A.D. 1308
unipg
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA
DIP. INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE

METAL PROFILE PRODUCTS
PROFILUMBRA®
BORGNINI GROUP

Caratterizzazione teorica, numerica e sperimentale di profilati metallici a freddo ORP HP nell'ambito delle normative vigenti

RELAZIONE GENERALE FINALE
PARTE 1

Gruppo di lavoro:

Prof. Ing. Massimiliano Gioffrè (Resp.scientifico)
Prof. Ing. Marco Mezzi (prec. Resp.scientifico)
Dott.Ing. Alessandro Fulco
Prof.Ing. Nicola Cavalagli

Luglio 2023

PROFILUMBRA

Relazione generale finale
Parte 1

Classificazione dei profilati metallici a freddo ORP HP

Rev. 04/07/2023

INDICE

1 Premessa 3
2 Descrizione dei profili di partenza (ORP EV) 4
2.1 Classificazione dei profili esistenti ORP EV 5
3 Descrizione dei profili modificati (ORP HP) 7
4 Norme di riferimento e procedure di calcolo 9
4.1 Classificazione delle sezioni secondo NTC 2018 9
4.2 Classificazione delle sezioni secondo EC3 12
4.3 Classificazione dei profili formati a freddo 15
5 Procedura operativa di valutazione dell'instabilità 16
5.1 Valutazione dell'instabilità locale 16
5.1.1 Piattabanda superiore – soluzione con due bugne 19
5.1.2 Piattabanda superiore – soluzione con tre bugne 23
5.1.3 Anima 24
5.2 Valutazione dell'instabilità distorsionale 28
5.2.1 Piattabanda superiore – soluzione con due bugne 30
5.2.2 Piattabanda superiore – soluzione con tre bugne 34
5.2.3 Anima 35
6 Classificazione dei nuovi profili ORP HP 39
6.1 Validazione con codice di calcolo 40
7 CONCLUSIONI 43

(pagina bianca)

1 PREMESSA

Il presente lavoro riguarda la valutazione dei profilati ORP HP formati a freddo di produzione Profilumbra ai fini della classificazione delle sezioni prevista sia dalle norme tecniche italiane che europee.

La classificazione viene effettuata valutando la sezione efficace del profilato secondo i metodi formulati nell'Eurocodice 3 (EN1993-1-3 ed EN 1993-1-5).

Infatti non risulta adeguato operare mediante le indicazioni fornite dalle NTC2018 (punto 4.2.3.1) in quanto relative a sezioni di profilati laminati o saldati e forme di sezioni convenzionale e non ascrivibili a quelle dei profilati ORP HP.

Lo studio ha l'obiettivo di classificare nuovi profili denominati **ORP HP** derivanti da modifiche della sezione dei profili **ORP EV** per esigenze commerciali e architettoniche già esistenti e in produzione.

2 DESCRIZIONE DEI PROFILI DI PARTENZA (ORP EV)

I profili di partenza ORP EV standard sono caratterizzati da 7 spessori diversi (da 1,5 a 5 mm), e da 8 diverse altezze della sezione (da 120 a 300 mm). Ciascuno di essi presenta flange superiori e inferiori di larghezze diverse e un certo numero di pieghe (bugne) sia sulle due anime che sulle flange superiori. In particolare, per tutti gli spessori, i profili di altezza fino a 250 mm presentano una bugna su ciascuna anima e una sulla flangia superiore, per le altezze 280 mm e 300 mm si hanno invece due bugne sulla flangia superiore.

I profili ORP EV sono stati sviluppati a seguito di un precedente studio che ha consentito la progettazione di configurazioni di irrigidimento finalizzate ad eliminare i fenomeni di instabilità locale e distorsionale.

I risultati della classificazione precedentemente condotta sono riportati nel paragrafo successivo.

Si evidenzia il fatto che non sono stati considerati profili di spessore 1,5 mm con altezza superiore a 180 mm.

Si hanno pertanto 51 profili esistenti per ciascuna delle diverse classi di acciaio, S235, S275 e S355, pertanto un totale di 153 sezioni.

Di seguito si riporta un elenco dei profili originari già oggetto di classificazione.

S235							
	spessore (mm)						
ORP EV 120	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 150	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 180	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 200		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 220		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 250		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 280		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 300		2	2,5	3	3,5	4	5

S275							
	spessore (mm)						
ORP EV 120	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 150	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 180	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 200		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 220		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 250		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 280		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 300		2	2,5	3	3,5	4	5

S355							
	spessore (mm)						
ORP EV 120	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 150	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 180	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 200		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 220		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 250		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 280		2	2,5	3	3,5	4	5
ORP EV 300		2	2,5	3	3,5	4	5

2.1 Classificazione dei profili esistenti ORP EV

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa della classificazione dei profili esistenti estrapolata dal precedente lavoro di ricerca. I profili sono codificati come segue:

"ORP EV a x b x c"

Con:

- a: larghezza della singola flangia inferiore
- b: altezza complessiva del profilo
- c: larghezza della flangia superiore

PROFILO	Sp.	Acciaio		
	mm	S235	S275	S355
ORP 80x300x250	2,0	3	3	4
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3
	5,0	3	3	3
ORP 80x280x250	2,0	3	3	4
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3
	5,0	3	3	3
ORP 60x250x160	2,0	3	3	3
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3

	4,0	3	3	3
	5,0	3	3	3
ORP 60x220x160	2,0	3	3	3
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3
	5,0	3	3	3
ORP 60x200x160	2,0	3	3	3
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3
	5,0	3	3	3

PROFILO	Sp.	Acciaio		
	mm	S235	S275	S355
ORP 50x180x140	1,5	3	3	3
	2,0	3	3	3
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3
	5,0	3	3	2
ORP 50x150x140	1,5	3	3	3
	2,0	3	3	3
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3
ORP 50x120x120	1,5	3	3	3
	2,0	3	3	3
	2,5	3	3	3
	3,0	3	3	3
	3,5	3	3	3
	4,0	3	3	3

3 DESCRIZIONE DEI PROFILI MODIFICATI (ORP HP)

La configurazione dei nuovi profili ORP HP è ottenuta a seguito di modifiche alle sezioni riguardanti principalmente:

- Allargamento della flangia superiore
- Allargamento delle flange inferiori
- Diminuzione della distanza netta tra le anime

Le modifiche sopra descritte risultano significative ai fini della classificazione della sezione, pertanto è stato necessario modificare la configurazione degli irrigidimenti presenti al fine di mantenere i profili in classe 3.

Le variazioni sono descritte nella tabella seguente in funzione dell'altezza complessiva del profilo e sono valide per tutti gli spessori adottati.

Altezza profilo	Larghezza flangia superiore				Larghezza flangia inferiore		
	ORP EV	ORP HP	Δ		ORP EV	ORP HP	Δ
mm	mm	mm	%		mm	mm	%
300	250	280	12,0		80	100	25,0
280	250	280	12,0		80	100	25,0
250	160	220	37,5		60	90	50,0
220	160	220	37,5		60	90	50,0
200	160	220	37,5		60	90	50,0
180	140	200	42,9		50	80	60,0
150	140	200	42,9		50	80	60,0
120	120	160	33,3		50	70	40,0

Gli incrementi di larghezza sono limitati per i profili maggiori (300 e 280 mm di altezza), mentre risultano notevoli dal punto di vista percentuale soprattutto per i profili più piccoli che presentavano larghezze iniziali inferiori.

I profili da verificare fanno riferimento alle configurazioni fornite da Profilumbra. A titolo di esempio si riportano alcuni esempi tipologici delle modifiche.

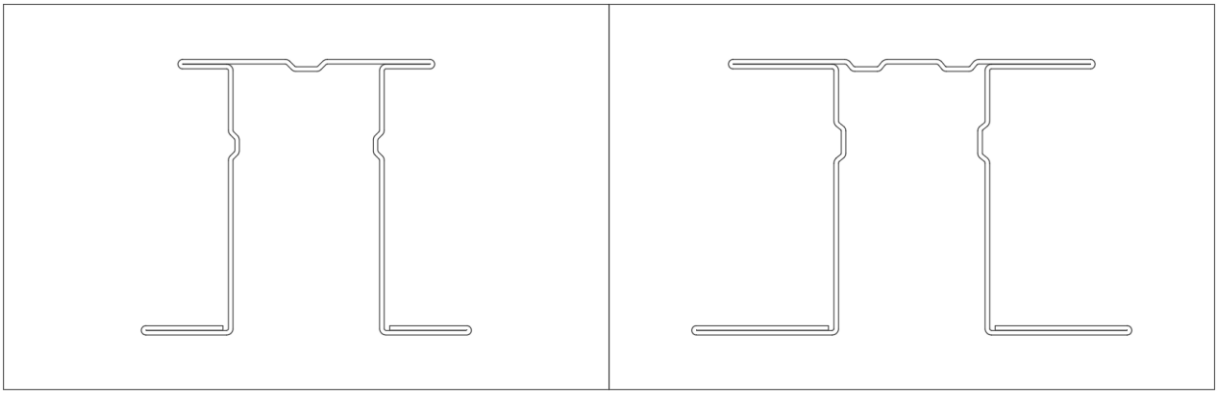


Figura 3-1 Confronto tra profilo ORP EV 150 originale (a sx) e la configurazione ORP HP 150 proposta (a dx) – nuova configurazione a doppia bugna

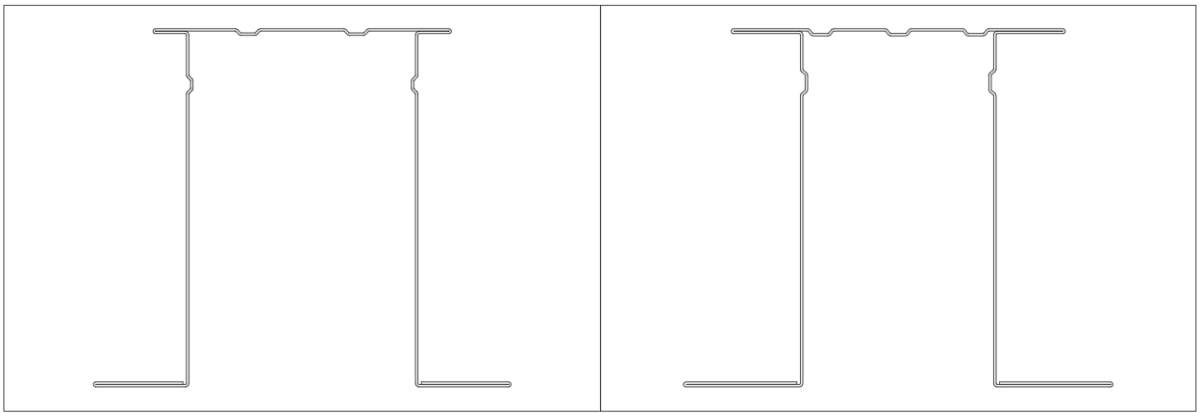


Figura 3-2 Confronto tra profilo ORP EV 300 originale (a sx) e la configurazione ORP HP 300 proposta (a dx) – nuova configurazione a tripla bugna

Si evidenzia che la configurazione geometrica è mantenuta uguale per tutti i profili aventi la stessa altezza, indipendentemente dalla classe di acciaio e dallo spessore. Pertanto si riporta di seguito una tabella riepilogativa delle classi di profili analizzati, con l'indicazione della configurazione di piattabanda adottata (se a doppia o tripla bugna).

Profilo	**Spessori**							**Configurazione adottata**
ORP HP 120	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	Doppia bugna
ORP HP 150	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	Doppia bugna
ORP HP 180	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	Doppia bugna
ORP HP 200		2	2,5	3	3,5	4	5	Doppia bugna
ORP HP 220		2	2,5	3	3,5	4	5	Doppia bugna
ORP HP 250		2	2,5	3	3,5	4	5	Doppia bugna
ORP HP 280		2	2,5	3	3,5	4	5	Tripla bugna
ORP HP 300		2	2,5	3	3,5	4	5	Tripla bugna

Complessivamente pertanto sono stati analizzati 153 profili (51 per ogni classe di resistenza).

Il dettaglio dei profili analizzati è riportato negli elaborati grafici di proprietà Profilumbra.

4 NORME DI RIFERIMENTO E PROCEDURE DI CALCOLO

4.1 Classificazione delle sezioni secondo NTC 2018

Le correnti norme italiane (NTC2018) al punto 4.2.3.1 prevedono una classificazione delle sezioni dei profili di acciaio in funzione della quale si differenziano le modalità di analisi e di verifica. Il citato punto 4.2.3.1 prevede che le sezioni trasversali degli elementi strutturali si classifichino in funzione della loro capacità rotazionale C_θ definita come

$C_\theta = \theta_r / \theta_y$

essendo θ_r e θ_y le curvature corrispondenti rispettivamente al raggiungimento della deformazione ultima ed allo snervamento. Sono previste quattro classi di sezioni.

- **Classe 1** (sezioni compatte): sezioni in grado di sviluppare una cerniera plastica avente la capacità rotazionale richiesta per l'analisi strutturale condotta con il metodo plastico (§4.2.3.2) senza subire riduzioni della resistenza. Possono classificarsi come tali le sezioni con capacità rotazionale $C_\theta \geq 3$.
- **Classe 2** (sezioni compatte): sezioni in grado di sviluppare il proprio momento resistente plastico, ma con capacità rotazionale limitata. Possono classificarsi come tali le sezioni con capacità rotazionale $C_\theta \geq 1{,}5$.
- **Classe 3** (sezioni moderatamente snelle): sezioni in cui le tensioni calcolate nelle fibre estreme compresse possono raggiungere la tensione di snervamento, ma per le quali l'instabilità locale impedisce lo sviluppo del momento resistente plastico.
- **Classe 4** (sezioni snelle): sezioni per le quali, per determinare la resistenza flettente, tagliante o normale, è necessario tener conto degli effetti dell'instabilità locale in fase elastica nelle parti compresse che compongono la sezione. In tal caso nel calcolo della resistenza la sezione geometrica effettiva va sostituita con una sezione "efficace".

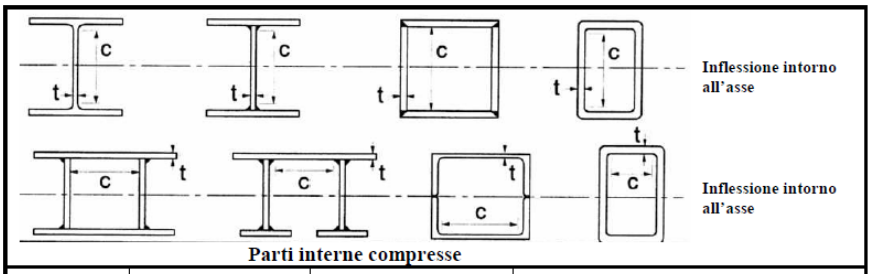
L'aspetto critico delle sezioni di Classe 4 è costituito dal fatto che nelle valutazioni di resistenza non si possono impiegare le caratteristiche geometriche della loro sezione reale, ma occorre invece impiegare le caratteristiche geometriche della loro sezione "efficace" che deve essere valutata di volta in volta. Inoltre queste sezioni non assicurano un impiego ottimale del materiale in quanto nel calcolo della sezione efficace vengono esclusi alcuni tratti degli elementi che compongono l'intera sezione.

Le NTC, nelle tabelle 4.2.III, 4.2.IV, 4.2.V, forniscono indicazioni per la classificazione delle sezioni delle forme più comuni.

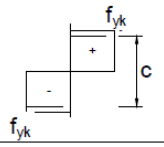
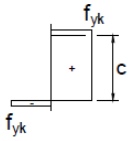
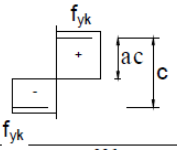
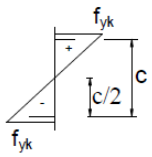
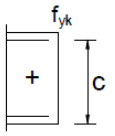
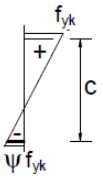
Ai fini pratici, per i casi più comuni di forma delle sezioni e di modalità di sollecitazione, la norma NTC 2018 fornisce indicazioni per la classificazione delle sezioni basate soltanto sull'esame delle dimensioni e degli spessori dei piatti componenti. Tali indicazioni sono contenute nelle Tabelle grafiche 4.2.III, 4.2.IV e 4.2.V. Le prime due di queste tabelle, inerenti però a profili laminati o saldati, sono riportate in stralcio nella Figura 4-1.

Si osserva quindi che la classificazione, pur riferendosi alla differenziazione del comportamento sviluppato dalla sezione in fase plastica, avviene in prima istanza soltanto sulla base dei rapporti dimensionali delle porzioni di sezione.

Le sezioni dei profili ORP oggetto dello studio non rientrano nell'ambito delle “forme comuni” riferite dalle tabelle sopra dette. Nel paragrafo C4.2.12 della Circolare NTC viene esplicitamente chiarito come il metodo di riferimento per l'analisi delle sezioni dei profili laminati a freddo ricadenti in classe 4 sia il metodo delle aree efficaci. Tale metodo prevede la penalizzazione della sezione nella sua larghezza con un fattore di riduzione ρ. Tale riduzione si riflette sulle caratteristiche di resistenza della sezione. Per la valutazione delle caratteristiche geometriche efficaci si fa riferimento a quanto indicato in UNI EN1993 1-3.

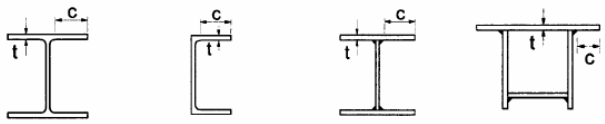


Parti interne compresse

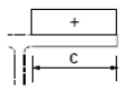
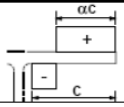
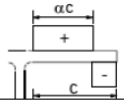
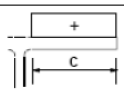
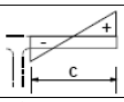
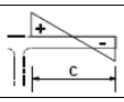
Classe	Parte soggetta a flessione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a flessione e a compressione
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)			
1	$c/t \le 72\varepsilon$	$c/t \le 33\varepsilon$	quando $\alpha > 0{,}5 : c/t \le \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \le 0{,}5 : c/t \le \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \le 83\varepsilon$	$c/t \le 38\varepsilon$	quando $\alpha > 0{,}5 : c/t \le \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \le 0{,}5 : c/t \le \frac{41{,}5\varepsilon}{\alpha}$
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)			
3	$c/t \le 124\varepsilon$	$c/t \le 42\varepsilon$	quando $\psi > -1 : c/t \le \frac{42\varepsilon}{0{,}67 + 0{,}33\psi}$ quando $\psi \le -1 : c/t \le 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$

$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Piattabande esterne



Profilati laminati a caldo — Sezioni saldate

Classe	Piattabande esterne soggette a compressione	Piattabande esterne soggette a flessione e a compressione	
		Con estremità in compressione	Con estremità in trazione
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)			
1	$c/t \le 9\varepsilon$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \le 10\varepsilon$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)			
3	$c/t \le 14\varepsilon$	$c/t \le 21\varepsilon\sqrt{k_e}$ Per k_e vedere EN 1993-1-5	

$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 4-1 - Stralcio Tabelle 4.2.III e 4.2.IV delle NTC2018 *(Massimi rapporti larghezza spessore per parti compresse)*

4.2 Classificazione delle sezioni secondo EC3

Anche la normativa europea Eurocodice 3 prevede la classificazione delle sezioni dei profilati metallici al fine di tener conto dell'entità della limitazione della resistenza e della capacità rotazionale della sezione trasversale per effetto dalla sua resistenza all'instabilità locale. La classificazione è analoga a quella già illustrata per le norme italiane. Le quattro classi di sezioni trasversali sono definite nel seguente modo e non si fa riferimento alla quantificazione della capacità rotazionale.

- **Classe 1**: sezioni in grado di sviluppare una cerniera plastica avente la capacità rotazionale richiesta per l'analisi plastica senza che si verifichi riduzione di resistenza.
- **Classe 2:** sezioni in grado di sviluppare il proprio momento resistente plastico, ma che hanno una capacità rotazionale limitata per effetto dell'instabilità locale.
- **Classe 3**: sezioni nelle quali le tensioni nelle fibre estreme compresse della membratura di acciaio, ipotizzando una distribuzione elastica di tensioni, possono raggiungere la resistenza di snervamento, ma per le quali l'instabilità locale può impedire lo sviluppo del momento resistente plastico.
- **Classe 4:** sezioni nelle quali l'instabilità locale si verifica prima che in uno o più elementi della sezione trasversale si raggiunga la tensione di snervamento.

In particolare sono fornite le prescrizioni seguenti.

In corrispondenza della localizzazione delle cerniere plastiche, si raccomanda che la sezione trasversale della membratura abbia una capacità rotazionale non minore della rotazione richiesta in corrispondenza della cerniera plastica.

Nelle sezioni trasversali di classe 4 possono essere utilizzate le larghezze "efficaci" per tenere in debito conto le riduzioni di resistenza dovute agli effetti dell'instabilità locale (EN 1993-1-5, punto 4.4).

La classificazione di una sezione trasversale dipende dal rapporto tra la larghezza e lo spessore degli elementi compressi. Gli elementi compressi includono ogni elemento della sezione trasversale che, per la combinazione di carico considerata, sia totalmente o parzialmente compresso.

I vari elementi compressi in una sezione trasversale (quali anima o ala) possono, generalmente, appartenere a classi differenti.

Una sezione trasversale è classificata secondo la più alta (meno favorevole) classe dei suoi elementi compressi. Salvo le eccezioni specificate.

Si raccomanda che per gli elementi compressi delle sezioni trasversali delle classi 1, 2 e 3 i rapporti dimensionali limite siano ottenuti dal prospetto 5.2. Si raccomanda che un elemento della sezione trasversale che non soddisfi i limiti per la classe 3 sia considerato di classe 4.

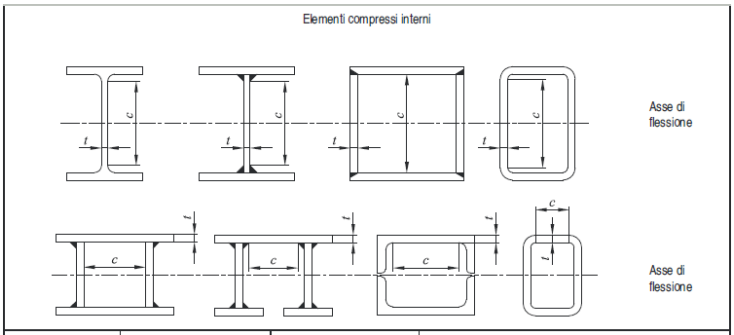
Le sezioni di classe 4 possono essere trattate come sezioni di classe 3 se i rapporti tra larghezza e spessore sono minori dei rapporti dimensionali limite ottenuti dal prospetto 5.2 per la classe 3 quando è incrementato per $\sqrt{(f_y/\gamma_{M0})/\sigma_{com,ed}}$, dove $\sigma_{com,ed}$ è la tensione di compressione massima di progetto nell'elemento della sezione considerata ottenuta dall'analisi del primo ordine o, quando necessario, dall'analisi del secondo ordine.

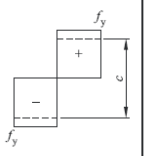
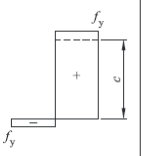
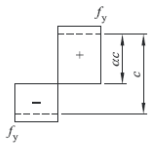
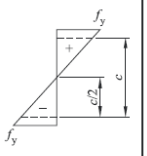
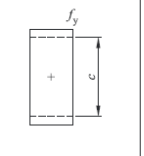
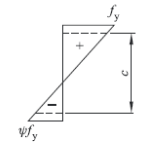
In ogni caso, nella verifica della resistenza alla instabilità di progetto di una membratura, condotta utilizzando il punto 6.3, si raccomanda che i rapporti dimensionali limite per la classe 3 siano sempre ottenuti dal prospetto 5.2.

Sezioni trasversali aventi un'anima di classe 3 e ali di classe 1 o 2 possono essere classificate come sezioni trasversali di classe 2 con un'anima efficace definita in conformità al punto 6.2.2.4.

Quando l'anima è considerata elemento resistente ai soli sforzi di taglio e si ipotizza che essa non contribuisca alla resistenza a flessione e a sforzo normale della sezione trasversale, la sezione trasversale può essere considerata come di classe 2, 3 o 4, in funzione della sola classe dell'ala.

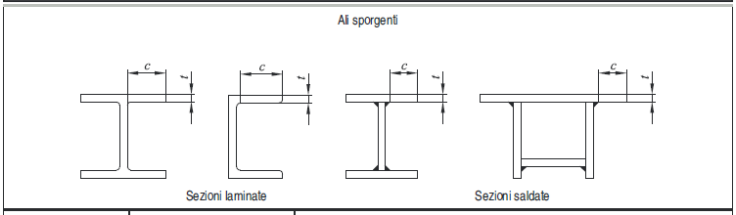
Uno stralcio del prospetto 5.2 dell'Eurocodice 3 contenente i "rapporti massimi larghezza spessore per elementi compressi" ai fini della classificazione è riportato nella Figura 4-2.

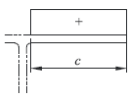
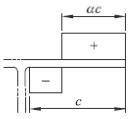
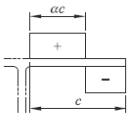
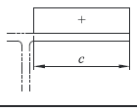
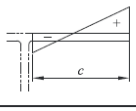
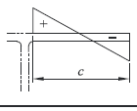


Classe	Elemento soggetto a flessione	Elemento soggetto a compressione	Elemento soggetto a flessione e compressione
Distribuzione delle tensioni negli elementi (compressione positiva)			
1	$c/t \le 72\varepsilon$	$c/t \le 33\varepsilon$	quando $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \le 83\varepsilon$	$c/t \le 38\varepsilon$	quando $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{41{,}5\varepsilon}{\alpha}$
Distribuzione delle tensioni negli elementi (compressione positiva)			
3	$c/t \le 124\varepsilon$	$c/t \le 42\varepsilon$	quando $\psi > -1$: $c/t \le \frac{42\varepsilon}{0{,}67 + 0{,}33\psi}$ quando $\psi \le -1$*): $c/t \le 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\Psi \le -1$ si applica quando la tensione di compressione $\sigma \le f_y$ o in alternativa la deformazione di trazione $\varepsilon_y > f_y/E$.



Classe	Elemento soggetto a flessione	Elemento soggetto a flessione e compressione	
		Estremità compressa	Estremità tesa
Distribuzione delle tensioni negli elementi (compressione positiva)			
1	$c/t \le 9\varepsilon$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \le 10\varepsilon$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Distribuzione delle tensioni negli elementi (compressione positiva)			
3	$c/t \le 14\varepsilon$	$c/t \le 21\ \varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Per k_σ vedere EN 1993-1-5	

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 4-2 - Stralcio del prospetto 5.2 di EC3 - rapporti massimi larghezza-spessore per elementi compressi

4.3 Classificazione dei profili formati a freddo

In assenza di indicazioni contrarie, sia nelle NTC2018 che nell'EC3, la classificazione delle sezioni dei profili formati a freddo è da ricondurre a quella delle sezioni dei profilati laminati illustrata nei paragrafi precedenti.

D'altra parte, come già riportato al §4.1 ed al §4.2, in sede di valutazione della resistenza dei profili le NTC2018 prevedono che "*nel caso in cui si abbiamo elementi con sezioni di classe 4 può farsi riferimento alle caratteristiche geometriche "efficaci", area efficace Aeff, modulo di resistenza efficace Weff, modulo di inerzia efficace Jeff, valutati seguendo il procedimento indicato in UNI EN1993-1-5*". Specificando che *"Nel caso di elementi strutturali formati a freddo e lamiere sottili, per valutare le caratteristiche geometriche "efficaci" si può fare riferimento a quanto indicato in UNI EN1993-1-3."*

I profili formati a freddo sono pertanto trattati contestualmente a quelli laminati, differenziandoli solo per le procedure di valutazione delle aree efficaci.

5 PROCEDURA OPERATIVA DI VALUTAZIONE DELL'INSTABILITÀ

La procedura seguita ed illustrata nel seguito è quella generale riportata in EN1993-1-5 per ciò che riguarda l'instabilità locale, mentre viene seguita la procedura riportata in EN1993-1-3 per ciò che riguarda l'instabilità distorsionale dell'irrigidimento.

Le verifiche sono state condotte attraverso l'utilizzo di un foglio di calcolo semi-automatizzato secondo le procedure descritte nel seguito.

5.1 Valutazione dell'instabilità locale

La potenzialità di instabilità locale va valutata su ogni tratto del profilo soggetto a compressione. L'eventuale presenza del fenomeno, governato dal parametro snellezza λ, genera una penalizzazione della sezione reagente mediante un fattore di riduzione ρ.

Si è dunque valutato per ogni tratto costituente la flangia e per l'anima il coefficiente di riduzione ρ. Esso è valutato in modo diverso in base alle condizioni di vincolo dei singoli elementi.

Per elementi doppiamente vincolati (piattabanda superiore, piattabanda risvoltata, risvolto verticale, anima) valgono le seguenti espressioni

(2) The reduction factor ρ may be taken as follows:

– internal compression elements:

$$\rho = 1{,}0 \qquad \text{for } \bar{\lambda}_p \le 0{,}673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}055\,(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \le 1{,}0 \qquad \text{for } \bar{\lambda}_p > 0{,}673 \text{ , where } (3+\psi) \ge 0 \qquad (4.2)$$

Per elementi con un estremo libero valgono le seguenti espressioni

– outstand compression elements:

$$\rho = 1{,}0 \qquad \text{for } \bar{\lambda}_p \le 0{,}748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}188}{\bar{\lambda}_p^2} \le 1{,}0 \qquad \text{for } \bar{\lambda}_p > 0{,}748 \qquad (4.3)$$

Nelle precedenti espressioni

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\,\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

- λ_p è la snellezza relativa;

- b è la larghezza appropriata dell'elemento, tale larghezza rappresenta la larghezza compresa tra due irrigidimenti;
- t è lo spessore dell'elemento;
- $\varepsilon = (235/f_{yk})^{0,5}$;
- k_σ = fattore di instabilità.

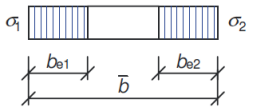
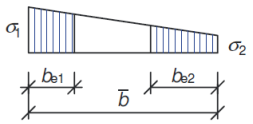
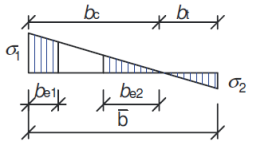
Quest'ultimo dipende dalla distribuzione delle tensioni e dalle condizioni al contorno dell'elemento, quindi bisogna anzitutto definire il rapporto

$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$

tra le tensioni σ_2, σ_1

Per gli elementi compresi tra due irrigidimenti i valori di k_σ in funzione di ψ sono definiti nella tabella 4.1 della EN1993-1-5:2006 riportata in stralcio di seguito.

Table 4.1: Internal compression elements

Stress distribution (compression positive)	Effective[P] width b_{eff}
A 	$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho\ \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5\ b_{eff}$
B 	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\ \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
C 	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\ b_c = \rho\ \bar{b} / (1-\psi)$ $b_{e1} = 0,4\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6\ b_{eff}$

$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Buckling factor k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98\ (1 - \psi)^2$

Figura 5-1 - Tabella 4.1 della EN1993-1-5:2006

Per gli elementi con un estremo libero i valori di k_σ in funzione di ψ sono definiti nella tabella 4.2 della EN1993-1-5:2006 riportata in stralcio di seguito.

Table 4.2: Outstand compression elements

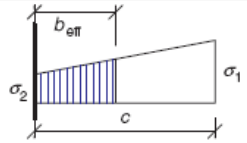
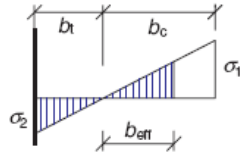
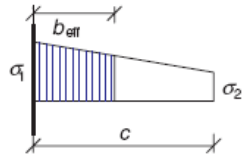
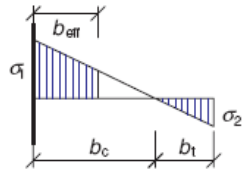
Stress distribution (compression positive)				Effective[p] width b_{eff}
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, c$
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c / (1-\psi)$
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$
Buckling factor k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, c$
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c / (1-\psi)$
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Buckling factor k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Figura 5-2 - Tabella 4.2 della EN1993-1-5:2006

Affinché un elemento doppiamente vincolato non subisca fenomeni di instabilità locale è necessario che

$\lambda_p \leq 0,673$,

mentre per elementi con un estremo libero affinché non si instauri instabilità locale è necessario che

$\lambda_p \leq 0,748$.

Si procede dunque al calcolo delle larghezze efficaci b_{eff} e dei tratti reagenti b_{e1} e b_{e2}. Tali tratti non solo definiscono l'area efficace del profilo che, nel caso di penalizzazione nulla, è uguale all'area nominale, ma vanno a definire le aree efficaci degli irrigidimenti. Tutti gli elementi che presentano un coefficiente di riduzione ρ minore di 1 sono da considerare in classe 4 in quanto soggetti a fenomeni di instabilità locale.

La procedura di verifica sopra descritta è stata effettuata per tutti i tratti che potrebbero essere soggetti a instabilità, compresi tra le pieghe di irrigidimento previste.

Alcuni profili, malgrado l'applicazione di irrigidimenti, continuano a manifestare fenomeni di instabilità locale. Per essi non è possibile eliminare tale fenomeno in quanto le soluzioni da attuare risultano non percorribili nell'ambito del processo di presso-piegatura. Tali profili (il 9% del totale) sono da considerarsi in classe 4 e dunque da trattare con il metodo delle aree efficaci.

Si evidenzia inoltre che invertendo la formulazione della snellezza relativa si può definire una larghezza appropriata massima $b_{p,lim}$ che, affinché non si abbiano problemi di instabilità locale, non può essere superata dai tratti di sezione oggetto di verifica.

$$b_{p,lim} = 28{,}4\varepsilon\lambda_p t\sqrt{k_\sigma}$$

Nel seguito viene riportata la procedura operativa adottata per i diversi componenti dei profili analizzati

5.1.1 *Piattabanda superiore – soluzione con due bugne*

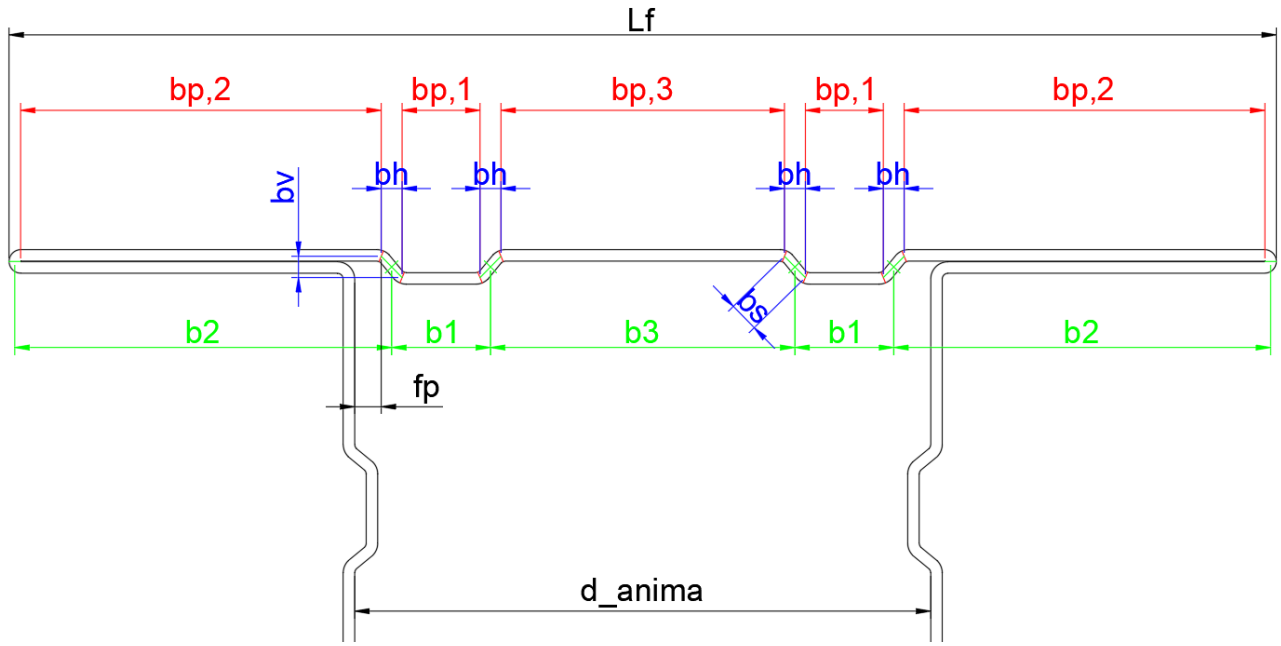


Figura 5-3 Schema dei parametri geometrici di riferimento per la soluzione a doppia bugna.

La soluzione con due bugne è stata adottata per la maggior parte dei profili, in quanto la singola bugna utilizzata per i profili di partenza non risultava mai sufficiente all'irrigidimento nella nuova configurazione.

A titolo di esempio nel seguito si riportano stralci delle tabelle di verifica riguardanti il profilo ORP HP 200 di spessore 2 mm e acciaio classe S275.

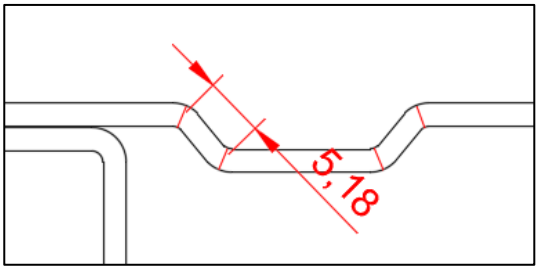
In riferimento alla Figura 5-3, la procedura di verifica seguita prevede di fissare in fase di input le grandezze geometriche globali della sezione quali:

- Larghezza flangia (L_f): la larghezza complessiva della flangia superiore, misurata tra i lembi esterni.
- Interasse anime (d_{anima}): è la luce netta tra le anime.
- Altezza profilo: è l'altezza complessiva della sezione.
- Caratterizzazione dell'acciaio.

ORP HP 200				
SPESSORE		**2**	**mm**	
Plane elements with edge stiffeners 5.5.3.2				
Larghezza flangia superiore	b	220	mm	
Interasse anime		100	mm	
Altezza profilo (tutto fuori)		200	mm	
Larghezza flange inferiori		90	mm	
Spessore	t	2	mm	
Resistenza a trazione	f_u	430	MPa	
Tensione di snervamento	f_y	275	MPa	
Tensione di snervamento base	f_{yb}	275	MPa	
Tensione di snervamento media	f_{ya}	275	MPa	
Modulo elastico	E	200000	MPa	
Modulo di Poisson	ν	0,3		

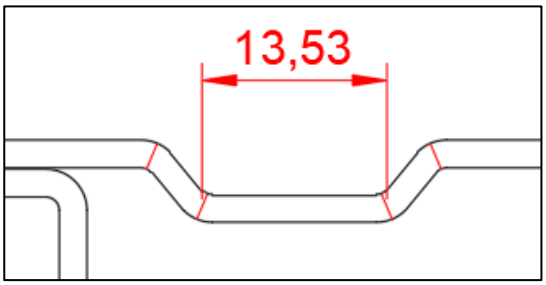
Successivamente vengono definiti i parametri relativi agli irrigidimenti:

- **STEP 1**: Lunghezza (b_s) e inclinazione della piega (α). Per la lunghezza della piega è stato fatto riferimento al centro dei due tratti curvilinei che delimitano la piega.



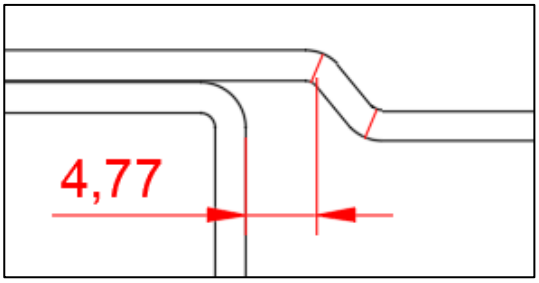
Lunghezza piegatura (in diagonale)	b_s	**5,2**	mm
Inclinazione piega sulla verticale	α	**45**	gradi =
Larghezza proiezione piega	b_h	3,676955	
Altezza proiezione piega	b_v	3,676955	

- **STEP 2**: Lunghezza del tratto $b_{p,1}$, compreso tra le due pieghe della singola bugna. Si fa riferimento al centro dei due tratti curvilinei.



tratti interni b_{p1}	b_{p1}	**13,5**	**mm**

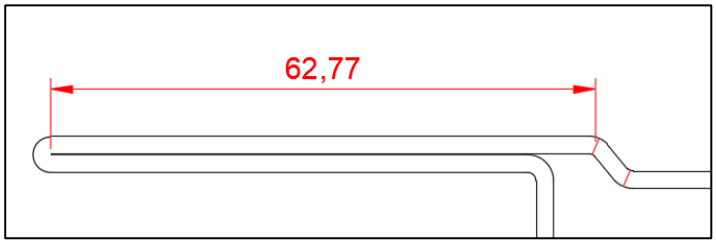
- **STEP 3**: Distanza anima irrigidimento (f_p), rappresenta la distanza tra il lembo interno dell'anima e l'inizio della piega assunto sul centro del primo tratto curvilineo.



distanza anima irrigidimento	4,8 mm

Attraverso questi parametri viene calcolata la larghezza appropriata $b_{p,2}$ che rappresenta la lunghezza netta del primo tratto di flangia, escludendo quindi la lunghezza della piega di estremità.

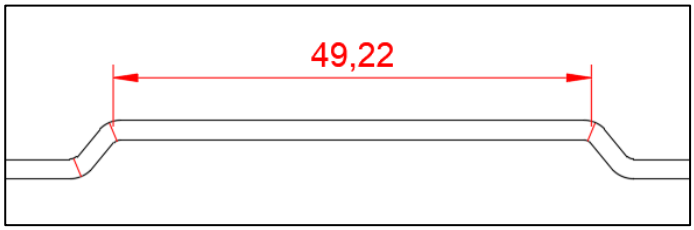
$$b_{p,2} = \frac{1}{2} \cdot \left(L_f - d_{anima}\right) + f_p - t$$



Ascissa minima per inizio piega	$b_{p2,minima}$	62,8	mm

- **STEP 4**: Viene quindi calcolata la larghezza $b_{p,3}$, cioè la porzione di piattabanda intermedia tra due bugne.

$$b_{p,3} = L_f - 2 \cdot \left(b_{p,2} + b_{p,1}\right) - 4 \cdot b_h - 2 \cdot t$$



tratti interni b_{p3}	b_{p3}	48,69	mm

- **STEP 5**: A questo punto vengono verificati a instabilità locale tutti i tratti della piattabanda superiore:

1) Risvolto verticale

La lunghezza di verifica viene determinata come

$b_{pc} = 2 \times t + 2$

5.5.3.2 clause (5) b) CALCOLO LARGHEZZE EFFICACI RISVOLTO VERTICALE				
larghezza appropriata	b_{pc}	6	mm	
Tensione lembo sup	σ_1	275	MPa	
Tensione lembo inf	σ_2	258,6181	MPa	
Coeff. $\psi = \sigma 2 / \sigma 1$	ψ	0,940429	from (Table 4.1 EN1993-1-5)	
Buckling factor	k_σ	4,119714		
Coeff. ε	ε	0,924416		
$(\bar{\lambda}_p)$		0,056299		
Reduction factor	**ρ**	**1**	**ELEMENTO ADEGUATO OK**	
Larghezza efficace	c_{eff}	6	mm	
Larghezza efficace sup	c_{e1}	3	mm	
Larghezza efficace inf	c_{e2}	3	mm	

2) Piattabanda superiore risvoltata

La lunghezza di verifica viene determinata come

$\underline{b} = (b - d_{anime})/2$

5.5.3.2 clause (4) CALCOLO LARGHEZZE EFFICACI PIATTABANDA RISVOLTATA				
Procedura EN1993-1-5 (ref. EN1993-1-3 5.5.2)				
larghezza appropriata	$\bar{b}$	60	mm	
Tensione lembo sx	σ_1	258,6181	MPa	
Tensione lembo dx	σ_2	258,6181	MPa	
Coeff. $\psi = \sigma2 / \sigma1$	ψ	1	from (Table 4.1 EN1993-1-5)	
Buckling factor	k_s	4		
Coeff. ε	ε	0,924416		
$(\bar{\lambda}_p)^-$		0,571354		
Reduction factor	**ρ**	**1**	**ELEMENTO ADEGUATO OK**	
Larghezza efficace	b_{eff}	60	mm	
Larghezza efficace sx	b_{e1}	30	mm	
Larghezza efficace dx	b_{e2}	30	mm	$=d_{eff}$

3) Piatti superiori esterni agli irrigidimenti ($b_{p,2}$)

5.5.3.3 clause (1) CALCOLO LARGHEZZE EFFICACI PIATTI ESTERNI AGLI IRRIGIDIMENTI				b_{p2}
Procedura EN1993-1-5 (ref. EN1993-1-3 5.5.2)				
Larghezza sx da asse irrigidimento	b_1	17,17696	mm	
Larghezza dx da asse irrigidimento	b_2	65,63848	mm	
Larghezza elemento piano sx	$b_{p,1}$	13,5		
Larghezza elemento piano dx	$b_{p,2}$	62,8		
Larghezza appropriata	$\bar{b}$	62,8	mm	
Tensione lembo sx	σ_1	275	MPa	
Tensione lembo dx	σ_2	275	MPa	
Coeff. $\psi = \sigma2 / \sigma1$	ψ	1	from (Table 4.1 EN1993-1-5)	
Buckling factor	k_σ	4		
Coeff. ε	ε	0,924416		
$(\bar{\lambda}_p)^-$ $(\bar{\lambda}_$		0,598017		
Reduction factor	**ρ**	**1**	**ELEMENTO ADEGUATO OK**	
Larghezza efficace	b_{eff}	62,8	mm	
Larghezza efficace sx	$b_{2,e1}$	31,4	mm	
Larghezza efficace dx	$b_{2,e2}$	31,4	mm	

4) Piatti superiori interni agli irrigidimenti ($b_{p,1}$)

5.5.3.3 clause (1) CALCOLO LARGHEZZE EFFICACI PIATTO INTERNO AGLI IRRIGIDIMENTI				b_{p1}
Procedura EN1993-1-5 (ref. EN1993-1-3 5.5.2)				
Larghezza sx da asse irrigidimento	b_3	52,36913	mm	
Larghezza dx da asse irrigidimento	b_1	17,17696	mm	
Larghezza elemento piano sx	$b_{p,1}$	13,5		
Larghezza elemento piano dx	$b_{p,3}$	48,69		
Larghezza appropriata	$\bar{b}$	13,5	mm	
Tensione lembo sx	σ_1	275	MPa	
Tensione lembo dx	σ_2	275	MPa	
Coeff. $\psi = \sigma2 / \sigma1$	ψ	1	from (Table 4.1 EN1993-1-5)	
Buckling factor	k_σ	4		
Coeff. ε	ε	0,924416		
$(\bar{\lambda}_p)^-$ $(\bar{\lambda}_$		0,128555		
Reduction factor	**ρ**	**1**	**ELEMENTO ADEGUATO OK**	
Larghezza efficace	b_{eff}	13,5	mm	
Larghezza efficace sx	$b_{1,e1}$	6,75	mm	
Larghezza efficace dx	$b_{1,e2}$	6,75	mm	

5) Piatto superiore centrale ($b_{p,3}$)

5.5.3.3 clause (1) CALCOLO LARGHEZZE EFFICACI PIATTO CENTRALE				b_{p3}
Procedura EN1993-1-5 (ref. EN1993-1-3 5.5.2)				
Larghezza sx da asse irrigidimento	b_1	17,17696	mm	
Larghezza dx da asse irrigidimento	b_3	52,36913	mm	
Larghezza elemento piano sx	$b_{p,3}$	48,69218		
Larghezza elemento piano dx	$b_{p,1}$	13,5		
Larghezza appropriata	$\bar{b}$	48,69218	mm	
Tensione lembo sx	σ_1	275	MPa	
Tensione lembo dx	σ_2	275	MPa	
Coeff. $\psi = \sigma2 / \sigma1$	ψ	1	from (Table 4.1 EN1993-1-5)	
Buckling factor	k_σ	4		
Coeff. ε	ε	0,924416		
$(\bar{\lambda}_p)^-$ $(\bar{\lambda}_$		0,463675		
Reduction factor	**ρ**	**1**	**ELEMENTO ADEGUATO OK**	
Larghezza efficace	b_{eff}	48,69218	mm	
Larghezza efficace sx	$b_{1,e1}$	24,34609	mm	
Larghezza efficace dx	$b_{1,e2}$	24,34609	mm	

Come evidenziato dai valori ottenuti per nelle diverse porzioni per il parametro ρ che risulta sempre pari a 1, non sono presenti fenomeni di instabilità locale.

5.1.2 *Piattabanda superiore – soluzione con tre bugne*

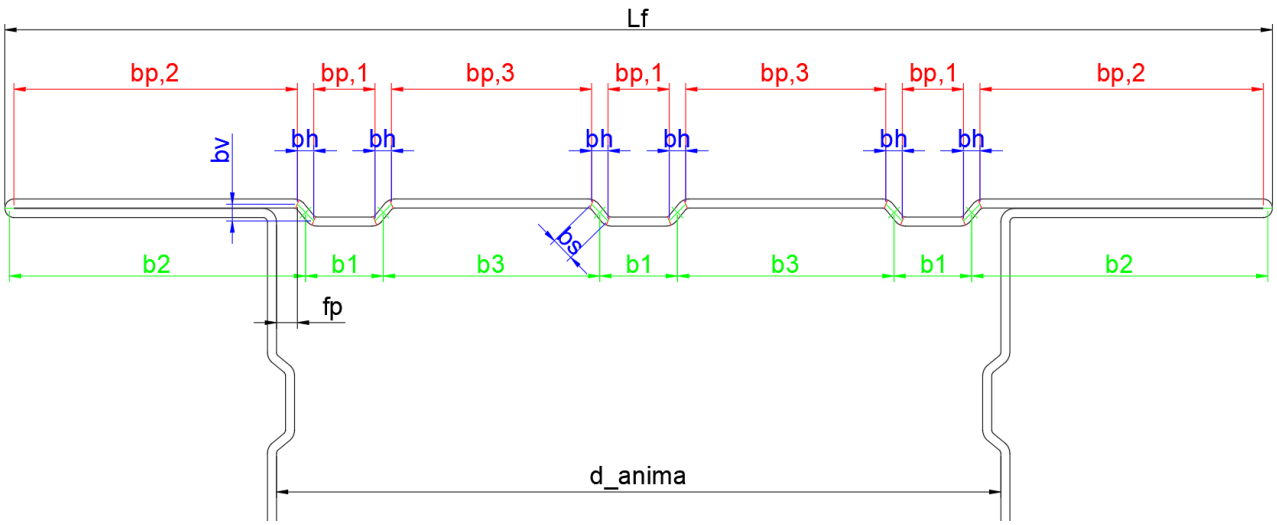


Figura 5-4 Schema dei parametri geometrici di riferimento per la soluzione a tripla bugna.

Le soluzioni con tre bugne si rendono necessarie solo nei casi in cui con la doppia bugna non si risolvono i problemi di instabilità locale. Questo riguarda le tipologie di profili con la larghezza di flangia maggiore (ORP HP 280 –ORP HP 300).

La procedura di calcolo adottata in questo caso è analoga al caso precedente, l'unica differenziazione sta nel calcolo del parametro di larghezza appropriata $b_{p,3}$, determinato come:

$$b_{p,3} = \frac{1}{2} \cdot \left(L_f - 2 \cdot b_{p,2} - 3 \cdot b_{p,1} - 6 \cdot b_h - 2 \cdot t\right)$$

Differenza che si rende necessaria in quanto in questa configurazione sono presenti due tratti centrali $b_{p,3}$.

5.1.3 *Anima*

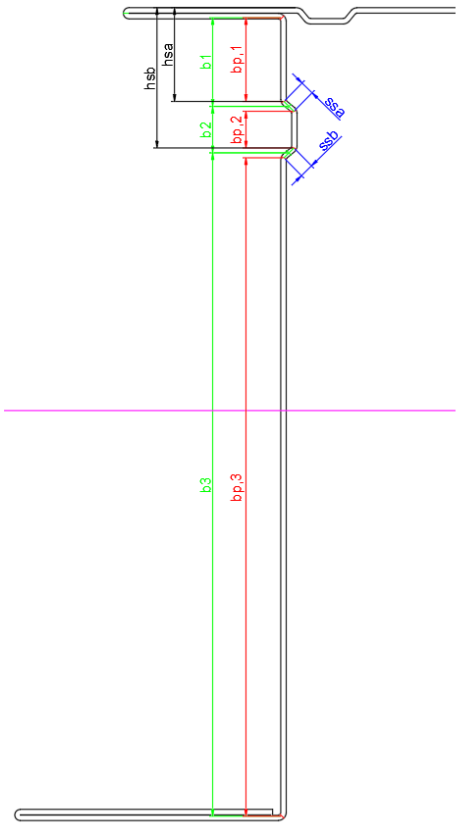


Figura 5-5 Schema dei parametri geometrici di riferimento per la soluzione dell'anima.

La verifica a instabilità locale della porzione compressa delle anime è effettuata in analogia a quanto indicato per la piattabanda, tenendo però in considerazione il gradiente di tensione che si viene a sviluppare tra il lembo superiore e il lembo inferiore utilizzando pertanto le relative formulazioni previste dalle norme.

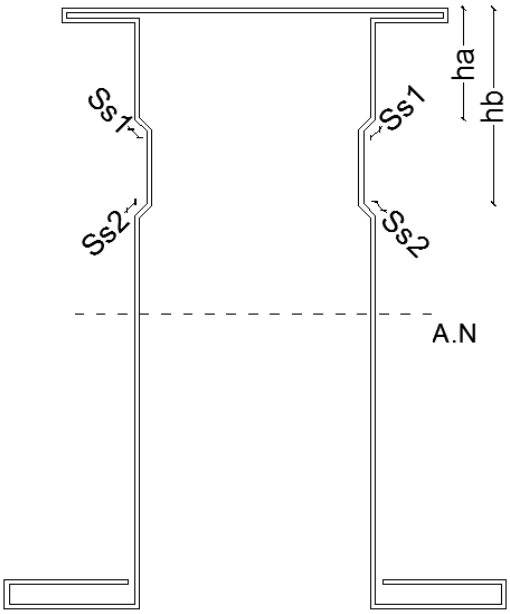
In considerazione del fatto che le anime dei profili non hanno subito sostanziali variazioni rispetto alla condizione già verificata dei profili ORP EV, è stata fatta una valutazione sulla sezione di altezza maggiore (ORP HP 300) con classe di acciaio S355 e spessore 2 mm, che rappresenta la condizione più gravosa dell'intera gamma di profili, della quale si riportano gli stralci delle tabelle di calcolo.

I parametri geometrici globali vengono definiti nella stessa scheda già utilizzata per la piattabanda superiore. Si hanno pertanto:

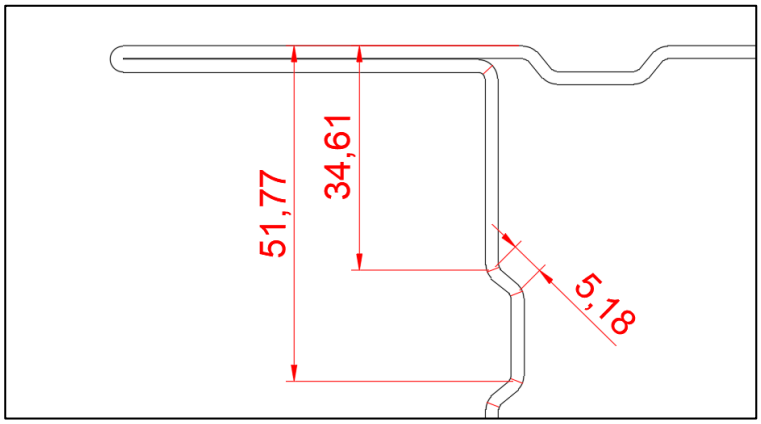
- Larghezza flangia (L_f): la larghezza complessiva della flangia superiore, misurata tra i lembi esterni.
- Interasse anime (d_{anima}): è la luce netta tra le anime.
- Altezza profilo: è l'altezza complessiva della sezione.
- Caratterizzazione dell'acciaio.

ORP HP 300				
SPESSORE	**2**	**mm**		
Plane elements with edge stiffeners 5.5.3.2				
Larghezza flangia superiore	b	280	mm	
Interasse anime		160	mm	
Altezza profilo (tutto fuori)		300	mm	
Larghezza flange inferiori		100	mm	
Spessore	t	2	mm	
Resistenza a trazione	f_u	510	MPa	
Tensione di snervamento	f_y	355	MPa	
Tensione di snervamento base	f_{yb}	355	MPa	
Tensione di snervamento media	f_{ya}	355	MPa	
Modulo elastico	E	200000	MPa	
Modulo di Poisson	ν	0,3		

La seconda fase prevede l'inserimento dei parametri geometrici utili alla definizione degli irrigidimenti, in particolare:



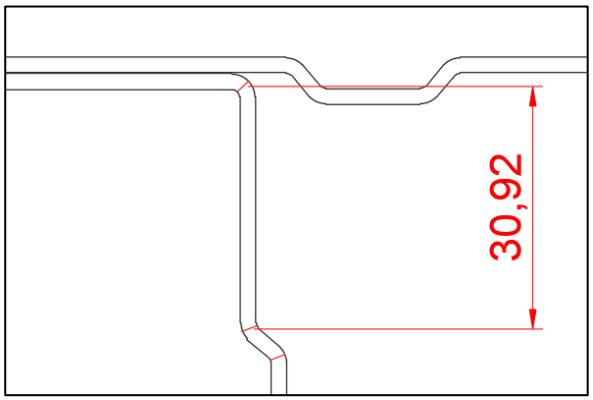
- Quota di inizio della prima piega (h_{sa}), riferito all'estradosso della sezione;
- Lunghezza della prima piega (S_{sa});
- Inclinazione della prima piega (α_a);
- Quota di inizio della seconda piega (h_{sb}), riferito all'estradosso della sezione;
- Lunghezza della prima piega (S_{sb});
- Inclinazione della seconda piega (α_b).



ANIMA CON 2 BENDS				
quota dall'estradosso flangia sup	hsa	34,60	mm	
lunghezza diagonale piega	Ssa	5,20	mm	
rispetto alla verticale	αa	45,00	°	0,785398
proiezione orizzontale piega	p_{hsa}	3,6769553	mm	
proiezione verticale piega	p_{vsa}	3,6769553	mm	
quota dall'estradosso flangia sup	hsb	51,8	mm	
lunghezza diagonale seconda piega	Ssb	5,20	mm	
rispetto alla verticale	αb	45,00	°	0,785398
proiezione orizzontale piega	p_{hsb}	3,6769553	mm	
proiezione verticale piega	p_{vsb}	3,6769553	mm	

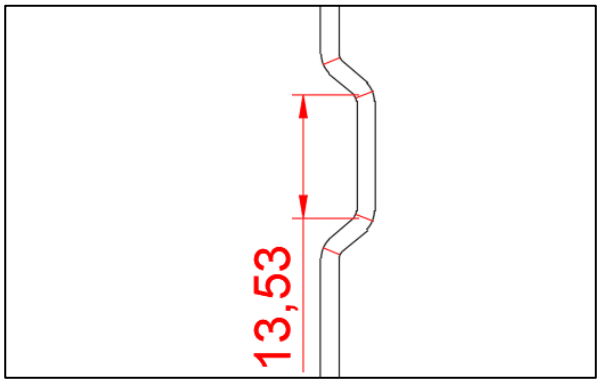
Si procede a questo punto al calcolo delle larghezze appropriate $b_{p,1}$, $b_{p,2}$ e $b_{p,3}$ mediante le seguenti espressioni:

$$b_{p,1} = h_{sa} - 2 \cdot t$$



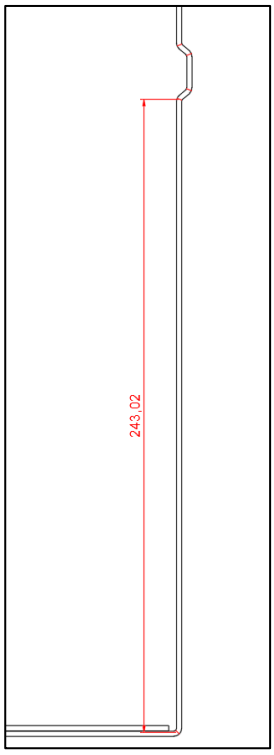
tratto 1	bp1	30,60	mm

$$b_{p,2} = h_{sb} - h_{sa} - p_{vsa}$$



tratto 2	bp2	13,52	mm

$$b_{p,3} = H_{tot} - t - h_{sb} - p_{vsb}$$



tratto 3	bp3	242,52	mm

Vengono infine verificati a instabilità locale tutti e tre i tratti dell'anima appena definiti, tenendo conto nelle formulazioni dell'effettivo andamento delle tensioni tra il lembo superiore e il lembo inferiore secondo la metodologia descritta al Paragrafo 5.1.

- Piatto al di sopra dell'irrigidimento ($b_{p,1}$)

calcolo tratto 1			
Larghezza appropriata	b_{p1}	30,60	mm
Tensione lembo superiore	σ1	345,45	N/mm²
Tensione lembo inferiore	σ2	272,40	N/mm²
Coeff. ψ = σ2 / σ1	ψ	0,79	
Buckling factor	k_σ	4,46	
	λ_p	0,31	
coef. di penalizzazione	ρ	1,00	
Larghezza efficace	b_{1eff}	30,60	mm
Larghezza compressa	bc	30,60	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{1,e1}$	14,53	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{1,e2}$	16,07	mm

- Piatto compreso tra le due pieghe ($b_{p,2}$)

calcolo tratto 2			
Larghezza appropriata	b_{p2}	13,52	mm
Tensione lembo superiore	σ1	263,62	N/mm²
Tensione lembo inferiore	σ2	231,34	N/mm²
Coeff. ψ = σ2 / σ1	ψ	0,88	
Buckling factor	k_σ	4,25	
	λ_p	0,14	
coef. di penalizzazione	ρ	1,00	
Larghezza efficace	b_{2eff}	13,52	mm
Larghezza compressa	bc	13,52	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{2,e1}$	6,56	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{2,e2}$	6,96	mm

- Piatto al di sotto dell'irrigidimento ($b_{p,3}$)

calcolo tratto 3			
Larghezza appropriata	b_{p3}	242,52	mm
Tensione lembo superiore	σ1	222,56	N/mm²
Tensione lembo inferiore	σ2	-350,31	N/mm²
Coeff. ψ = σ2 / σ1	ψ	-1,57	
Buckling factor	k_σ	39,62	
	λ_p	0,83	
coef. di penalizzazione	ρ	1,09	
Larghezza efficace	b_{3eff}	94,22	mm
Larghezza compressa	bc	94,22	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{3,e1}$	37,69	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{3,e2}$	56,53	mm

Come evidenziato dai valori ottenuti per i diversi parametri ρ che risultano pari a 1 non sono presenti fenomeni di instabilità locale.

5.2 Valutazione dell'instabilità distorsionale

Per ogni irrigidimento inserito si verifica la piena efficacia verificando l'assenza di instabilità distorsionale. La procedura è quella illustrata al paragrafo 5.5.3.3 della EN1993-1-3:2006. Si procede al calcolo della tensione critica di instabilità per un irrigidimento intermedio valutando la tensione critica

$\sigma_{cr,s} = (2\sqrt{(K\ E\ I_s)}) / A_s$

K è la rigidezza per unità di lunghezza dell'irrigidimento valutata come K = u/δ

dove δ è la deformazione dell'irrigidimento dovuta al carico unitario u agente su di esso, come illustrato nella Figura 5-6.

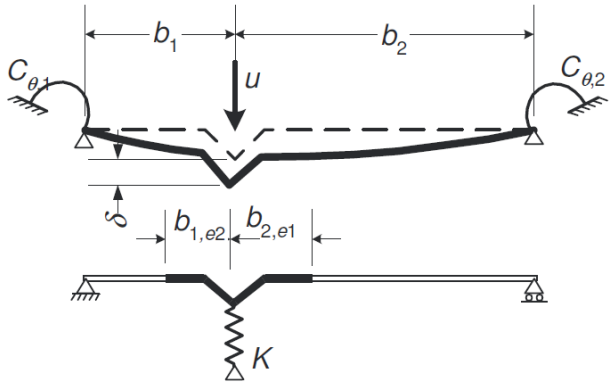


Figura 5-6 Deformazione in corrispondenza dell'irrigidimento

Per gli irrigidimenti intermedi la deformazione δ, è data da:

$$\delta = \frac{u b_1^2 b_2^2}{3(b_1 + b_2)} \cdot \frac{12(1 - \nu^2)}{E t^3}$$

dove b_1 e b_2 rappresentano le distanze tra il baricentro dell'irrigidimento ed il vincolo o l'eventuale ulteriore irrigidimento precedente e successivo.

Pertanto la rigidezza elastica K è data da:

$$K = \frac{u}{\delta} = \frac{3(b_1 + b_2)}{b_1^2 b_2^2} \cdot \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)}$$

- I_s è il momento di inerzia del secondo ordine efficace dell'area dell'irrigidimento, ovvero dell'area calcolata con le dimensioni efficaci, valutato rispetto all'asse baricentrico dell'irrigidimento e parallelo alla direzione dell'elemento sul quale è realizzata la piegatura.
- A_s è l'area efficace di competenza dell'irrigidimento. L'area efficace dell'irrigidimento è calcolata con le dimensioni efficaci b_{e1}, b_{e2} calcolate come visto al paragrafo precedente (confronta tabelle 4.1 e 4.2 della EN1993-1-5 in Figura 5-1 e Figura 5-2). Risulta

  $A_s = (b_{e2} + b_{e1} + L_{piega}) \cdot t$

Nel seguito viene riportata la procedura operativa adottata per i diversi componenti dei profili analizzati

5.2.1 *Piattabanda superiore – soluzione con due bugne*

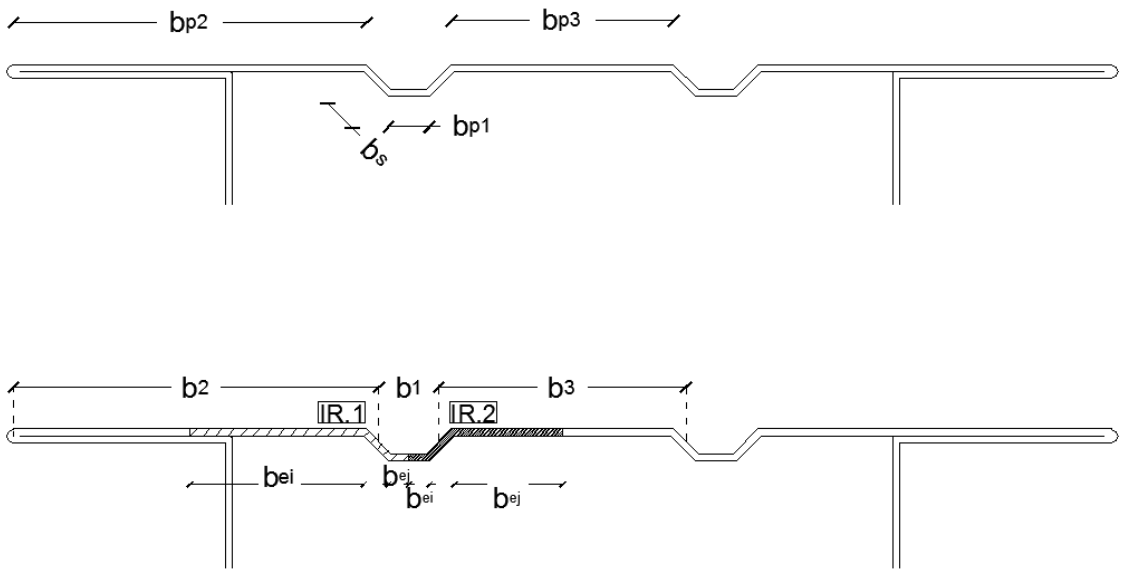


Figura 5-7 Dimensioni significative per la soluzione a due bugne

In riferimento alla Figura 5-7 si evidenziano:

- b_{pi} = larghezza appropriata del singolo tratto i-esimo, mediante la quale viene calcolata λ_p e si valuta dunque l'instabilità locale;
- b_s = lunghezza della piega;
- b_2, b_1, b_3 = Interasse tra gli irrigidimenti della flangia;
- b_{ei} = primo tratto dell'irrigidimento;
- b_{ej} = secondo tratto dell'irrigidimento.

Risulta

$A_{s(ir\ 1)} = (b_{ej} + b_{ei} + b_s) \cdot t$

Calcolata dunque la tensione critica σ_{cr} si procede al calcolo della snellezza relativa

$\lambda_d = \sqrt{(f_{yb} / \sigma_{cr})}$

dove f_{yb} è la tensione di snervamento di base che è pari ad f_{yk} (dalla tabella 3.1a di EN1993-1-3, vedi Figura 5-8) per gli acciai in questione.

Table 3.1a: Nominal values of basic yield strength f_{yb} and ultimate tensile strength f_u

Type of steel	Standard	Grade	f_{yb} N/mm^2	f_u N/mm^2
Hot rolled products of non-alloy structural steels. Part 2: Technical delivery conditions for non alloy structural steels	EN 10025: Part 2	S 235	235	360
		S 275	275	430
		S 355	355	510
Hot-rolled products of structural steels. Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels	EN 10025: Part 3	S 275 N	275	370
		S 355 N	355	470
		S 420 N	420	520
		S 460 N	460	550
		S 275 NL	275	370
		S 355 NL	355	470
		S 420 NL	420	520
		S 460 NL	460	550
Hot-rolled products of structural steels. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels	EN 10025: Part 4	S 275 M	275	360
		S 355 M	355	450
		S 420 M	420	500
		S 460 M	460	530
		S 275 ML	275	360
		S 355 ML	355	450
		S 420 ML	420	500
		S 460 ML	460	530

NOTE 1: For steel strip less than 3 mm thick conforming to EN 10025, if the width of the original strip is greater than or equal to 600 mm, the characteristic values may be given in the National Annex. Values equal to 0,9 times those given in Table 3.1a are recommended.

Figura 5-8 - Stralcio della tabella 3.1a di EN1993-1-3

Si può quindi individuare il fattore di riduzione per instabilità distorsionale χ_d

$$\chi_d = 1{,}0 \quad \text{if } \bar{\lambda}_d \le 0{,}65 \quad \text{... (5.12a)}$$

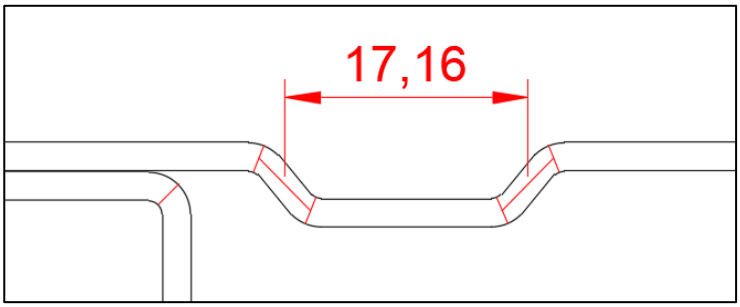
$$\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_d \quad \text{if } 0{,}65 < \bar{\lambda}_d < 1{,}38 \quad \text{... (5.12b)}$$

$$\chi_d = \frac{0{,}66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{if } \bar{\lambda}_d \ge 1{,}38 \quad \text{... (5.12c)}$$

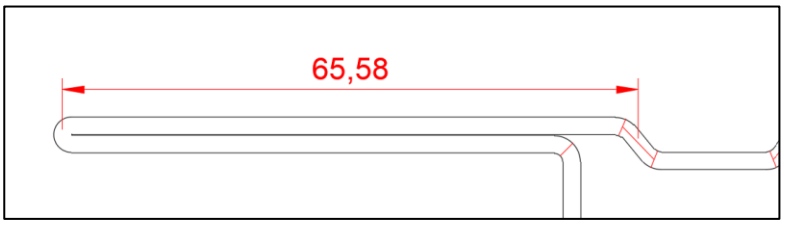
A titolo di esempio si riporta la verifica a instabilità distorsionale delle pieghe per il profilo ORP HP 200 sp.2 mm e acciaio classe S275 per il quale è stata già riportata la verifica a instabilità locale nei paragrafi precedenti.

Si definiscono inizialmente le lunghezze b_1, b_2 e b_3 riferite agli assi degli irrigidimenti, parametri utilizzati poi nel calcolo della rigidezza K.

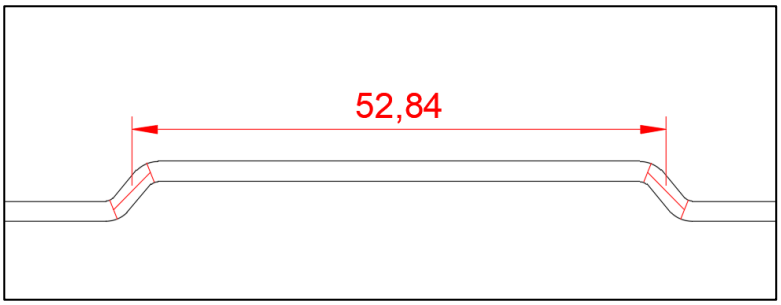
- $b_1 = b_{p,1} + b_h$



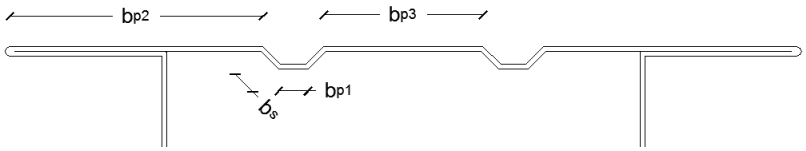
- $b_2 = b_{p,2} + t/2 + b_h/2$

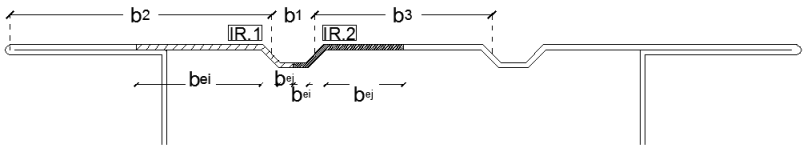


- $b_3 = b_{p,3} + b_h$



In particolare vengono verificate a instabilità distorsionale due pieghe, quella compresa tra i tratti b_1 e b_2 e quella compresa tra i tratti b_1 e b_3.





Preliminarmente sono state determinate le larghezze efficaci dei singoli tratti in riferimento alla Tabella 4.1 della EN1993-1-5:2006 riportata in Figura 5-1. Essendo la piattabanda soggetta a compressione uniforme si ha:

$$b_{i,eff} = \rho b_i$$

Così come le larghezze destre e sinistre necessarie alla definizione delle caratteristiche d'inerzia dell'irrigidimento:

$$b_{i,eff,1} = b_{i,eff,2} = 0{,}5 \cdot b_{i,eff}$$

Si procede quindi alla verifica:

a. Piega tratto $b_2 – b_1$

PIEGA 1								
VERIFICA INSATBILITA' DISTORSIONALE: Attraverso il coef di penalizzazione χ								
Irrigidimento efficace	B	H	y	A	A·y	ΔI_{loc}	ΔI_{pos}	
Tratto orizzontale sinistro	6,75	2	4,67696	13,5	63,1389	4,5	112,277	
Tratto orizzontale destro	31,4	2	1	62,8	62,8	20,9333	39,4986	
Tratto piegato	5,2	2	2,83848	10,4	29,5202	19,0221	11,3659	
			A_s =	86,7	155,459	44,4554	163,141	
				y_g =	1,79307	I_s =	207,597	mm4
STEP 2								
clause (6) + (7) + (8)								
Irrigidimento intermedio								
Area efficace della sezione	A_s	86,7	mm^2					
Momento d'inerzia efficace della sezione	I_s	207,597	mm^4					
Calcolo della rigidezza verticale dell'irrigidimento								
Luce piatto sx	b_1	17,177	mm					
Luce piattto dx	b_2	65,6385	mm			[1] Le rigidezze rotazionali $C_{\theta 1}$ e		
Deflessione (5.11) [1]	δ	0,03492	mm					
Rigidezza elastica irrigidimento	K	28,6365	N/mm					
Tensione critica di instabilità elastica	$\sigma_{cr,s}$	795,42	MPa					
Snellezza relativa	$\bar{\lambda}_l$	0,58799						
Reduction factor	χ_d	1		**IRRIGIDIMENTO EFFICACE**				

b. Piega tratto $b_1 – b_3$

PIEGA 2								
VERIFICA INSATBILITA' DISTORSIONALE: Attraverso il coef di penalizzazione χ								
Irrigidimento efficace	B	H	y	A	A·y	ΔI_{loc}	ΔI_{pos}	
Tratto orizzontale sinistro	6,75	2	4,67696	13,5	63,1389	4,5	100,596	
Tratto orizzontale destro	24,3461	2	1	48,6922	48,6922	16,2307	43,6857	
Tratto piegato	5,2	2	2,83848	10,4	29,5202	23,4347	8,26157	
			A_s =	72,5922	141,351	44,1654	152,544	
				y_g =	1,9472	I_s =	196,709	mm4

STEP 2						
clause (6) + (7) + (8)						
Irrigidimento intermedio						
Area efficace della sezione	A_s	72,5922	mm^2			
Momento d'inerzia efficace della sezione	I_s	196,709	mm^4			
Calcolo della rigidezza verticale dell'irrigidimento						
Luce piatto sx	b_1	17,177	mm			
Luce piattto dx	b_2	52,3691	mm			
Deflessione (5.11) [1]	δ	0,02647	mm			
Rigidezza elastica irrigidimento	K	37,7788	N/mm			
Tensione critica di instabilità elastica	$\sigma_{cr,s}$	1062,16	MPa			
Snellezza relativa	$\bar{\lambda}_d$	0,50883				
Reduction factor	χ_d	1		**IRRIGIDIMENTO EFFICACE**		

[1] Le rigidezze rotazionali $C_{\theta 1}$ e

Le due pieghe nel caso in esame risultano quindi efficaci presentando un coefficiente χ_d unitario.

5.2.2 *Piattabanda superiore – soluzione con tre bugne*

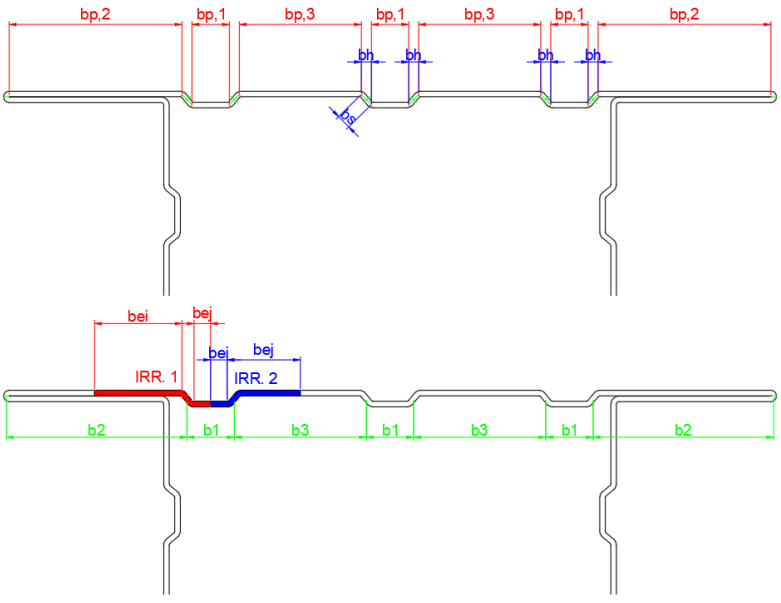


Figura 5-9 Dimensioni significative per la soluzione a tre bugne

La soluzione a tre bugne prevede la verifica a instabilità distorsionale analoga al caso precedente in quanto gli interassi tra gli irrigidimenti sono definiti allo stesso modo.

Viene pertanto verificata l'efficacia degli irrigidimenti per:

a. Piega tratto $b_2 – b_1$
b. Piega tratto $b_1 – b_3$

5.2.3 Anima

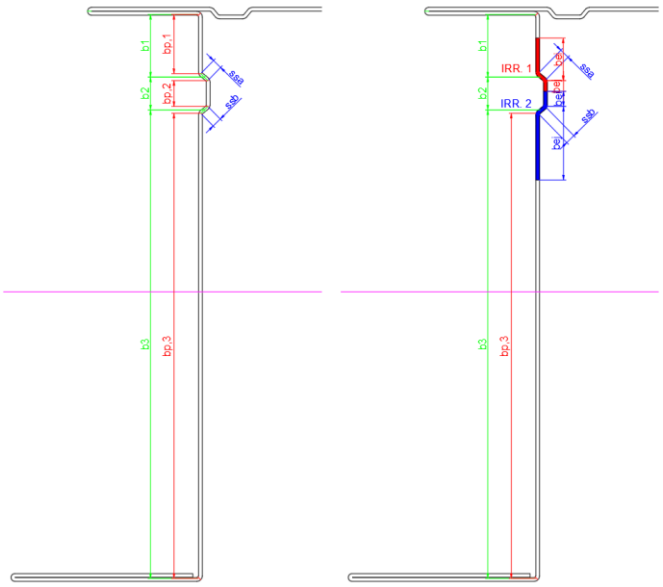


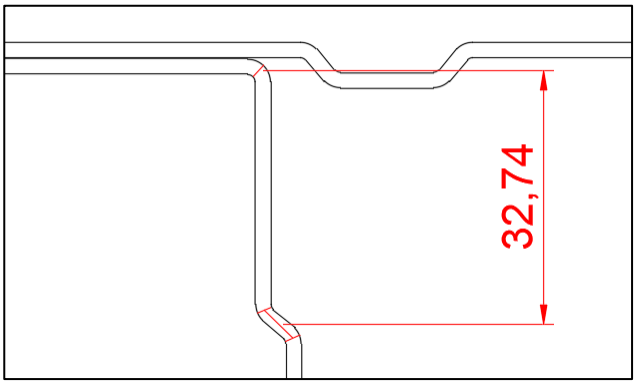
Figura 5-10 Dimensioni significative per la soluzione dell'anima

La verifica dell'instabilità distorsionale degli irrigidimenti dell'anima viene fatta in modo del tutto analogo a quanto previsto per la piattabanda, tenendo però in considerazione la diversa determinazione dei tratti efficaci, dato il gradiente di tensione sull'altezza.

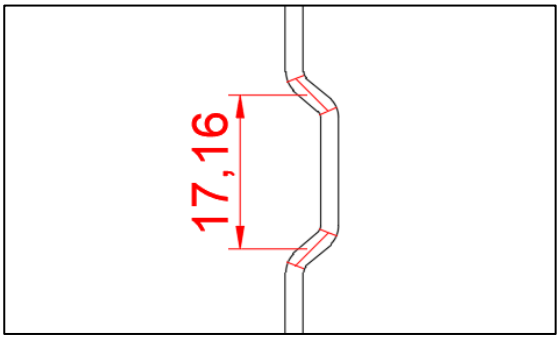
Si riporta a titolo di esempio la verifica effettuata sugli irrigidimenti per il profilo ORP HP 300 spessore 2 mm acciaio S355.

Inizialmente si determinano le lunghezze b_1, b_2 e b_3 riferite agli assi degli irrigidimenti, parametri utilizzati poi nel calcolo della rigidezza K.

- $b_1 = b_{p,1} + p_{vsa}/2$



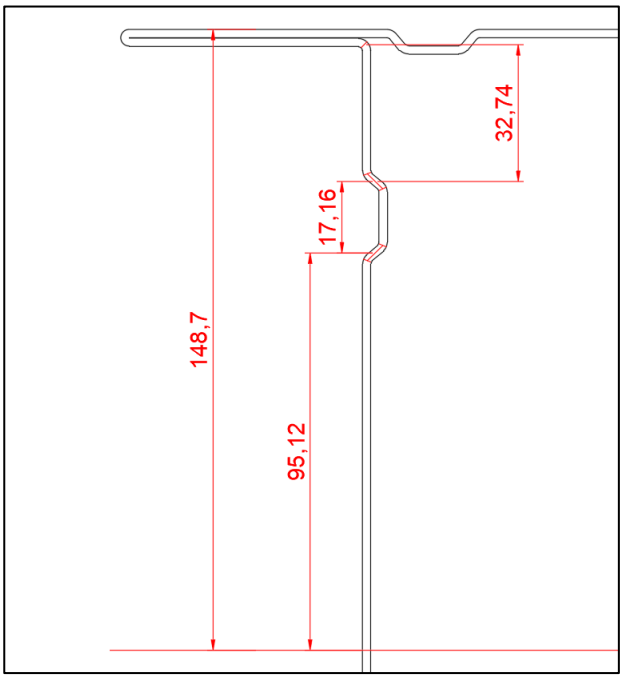
- $b_2 = b_{p,2} + p_{vsa}/2 + p_{vsb}/2$



- Per il terzo tratto avendo solo una parte del piatto compressa viene considerata solo quest'ultima, in quanto la porzione tesa non è soggetta a effetti di instabilità.

  $b_{3,c} = b_{p,3}/ (1 - \psi)$

  $b_3 = b_{3,c} + p_{vsb}/2$



In particolare vengono verificate a instabilità distorsionale due pieghe, quella compresa tra i tratti b_1 e b_2 e quella compresa tra i tratti b_1 e b_3.

a. Piega tratto $b_2 – b_1$

Preliminarmente sono state determinate le larghezze efficaci dei singoli tratti in riferimento alla Tabella 4.1 della EN1993-1-5:2006 riportata in Figura 5-1.

Le larghezze efficaci in questo caso essendo ψ>0 sia per il primo che per il secondo tratto, sono determinate come:

$$b_{i,eff} = \rho \cdot b_{p,i}$$

Le larghezze efficaci superiori e inferiori invece:

$$b_{i,e1} = \frac{2}{5 - \psi}$$

$$b_{i,e2} = b_{i,eff} - b_{i,e1}$$

Tratto 1

Larghezza efficace	b_{1eff}	30,60	mm
Larghezza compressa	bc	30,60	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{1,e1}$	14,53	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{1,e2}$	16,07	mm

Tratto 2

Larghezza efficace	b_{2eff}	13,52	mm
Larghezza compressa	bc	13,52	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{2,e1}$	6,56	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{2,e2}$	6,96	mm

Si esegue quindi la verifica.

RINFORZO 1

CALCOLO RISPETTO ALL'ASSE PARALLELO ALL'ANIMA

Irrigidimento efficace	s	H	x	A	A·x	ΔI_{loc}	ΔI_{pos}	
Tratto superiore	16,07	2	1	32,13653	32,13653	10,71218	85,695712	
Tratto inferiore	6,56	2	5,68	13,12132	74,48913	4,373772	121,57954	
Tratto piegato	5,20	2	3,838478	10,4	39,92017	19,02212	15,113609	
			TOTALI	55,65784	146,5458	34,10806	222,38887	
				x_g =	2,632977	I_s =	**256,49693**	mm4

b1	b2	K	Airrig	σ_{cr}	λd	χd
32,44	17,20	70,09051	55,65784	2154,712	0,4059	1

b. Piega tratto $b_2 – b_3$

Preliminarmente sono state determinate le larghezze efficaci dei singoli tratti in riferimento alla Tabella 4.1 della EN1993-1-5:2006 riportata in Figura 5-1.

Le larghezze efficaci per il secondo tratto vengono determinate in analogia al caso precedente, mentre per il terzo tratto essendo ψ<0 sono funzione della sola porzione compressa (b_c).

$$b_{eff} = \rho \cdot b_c$$

Le larghezze efficaci superiori e inferiori invece:

$$b_{e1} = 0{,}4 \cdot b_{eff}$$

$$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$$

Tratto 2

Larghezza efficace	b_{2eff}	13,52	mm
Larghezza compressa	bc	13,52	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{2,e1}$	6,56	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{2,e2}$	6,96	mm

Tratto 3

Larghezza efficace	b_{3eff}	94,22	mm
Larghezza compressa	bc	94,22	mm
Larghezza efficace superiore	$b_{3,e1}$	37,69	mm
Larghezza efficace inferiore	$b_{3,e2}$	56,53	mm

Si esegue quindi la verifica.

RINFORZO 2								
CALCOLO RISPETTO ALL'ASSE PARALLELO ALL'ANIMA								
Irrigidimento efficace	s	H	x	A	A·x	ΔI_{loc}	ΔI_{pos}	
Tratto superiore	6,96	2	5,68	13,92477	79,05031	4,641591	129,0242	
Tratto inferiore	37,69	2	1,00	75,37586	75,37586	25,12529	200,99832	
Tratto piegato	5,20	2	3,838478	10,4	39,92017	19,02212	15,113609	
			TOTALI	99,70063	194,3463	48,78899	345,13613	
				x_g =	1,949299	**I_s =**	**393,92512**	mm4
	b1	b2	K	Airrig	σ_{cr}	λd	**χd**	
	17,20	96,06	18,23736	99,70063	760,3874	0,619689	**1**	

Le due pieghe nel caso in esame risultano quindi efficaci presentando un coefficiente χ_d unitario.

6 CLASSIFICAZIONE DEI NUOVI PROFILI ORP HP

In riferimento alle norme riportate al Capitolo 4 e alle procedure operative descritte al Capitolo 5 è stata effettuata la classificazione dei nuovi profili ORP HP, per i quali si riporta una tabella riepilogativa nel seguito, distinguendo ciascun profilo tipo in funzione di spessore e classe di acciaio e riportando questo si trova almeno in classe 3 oppure occorre classificarlo in classe 4.

SPESSORE 2 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	76,91	71,09	62,57	SI	SI	SI
ORP HP 150	200	80	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO
ORP HP 180	200	80	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO
ORP HP 200	220	100	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO
ORP HP 220	220	100	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO
ORP HP 250	220	100	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO
ORP HP 280	280	160	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO
ORP HP 300	280	160	60	76,91	71,09	62,57	SI	SI	NO

SPESSORE 2,5 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 150	200	80	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 180	200	80	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 200	220	100	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 220	220	100	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 250	220	100	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 280	280	160	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI
ORP HP 300	280	160	60	96,13	88,87	78,22	SI	SI	SI

SPESSORE 3 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 150	200	80	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 180	200	80	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 200	220	100	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 220	220	100	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 250	220	100	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 280	280	160	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI
ORP HP 300	280	160	60	115,36	106,64	93,86	SI	SI	SI

SPESSORE 3,5 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI
ORP HP 150	200	80	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI

ORP HP 180	200	80	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI
ORP HP 200	220	100	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI
ORP HP 220	220	100	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI
ORP HP 250	220	100	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI
ORP HP 280	280	160	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI
ORP HP 300	280	160	60	134,59	124,41	109,50	SI	SI	SI

SPESSORE 4 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 150	200	80	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 180	200	80	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 200	220	100	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 220	220	100	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 250	220	100	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 280	280	160	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI
ORP HP 300	280	160	60	153,81	142,19	125,15	SI	SI	SI

SPESSORE 5 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 150	200	80	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 180	200	80	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 200	220	100	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 220	220	100	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 250	220	100	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 280	280	160	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI
ORP HP 300	280	160	60	192,27	177,74	156,43	SI	SI	SI

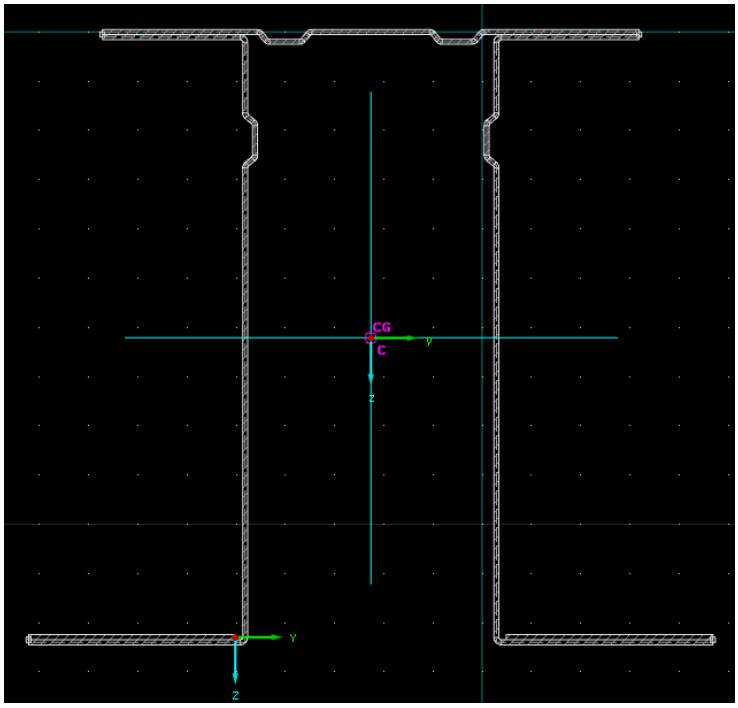
SPESSORE 1,5 mm									
Profilo	Larghezza piatt. sup.	Distanza netta anime	Larghezza sbalzo	$b_{p,lim}$			STATO PROPOSTO VERIFICA		
				S235	S275	S355	S235	S275	S355
	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
ORP HP 120	160	60	50	57,68	53,32	46,93	SI	SI	NO
ORP HP 150	200	80	60	57,68	53,32	46,93	NO	NO	NO
ORP HP 180	200	80	60	57,68	53,32	46,93	NO	NO	NO

Come evidenziato dalla tabella del totale di 153 profili esaminati (51 per ciascuna classe di acciaio), solo 14 continuano a rimanere in classe 4 e riguardano specialmente i profili della classe di acciaio S355 e gli spessori più limitati (1,5 e 2 mm).

6.1 Validazione con codice di calcolo

A titolo di ulteriore verifica della validità della procedura di calcolo adottata si riporta nel seguito un esempio di utilizzo del software di calcolo Dlubal per la classificazione delle sezioni, in particolare del suo applicativo “Shape-Thin”.

Esempio n°1 – Profilo ORP HP 250 sp. 2 mm acciaio classe 235 – Classe 3



Flangia a sbalzo

15	17	Entrambi i lati	1.0	0.0	61.8	2.0	Sforzo normale	$\sigma_{x,inizio}$	-243.3	N/mm²	
							Sforzo normale	$\sigma_{x,fine}$	-243.3	N/mm²	
							Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_1	235.0	N/mm²	
							Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_2	235.0	N/mm²	
							Rapporto tensionale	ψ	1.000		
							Coefficiente del materiale dipendente	ε	1.000		
							Coefficiente della zona compressa	α	1.000		alpha = 1 per maggior sicurezza
							Rapporto c/t	c/t	30.919		
							Proporzioni limite	λ_1	33.000		
								λ_2	38.000	-	
								λ_3	42.000	-	

Risultando $c/t < \lambda_1$ la porzione di flangia risulta in classe 1.

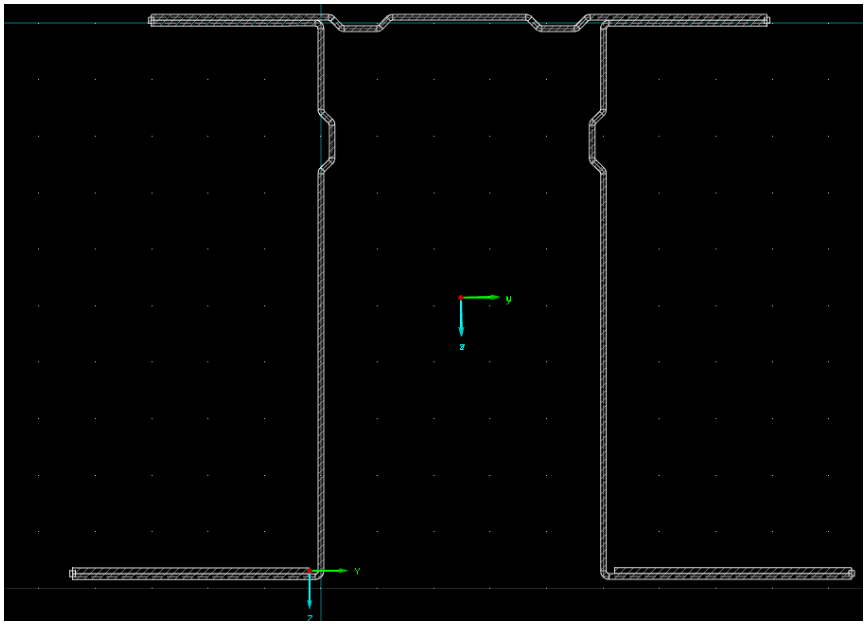
Anima al di sotto dell'irrigidimento

3	4	Entrambi i lati	0.0	0.0	190.8	2.0	Sforzo normale	$\sigma_{x,inizio}$	236.0	N/mm²	
							Sforzo normale	$\sigma_{x,fine}$	-134.3	N/mm²	
							Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_1	235.0	N/mm²	
							Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_2	-413.2	N/mm²	
							Rapporto tensionale	ψ	-1.758		
							Coefficiente del materiale dipendente	ε	1.000		
							Coefficiente della zona compressa	α	1.000		alpha = 1 per maggior sicurezza
							Rapporto c/t	c/t	95.418		
							Proporzioni limite	λ_1	33.000		
								λ_2	38.000	-	
								λ_3	226.753	-	
									3		

Risultando $c/t < \lambda_3$ la porzione di anima risulta in classe 3.

La sezione risulta complessivamente quindi in classe 3, così come confermato anche dalla procedura utilizzando i fogli di calcolo.

Esempio n°2 – Profilo ORP HP 200 sp. 2 mm acciaio classe 275 – Classe 3



Flangia a sbalzo

17	Entrambi i lati	1.0	0.0	61.8	2.0	Sforzo normale	$\sigma_{x,inizio}$	-327.4	N/mm²	
						Sforzo normale	$\sigma_{x,fine}$	-322.5	N/mm²	
						Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_1	275.0	N/mm²	
						Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_2	270.9	N/mm²	
						Rapporto tensionale	ψ	0.985		
						Coefficiente del materiale dipendente	ε	0.924		
						Coefficiente della zona compressa	α	1.000		alpha = 1 per maggior sicurezza
						Rapporto c/t	c/t	30.888		
						Proporzioni limite	λ_1	30.506		
							λ_2	35.128	-	
							λ_3	39.016	-	
								2		

Risultando c/t < λ_2 la porzione di flangia risulta in classe 2.

Anima al di sotto dell'irrigidimento

4	Entrambi i lati	0.0	0.0	140.6	2.0	Sforzo normale	$\sigma_{x,inizio}$	303.9	N/mm²	
						Sforzo normale	$\sigma_{x,fine}$	-143.7	N/mm²	
						Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_1	275.0	N/mm²	
						Tensione di bordo relativa a $f_{y,d}$	σ_2	-581.6	N/mm²	
						Rapporto tensionale	ψ	-2.115		
						Coefficiente del materiale dipendente	ε	0.924		
						Coefficiente della zona compressa	α	1.000		alpha = 1 per maggior sicurezza
						Rapporto c/t	c/t	70.308		
						Proporzioni limite	λ_1	30.506		
							λ_2	35.128	-	
							λ_3	259.619	-	
								3		

Risultando c/t < λ_3 la porzione di anima risulta in classe 3.

La sezione risulta complessivamente quindi in classe 3, così come confermato anche dalla procedura utilizzando i fogli di calcolo.

7 CONCLUSIONI

In seguito alla nuova classificazione dei profili ORP HP successivamente le nuove configurazioni trasversali previste è stato possibile ottenere profili in classe 3 ai sensi delle NTC 2018 e EC3.

Soltanto 14 dei 153 profili totali analizzati nonostante le modifiche apportate risultano presentare problemi di instabilità locale, in particolare:

- Nei profili con spessore 1,5 mm, la non verifica dipende dalla configurazione geometrica in quanto lo sbalzo e quindi il tratto $b_{p,2}$ ha una lunghezza maggiore rispetto a quanto è la larghezza appropriata massima associata a questo spessore.
- Nei profili con spessore 2 mm e classe di acciaio S355 la non verifica dipende dal fatto che la larghezza $b_{p,2}$ risulta di poco superiore a quella limite. Per questi 7 profili potrebbe essere possibile classificarli in classe 3 andando a modificare leggermente la configurazione degli irrigidimenti, allungando la piega e avvicinandola all'esterno.

I responsabili scientifici

Prof. Massimiliano Gioffrè _____

Prof. Marco Mezzi _____