,Rd} = W_{\text{eff}} \cdot f_d =$	<input type="text" value="586,99"/>
sezione con saldature locali (HAZ) o fori			$\gamma_{M2} =$ <input type="text" value="1,25"/>	$N_{Rd} = A_{\text{eff}} \cdot f_d =$	<input type="text" value="153,24"/>
in assenza di taglio :			$\omega_o = 0,63$	$[N_{Ed} / (\omega_o \cdot N_{Rd})]^{\eta_o} + [M_{Ed} / (\omega_o \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_o} =$	<input type="text" value="0,995"/>
per $V_{Ed} > 50\% V_{Rd}$			$t_{w,r} = t_w \cdot [1 - \rho]$	$[N_{Ed} / (\omega_o \cdot N_{v,Rd})]^{\eta_o} + [M_{Ed} / (\omega_o \cdot M_{yV,Rd})]^{\gamma_o} =$	<input type="text" value="0,000"/>
interazione $M_{Ed} / M_{c,Rd}$ <input type="text" value="0"/>				$(M_{Ed} + M_{f,Rd}) / 2 \cdot M_{N,Rd} + V_{Ed} / V_{Rd} \cdot (1 - M_{f,Rd} / M_{N,Rd}) =$	<input type="text" value="-----"/>

Mentre per la verifica di stabilità, con riferimento alla sezione di mezzaria si ha :

Coeff. di riduzione per presso-flessione :	$\chi_y =$ <input type="text" value="0,797"/>	$\chi_z =$ <input type="text" value="0,165"/>
Coeff. di riduzione per flessione-torsione :	$\chi_{LT} =$ <input type="text" value="0,989"/>	$\chi_{\text{min}} =$ <input type="text" value="0,165"/>
Fattori di progetto della sezione :	$\omega_o =$ <input type="text" value="0,629"/>	$\eta_c ; \xi_{yc} =$ <input type="text" value="0,800"/>
mom. estremi disuguali e/o azioni trasversali	$\omega_x =$ <input type="text" value="0,629"/>	$\gamma_c =$ <input type="text" value="1,000"/>
saldature locali lungo l'elemento	$\omega_{LT} =$ <input type="text" value="0,629"/>	$\alpha''_y =$ <input type="text" value="1"/>
Capacità del momento flettente intorno a y : $M_{y,Rd} = \alpha''_y \cdot W_y \cdot f_o / \gamma_{M1} =$ <input type="text" value="587"/>		

VERIFICA DI STABILITA' PER PRESSO-FLESSIONE - item 6.3.3.1 (1)-(5)

$$[N_{Ed} / (\chi_{\text{min}} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd})]^{\eta_c} + [M_{y,Ed} / (\omega_o \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_c} = \text{input type="text" value="1,108"} < 1 \quad \text{input type="text" value="NO!"}$$

VERIFICA DI STABILITA' PER FLESSO-TORSIONE - item 6.3.3.2 (1)-(2)

$$[N_{Ed} / (\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd})]^{\eta_c} + [M_{Ed} / (\omega_{LT} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{y,Rd})]^{\gamma_c} = \text{input type="text" value="1,119"} < 1 \quad \text{input type="text" value="NO!"}$$

In questo caso, come nei precedenti, bisognerebbe ricercare un materiale di maggiore resistenza e/o incrementare la sezione. Siccome il materiale previsto è già di elevata resistenza basterebbe incrementare lo spessore delle anime della parte scatolare della sezione da 2,1 mm a 3 mm per far rientrare nei limiti tutte le verifiche che vengono qui omesse.