GRISPE PLUS
VALORISATION OF KNOWLEDGE FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

WP N°: 3
WP Title: eLectures
Deliverable N°: D3.1
Deliverable Title: Impalcati metallici con nervature esterne
Deliverable Date: 31st of March 2018

The GRISPE PLUS project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement N° 754092"

Author(s)
Sokol Palisson Consultants, Anna Palisson

Drafting history
DRAFT N° 1 –DATA:
DRAFT N° 2- DATA:
FINAL- DATE: 31st of March

Dissemination Level		
PU	*Public-Open*	
PP	*Restricted to the Commission Services, the Coal and Steel Technical Groups and the European Committee for Standardisation (CEN)*	
RE	*Restricted to a group specified by the Beneficiaries*	
CO	*Confidential, only for Beneficiaries (including the Commission services)*	

D3.1 IMPALCATI METALLICI CON NERVATURE ESTERNE

Finanziato dal RFCS– Grant agreement N° 754092

Disclaimer notice and EU acknowledgement of support

Disclaimer notice

By making use of any information or content in this manual you agree to the following:

No warranties

All the information or content provided in this manual is provided "as is" and with no warranties. No express or implies warranties of any type, including for example implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, are made with respect to the information or content, or any use of the information or content in this manual.

The authors make no representations or extend no warranties of any type as to the completeness, accuracy, reliability, suitability or timeliness of any information or content in this manual.

Disclaimer of liability

This manual is for informational purposes only. It is your responsibility to independently determine whether to perform, use or adopt any of the information or content in this manual.

The authors specifically disclaim liability for incidental or consequential damages and assume no responsibility or liability for any loss or damage suffered by any person as a result of the use or misuse of any of the information or content in this manual.

The authors will not be liable to you for any loss or damage including without limitation direct, indirect, special or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from loss of data or loss of business, production, revenue, income, profits, commercial opportunities, reputation or goodwill, arising out of, or in connection with, the use of the information or content in this manual.

The authors do not represent, warrant, undertake or guarantee that the use of the information or content in this manual will lead to any particular outcome or results.

Reasonableness

By using this manual, you agree that the exclusions and limitations of liability set out in this disclaimer are reasonable. If you do not think they are reasonable, you must not use this manual.

Severability

If any part of this disclaimer is declared unenforceable or invalid, the remainder will continue to be valid and enforceable.

"The information and views set out in this manual are those of the authors and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information or views contained therein"

EU acknowledgement of support

The GRISPE project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS)under grant agreement No. **754092**

PARTE 1: MANUALI DI PROGETTAZIONE PER IMPALCATI IN ACCIAIO CON NERVATURE ESTERNE

SOMMARIO

Lo scopo di questo manuale di progettazione è presentare un nuovo metodo di progettazione per gli impalcati in acciaio con nervature esterne, come sviluppato all'interno del progetto Europeo GRISPE PLUS.

Il manuale si basa in generale sui principi contenuti nell'Eurocodice e, in particolare, negli Eurocodici EN 1993-1-3 e EN 1993-1-5.

Questo nuovo metodo di progettazione per impalcati in acciaio con rilievi è basato sugli esperimenti condotti all'interno del progetto europeo GRISPE (2013- 2016).

Il quadro generale di questo metodo è descritto nell'allegato 1.

Il capitolo 1 descrive il tipo di profili interessati, lo stato dell'arte, i principali risultati di ricerca del progetto GRISPE e i requisiti e le regole generali di progettazione;

Il capitolo 2 delinea le considerazioni che devono essere messe in conto durante le fasi preliminari, compresa, in particolare, la verifica del campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione;

Il capitolo 3 stabilisce i requisiti tecnologici che devono essere rispettati, inclusi il telaio di supporto, le caratteristiche dei profili e gli assemblaggi;

Il capitolo 4 elenca le proprietà dei materiali dei profili;

Il capitolo 5 specifica la determinazione di azioni e combinazioni;

Il capitolo 6 fornisce le basi della progettazione;

Il capitolo 7 elenca le considerazioni specifiche di progetto non coperte dal manuale;

Il capitolo 8 spiega, nel dettaglio, il nuovo metodo di progettazione (principi, campo di applicazione, e descrive come applicare le nuove formule).

Prefazione

Questo manuale di progettazione è stato realizzato con il supporto del finanziamento n° 754092 del fondo europeo RFCS.

Questo nuovo metodo di progettazione è stato presentato al gruppo di lavoro del EN 1993-1-3 nel 2016-2017 ed è stato preso in considerazione per essere incluso negli Eurocodici.

Questo manuale di progettazione è stato scritto da PALISSON Anna ed è stato discusso in un gruppo di lavoro GRISPE PLUS composto dai seguenti membri:

Mickael BLANC	France
Silvia CAPRILI	Italy
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Germany
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italy
Dominik PYSCHNY	Germany
Thibaut RENAUX	France
Walter SALVATORE	Italy
Daniel SPAGNI	France

I soci corrispondenti hanno incluso:

SOKOL	Léopold	France

Figure

Le figure sono state fornite dalle seguenti fonti:

Figura 1.1.1 – TATA STEEL CONSTRUCTION

Figura 1.3.1 - Sokol Palisson Consultants

Figura 1.3.2 - Sokol Palisson Consultants

Figura 6.2.1 - Sokol Palisson Consultants

Figura 6.3.2.1 – Riproduzione del EN 1993-1-3

Figura 8.1.1 - Sokol Palisson Consultants

Figura 8.1.2 - Sokol Palisson Consultants

Figura 8.1.3 - Riproduzione del EN 1993-1-3

Figura 8.2.1 - Sokol Palisson Consultants

Figura 8.2.2 – Riproduzione del EN 1993-1-3

Figura 8.2.3 – Riproduzione del EN 1993-1-3

INDICE

Scopo della pubblicazione

Notazioni

1. INTRODUZIONE

1.1. Tipologie di lamiere profilate studiate

1.2. Stato dell'arte

1.3. Principali risultati del GRISPE

1.4. Requisiti e regole generali di progettazione

2. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI: FASE PRE PROGETTUALE

2.1. Campo di applicazione del nuovo metodo di progetto

2.2. Disposizioni tecnologiche per la lamiera sagomata

3. REQUISITI TECNOLOGICI DI BASE

4. PROPRIETA' DEL MATERIALE

5. SOLLECITAZIONI E COMBINAZIONI

6. BASI DELLA PROGETTAZIONE

6.1. Principi

6.2. Campi di applicazione del nuovo metodo di progettazione

6.3. Procedura di progettazione

7. SPECIFICHE CONSIDERAZIONI SULLA PROGETTAZIONE

8. ESEMPIO DI PROGETTAZIONE

8.1. Spiegazione del software di calcolo "nervature esterne"

8.2. Controllo automatico del software - dettagli riguardanti le fasi di calcolo

ALLEGATO 1

SCOPO DELLA PUBBLICAZIONE

Lo scopo di questa pubblicazione è presentare il nuovo metodo di progetto per impalcati in acciaio con nervature esterne, proposto essere incluso nell'Eurocodice EN 1993-1-3.

Questo manuale di progettazione tratta situazioni che si verificano attualmente.

Per questioni specifiche (ad es. aperture) o per situazioni eccezionali (sisma, incendio, ecc.) è necessario seguire le clausole pertinenti degli Eurocodici e/ o EN 1090-4.

NOTAZIONI

I simboli seguenti sono usati all'interno del manuale:

t	spessore di progettazione
t_{nom}	spessore nominale
t_{eff}	spessore efficace
h_w	altezza del profilo
f_{yb}	tensione di snervamento
E	modulo di Young
t_{red}	spessore ridotto
b_{pi}	larghezze delle parti di sezione trasversale piana
$b_{i,eff}$	larghezza efficace
A_g	area della sezione trasversale lorda
A_{eff}	area efficace
z_G	posizione dell'asse neutro
σ_{xx}	sforzo
χ_d	fattore di riduzione per la resistenza alla instabilità torsionale
$M_{c,Rd}$	momento resistente
M_{span}	momento resistente in campata
e_c	distanza tra la flangia compressa e la posizione dell'asse neutro
s_n	larghezza della parte di anima tra la flangia compressa e la posizione dell'asse neutro
s_{eff}	sezione efficace trasversale dell'anima
W_{eff}	modulo di sezione efficace

1. INTRODUZIONE

1.1. Tipologie di lamiere profilate in acciaio

Il presente manuale di progettazione tratta le lamiere in acciaio con nervature esterne.

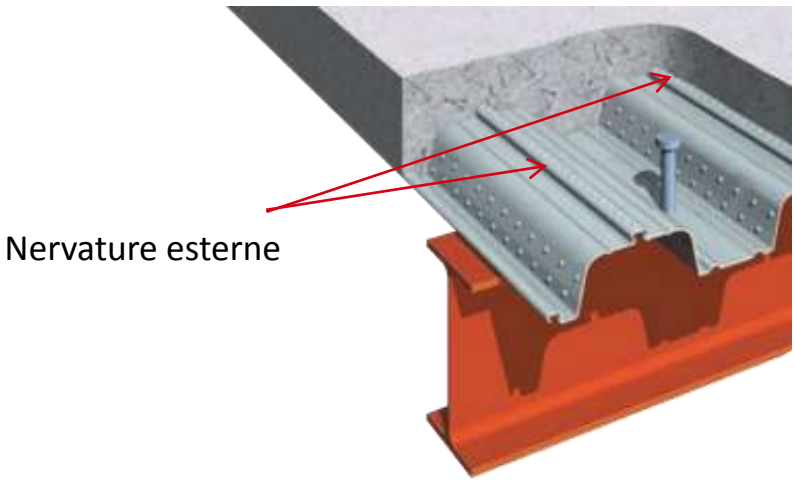


Figura 1.1.1 *– Lamiera in acciaio con nervature esterne*

1.2. Stato dell'arte pre-GRISPE

L'impalcato in acciaio è diventato un elemento strutturale integrale nelle solette composite sia per le coperture che per i piani intermedi, con una varietà di corrugazioni di diversa profondità. L'acciaio è spesso il materiale preferito per l'interior design, le ristrutturazioni commerciali ed industriali e per il settore edilizio in generale, perché è resistente, leggero e ha bisogno di poca manutenzione. Ai fini di incrementare la connessione a taglio tra l'acciaio e il calcestruzzo nelle solette composite, gli impalcati in acciaio sono dotati di nervature esterne nelle flange superiori. Questo tipo di lamiere è stato ottimizzato negli anni ed è comparso sui mercati in molte forme diverse.
Per la fase di costruzione, in cui la lamiera usata come casseforme deve sorreggere il peso del calcestruzzo fresco e i carichi da costruzione, non esistono studi che permettono di calcolare il momento resistente delle lamiere in acciaio con nervature esterne.
Nel EN 1994-1 per la progettazione del profilo dell'impalcato in un solaio composito, è indicato un collegamento all'EN 1993-1-3.
L'EN 1993-1-3 tratta in 1.5.1 (4) delle lamiere ma nella sezione 1.5.2 «Tipologie di nervature» i profili con nervature esterne non sono presi in considerazione.
In sintesi, negli attuali testi degli Eurocodici, la sola opzione per i produttori per progettare questa famiglia di prodotti è condurre delle prove costose e che richiedono tempo.

1.3. Principali risultati di GRISPE

Ai fini di determinare il momento resistente degli impalcati in acciaio con nervature esterne, è stato condotto un programma di prove su campata unica, in accordo con l'EN 1993-1-3 Allegato A, su una lamiera in acciaio trapezoidale con nervature esterne (Figure 1.3.1; Figure 1.3.2).
Basandosi sui risultati di tali prove e sulle analisi, è stato sviluppato un innovativo modello di progettazione, valido per determinare il momento resistente in campata di un profilo con nervature esterne.

Figura 1.3.1 *– Prove su campata unica*

Figura 1.3.2 *– Modalità di rottura*

1.4. Requisiti e regole generali di progettazione

(1) Il progetto delle lamiere in acciaio con nervature esterne deve essere condotto in accordo con le regole generali date nell' EN 1993-1-1.

(2) Devono essere adottati fattori parziali opportuni per gli stati limite ultimi e gli stati limite di servizio in accordo all' EN 1993-1-3.

2. CONSIDERAZIONI IN FASE PRE-PROGETTUALE

2.1. Campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione

Questo manuale fornisce i requisiti di progettazione per le lamiere in acciaio con nervature esterne. L'esecuzione di strutture metalliche realizzate con lamiere è normata nell' EN 1090.

Il manuale fornisce i metodi di progettazione mediante calcolo. Tale metodo può essere utilizzato per casi ricadenti in specificati intervalli di proprietà dei materiali e proporzioni geometriche.

Questo manuale non copre la distribuzione di carico per i carichi durante le fasi di esecuzione e manutenzione.

Le regole di calcolo date in questo manuale sono valide solo se le tolleranze degli elementi formati a freddo sono conformi all' EN 1993-1-3.

2.2. Disposizioni tecnologiche per le lamiere sagomate

2.2.1. Forma della sezione

(1) Le lamiere sagomate hanno, all'interno dell'intervallo di tolleranze ammesse, uno spessore nominale costante su tutta la lunghezza e possono avere una sezione trasversale uniforme oppure rastremata lungo la lunghezza.

(2) Le sezioni trasversali delle lamiere sagomate comprendono essenzialmente un certo numero di elementi piani uniti da elementi curvi.

(3) Le sezioni trasversali delle lamiere possono non essere irrigidite o incorporare nervature longitudinali nelle loro anime.

2.2.2. Dimensioni della sezione trasversale

Le dimensioni della sezione trasversale devono soddisfare i requisiti generali dati nell' EN 1993-1-3, sezione 1.5.3.

(1) Lo spessore t è uno spessore di progetto in acciaio (lo spessore del nucleo in acciaio estratto meno la tolleranza, se necessario, come specificato al punto 3.2.4 del EN 1993-1-3), se non diversamente specificato.

(2) Le disposizioni per la progettazione riportate in questo manuale non dovrebbero essere applicate a sezioni trasversali che non rientrino nell'intervallo di rapporto tra larghezza e spessore b/ t, h/ t, c/ t e d/ t indicati nella tabella (Tabella 5.1 di EN 1993-1-3).

(3)

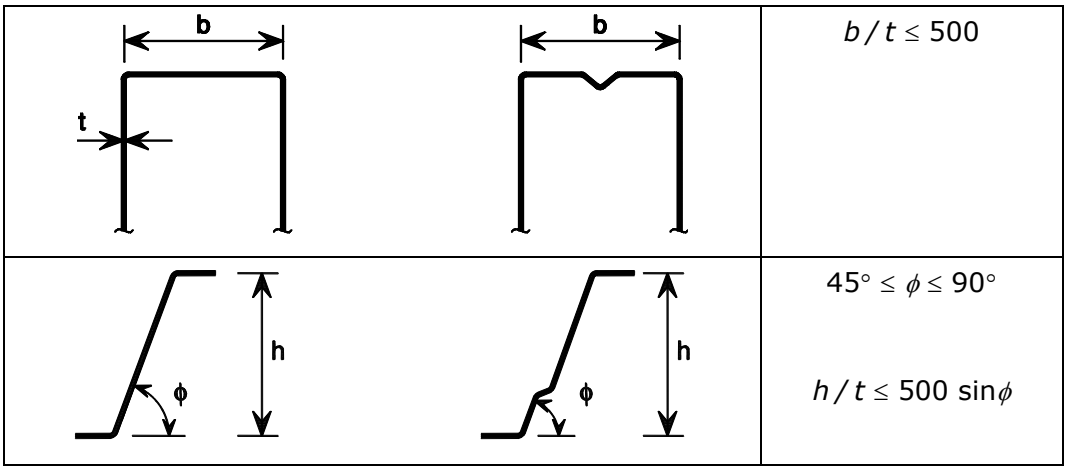


Tabella 2.2.2.1 *– Controllo delle proporzioni geometriche*

3. REQUISITI TECNOLOGICI DI BASE

Lamiera sagomata e marcatura CE

Gli impalcati metallici sono marcati CE secondo la norma EN 1090-1.

4. PROPRIETA' DEL MATERIALE

Lamiera in acciaio

Le proprietà del materiale devono soddisfare i requisiti dati nell' EN 1993-1-3, sezione 3.

I tipi di acciaio comunemente usati sono i gradi S320GD + ZA e S350GD + ZA.

Le tolleranze di spessore devono soddisfare i requisiti dati nell' EN 1993-1-3, sezione 3.2.4.

5. SOLLECITAZIONI E COMBINAZIONI

Le azioni e le combinazioni che devono essere prese in considerazione devono essere determinate in accordo all' EN 1991-1-6 Eurocodice 1: Azioni sulle strutture, Part 1-6: Azioni generali – Azioni durante l'esecuzione, 2005.

6. BASI DELLA PROGETTAZIONE

6.1. Principi

Questo nuovo metodo di progettazione è dato per calcolare la resistenza delle lamiere con le nervature esterne nei confronti del momento flettente.

6.2. Campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione

Questo nuovo metodo di progettazione è applicabile a lamiere con nervature esterne (Figura (6.2.1).

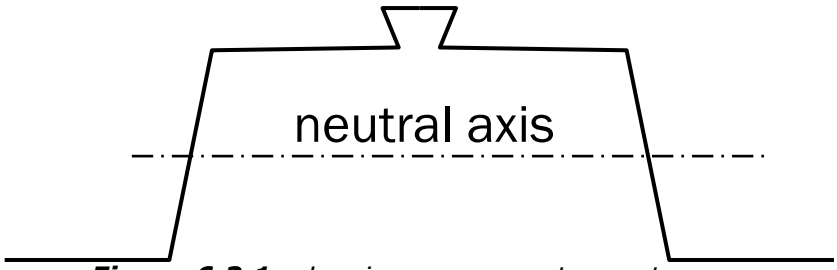


Figura 6.2.1 *– Lamiera con nervature esterne*

6.3. Procedura di progettazione

6.3.1. Sezione efficace della lamiera con nervature esterne

(1) La larghezza efficace della parete piena deve essere calcolata in accordo a 5.5.1(2) del EN 1993-1-3.
(2) Per le nervature intermedie rivolti verso l'esterno della flangia superiore, i calcoli devono essere condotti considerando lo sforzo nella nervatura pari a quello nella flangia.

6.3.2. Momento resistente della lamiera con nervature esterne

Il momento resistente di progetto di una sezione trasversale a flessione rispetto ad un asse principale $M_{c,Rd}$ è determinato in accordo a EN 1993-1-3 "6.1.4 Momento flettente", come segue (vedi figura 6.3.2.1):

$$M_{c,Rd} = W_{eff}\, f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Il modulo di sezione efficace W_{eff} deve essere basato sulla sezione trasversale efficace, soggetta solo al momento flettente intorno al relativo asse principale, con uno sforzo massimo $\sigma_{max,Ed}$ pari a f_{yb} / γ_{M0} , tenendo conto degli effetti locali e dell'instabilità (distortional buckling), come specificato nella Sezione 5.5. e in 7.1.

7. CONSIDERAZIONI SPECIFICHE SULLA PROGETTAZIONE

Le seguenti questioni non sono trattate nel presente manuale:

- Progettazione antincendio
- Progettazione sismica
- Aspetti ambientali
- Aspetti termici
- Aspetti acustici
- Tutti gli altri temi non chiaramente identificati più in alto o più in basso

8. ESEMPIO DI PROGETTAZIONE

8.1. Spiegazione del software di calcolo "nervatura esterna"

Questo software consente di calcolare il momento resistente in campata per un profilo con nervature esterne nella flangia superiore e due nervature nella flangia inferiore.

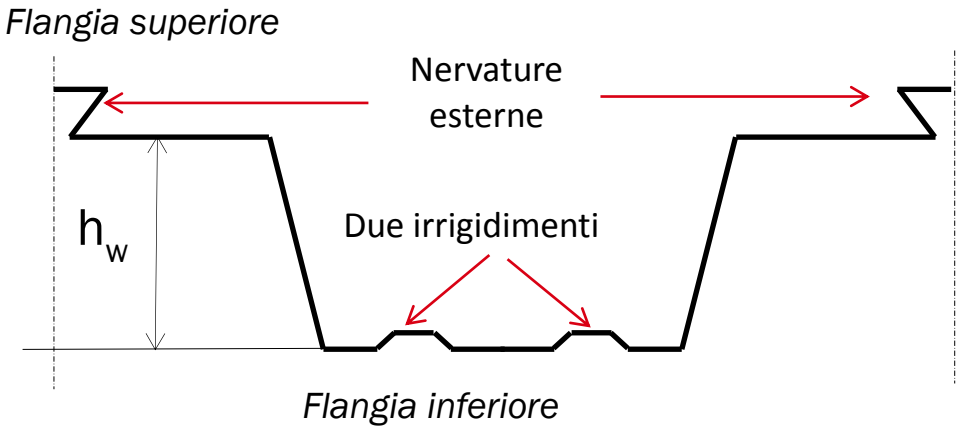


Figura 8.1.1 *– Lamiera in acciaio con nervatura esterna nella flangia superiore e con due nervature nella flangia inferiore*

1) DATI

Tutte le celle evidenziate in rosso devono essere riempite con le dimensioni dei profili (*Figura 8.1.2*): raggi di piegatura interni R1, $R2_{sup}$, $R2_{inf}$, angoli θ_1 e θ_2, spessore di progetto t, spessore nominale t_{nom}, il passo, l'altezza dell'anima h_w, la profondità del rinforzo superiore d_s, la profondità del rinforzo inferiore d_i, la forza di snervamento f_{yb}, il modulo di Young E e γ_{M0}.

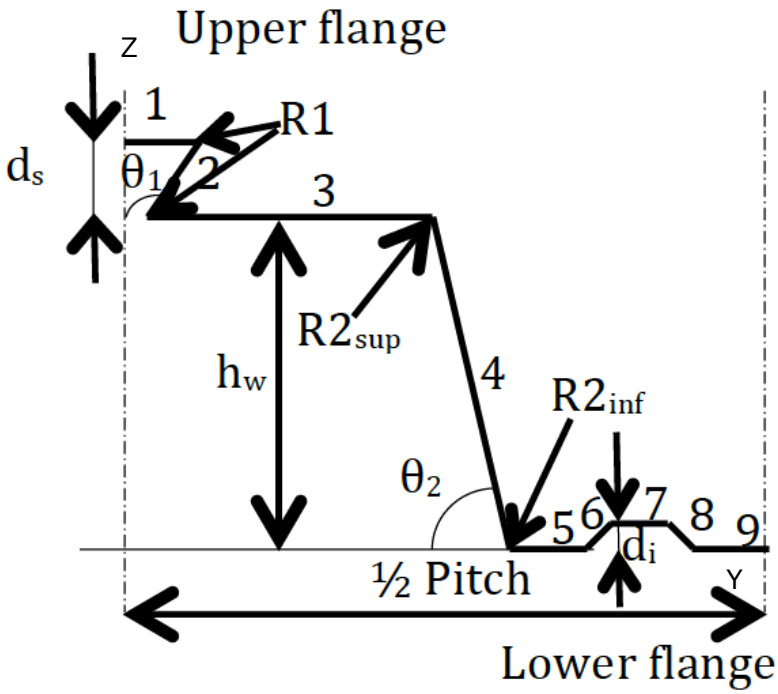


Figura 8.1.2 *– Numeri identificativi degli elementi*

R1 (mm)	θ_1 (rad)	$R2_{sup}$ (mm)	$R2_{inf}$ (mm)	θ_2 (rad)	t_{nom} (mm)	t (mm)

Pitch (mm)	h_w (mm)	d_s (mm)	d_i (mm)	f_{yb} (N/mm²)	E (N/mm²)	γ_{M0}

Tabella 8.1.1 *– Celle Excel da riempire con i dati dimensionali del profilo*

Le celle evidenziate in rosso della seguente tabella devono essere riempite con le dimensioni (b_{pi}) di tutti gli elementi ogni ½ passo. I numeri identificativi degli elementi sono dati in Figura 8.1.2. La lunghezza degli elementi è misurata dai punti medi «P» degli elementi angolari adiacenti come indicato in Figura 8.1.3.

Element	b_{pi} (mm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Tabella 8.1.2 – *Celle Excel da riempire con le dimensioni degli elementi*

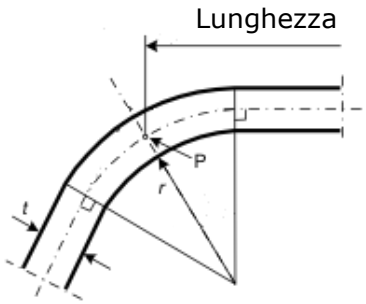


Figura 8.1.3 *- Lunghezza degli elementi misurata dai punti medi « P »*

2) CONTROLLO DELLE PROPORZIONI GEOMETRICHE

Le celle evidenziate in rosso devono essere riempite con il valore di b e il software, automaticamente, mostra la verifica delle proporzioni geometriche.

b=	75.00	
b/t=	87.21	
θ_2=	79.38	
h/t=	93.02	
500sin(θ2)=	491.44	
r <	0,04 $t\,E/f_y$	15.37

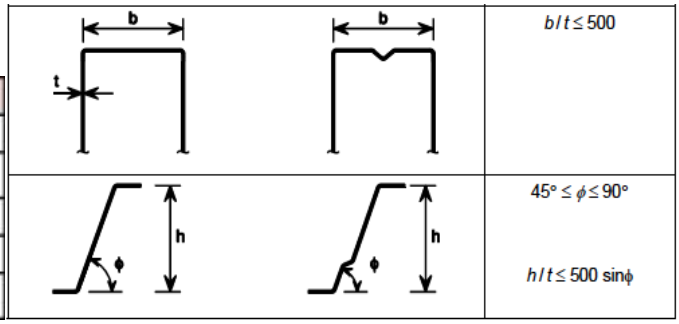


Tabella 8.1.3 *– Verifica automatica delle proporzioni geometriche*

3) RISULTATI

Il software mostra automaticamente i risultati:

⇨ Momento resistente in campata M_{span}= 13.3 kNm/m

8.2. Controllo automatico del software – dettagli riguardanti la fase di calcolo

Il controllo automatico si basa sul calcolo del valore del momento resistente in campata di un profilo con spessore nominale = 0,90 mm.

1) DATI

Software e calcolo:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	$R2_{sup}$ (mm)	$R2_{inf}$ (mm)	θ_2 (rad)	t_{nom} (mm)	t (mm)
0.00	1.89	15.00	5.00	1.39	0.90	0.86

Pitch (mm)	h_w (mm)	d_s (mm)	d_i (mm)	f_{yb} (N/mm²)	E (N/mm²)	γ_{M0}
300.00	80.00	15.00	6.00	450.00	210000.00	1.00

Tabella 8.2.1 *– Celle Excel riempite con i dati dimensionali del profilo*

Element	b_{pi} (mm)
1	12.00
2	15.81
3	68.00
4	77.57
5	15.00
6	8.49
7	8.00
8	8.49
9	25.00

Tabella 8.2.2 *– Celle Excel riempite con le dimensioni degli elementi*

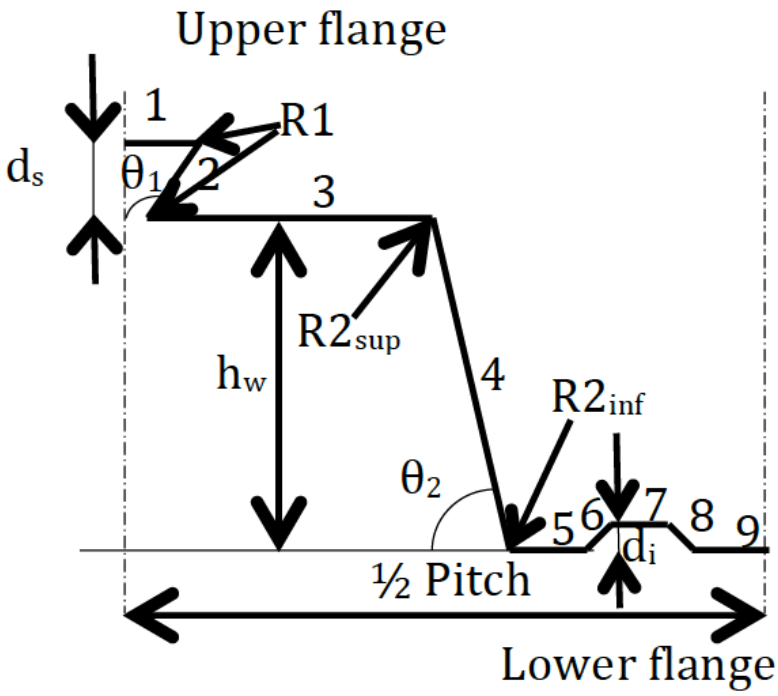
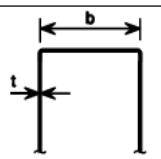
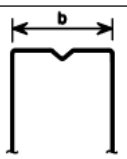
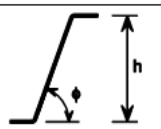
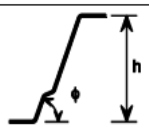


Figura 8.2.1 *– Numeri identificativi degli elementi*

2) Controllo delle proporzioni geometriche

Il software mostra automaticamente il controllo delle proporzioni geometriche

	b=	75.00		
	b/t=	87.21		
	θ_2=	79.38		
	h/t=	93.02		
	500sin(θ2)=	491.44		
r<	$0,04\ t\ E / f_y$	16.05		

$b/t \leq 500$

$45° \leq \phi \leq 90°$

$h/t \leq 500 \sin\phi$

Tabella 8.2.3 *– Controllo automatico delle proporzioni geometriche*

3) RISULTATI

Software:

⇨ Momento resistente in campata M_{span}= 13.3 kNm/m

Calcolo:

Calcolo di A_g, area della sezione trasversale lorda

A_g è la somma delle aree di ogni elemento (lunghezza x t)

A_g = 206.8 mm²

Posizione dell'asse neutro: z_G = 46.6 mm

Calcolo di A_{eff} aree efficaci:

1st Step

A_{eff} è la somma delle aree efficaci di ogni elemento

Area efficace della flangia superiore

La flangia superiore ha 1 nervatura, pertanto l'area trasversale efficace della flangia è calcolata in accordo all' EN 1993-1-3 § "5.5.3.4.2 Flange con nervature intermedie".

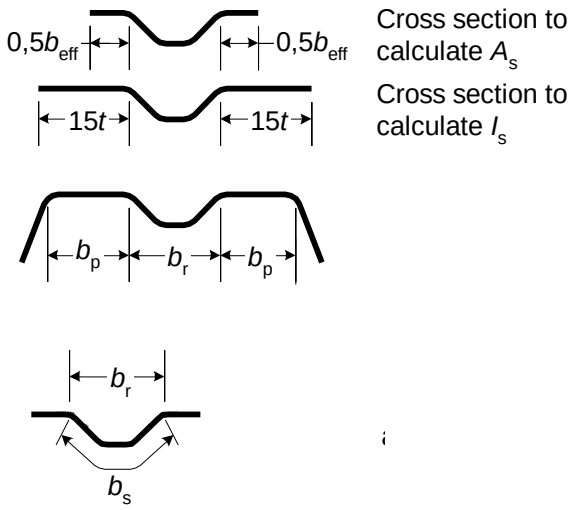


Figura 8.2.2 *– Flangia con una nervatura*

Lo sforzo nella flangia superiore è $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G)/ z_G = 323$ N / mm²

$b_p = 68$ mm, $\rho = 0.57$ ➔ $0{,}5\ b_{eff} = 19.39$ mm

Nervature:

La sezione trasversale della nervatura è calcolata in accordo all' EN 1993-1-3 § "5.5.3.3 Elementi piani con nervature intermedie».

Carico critico di instabilità $\sigma_{cr,s} = 325$ N/mm²

Fattore di riduzione per la resistenza all'instabilità (distortional buckling) $\chi_d = 0{,}619$

Area efficace dell'anima

L'area efficace dell'anima è calcolata in accordo a "5.5.3.4.3 Anime con più di due nervature intermedie" dell'EN 1993-1-3

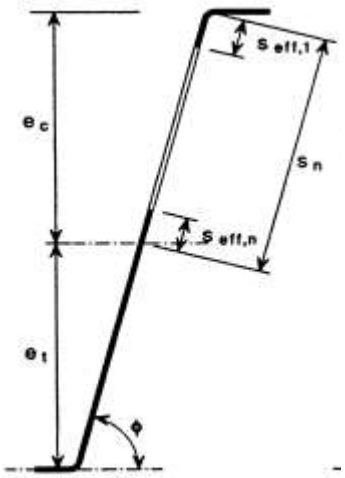


Figura 8.2.3 *– Area efficace dell'anima*

$e_c = h_w - z_G$=33.4 mm ➔ s_n = 31.1 mm

$\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G)/ z_G$ = 323 N / mm² ➔ $s_{eff,0}$ = 20,84mm ➔ $s_{eff,1}$ = 20,84 mm ➔ $s_{eff,n}$ = 31,26 mm ➔ $s_{eff,1} + s_{eff,n} \geq s_n$ è efficace l'intera anima

$s_{eff,1} = 0{,}4 s_n$

$s_{eff,n} = 0{,}6 s_n$

Area efficace della flangia inferiore

La flangia inferiore in questo caso è in tensione ➔ area efficace = area della sezione lorda

Area efficace totale

A_{eff} = 176.2 mm²

Posizione dell'asse neutro dell'area efficace: z_G = 40.57 mm

Iterazione: Fasi successive

Nelle fasi successive viene considerata la nuova posizione dell'asse neutro della sezione efficace per calcolare il nuovo valore di σ_{com}.

L'area efficace della flangia superiore è calcolata come al punto 1 ma considerando la nuova σ_{com} calcolata con la nuova posizione dell'asse neutro z_c.

L'area efficace dell'anima è calcolata come al punto 1 ma considerando la nuova σ_{com} calcolata con la nuova posizione dell'asse neutro z_c.

Tutti i valori dei passi 2, 3 e 4 sono indicati nella seguente tabella. La convergenza è considerata soddisfacente al passo 4, l'iterazione si ferma al passo 4.

		2nd step	3rd step	4th step
Upper flange	σ_{com}	437	450	450
	ρ	0.469	0.460	0.460
	0,5 b $_{1,eff}$	15.96	15.63	15.63
Upper flange	$\sigma_{cr,s}$	350.22	352.81	352.81
	χ_d	0.65	0.65	0.65
	t_{red}	0.58	0.56	0.56
Web	e_c	39.4	39.4	39.4
	s_n	37.2	37.2	37.2
	$s_{eff,0}$	17.9	17.9	17.9
	$s_{eff,1}$	17.9	17.9	17.9
	$s_{eff,n}$	26.9	26.9	26.9
	$s_{eff,1}$ + Seff,n	44.8	44.8	44.8
		entire web is effective	entire web is effective	entire web is effective
	$s_{eff,1}$	0,4sn	0,4sn	0,4sn
	$s_{eff,n}$	0,6sn	0,6sn	0,6sn
Total effective	A_{eff}	163.4	162.3	162.3
Position of ne	z_c	37.2	36.9	36.9

Tabella 8.2.4 *– Valori al passo 2, passo 3 e passo 4*

Calcolo del momento resistente in campata:

$$M_{c,Rd} = W_{eff}\, f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Per ½ passo I_{eff} =191665 mm^4

Per il profilo I_{eff} = 1278 mm^3

v = max (36.9;43.1)=43.1 mm

W_{eff} = I_{eff} / v = 29.6 mm^3

$M_{campata}$ = 13.3 kNm/m

Il risultato ottenuto è analogo a quello dato dal software:

M_{span}= 13.3 kNm/m

Allegato 1

Background del nuovo metodo di progettazione per impalcati in acciaio con rilievi

D1.1	GRISPE WP1 documento di base	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.2	GRISPE WP1 Definizione del programma di esperimenti	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.3	GRISPE Relazione sugli esperimenti su lamiere trapezoidali in acciaio con e senza con e senza rilievi e dentellature	Christian FAUTH (KIT)
D1.4	GRISPE WP1 Interpretazione ed analisi dei dati sperimentali	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.6	GRISPE Guida di base per EN 1993-1-3 per il progetto di lamiere di forma speciale (con nervature esterne nella flangia)	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)

PARTE 2: ESEMPIO APPLICATIVO PER IMPALCATI METALLICI CON NERVATURE ESTERNE

SOMMARIO

Lo scopo di questo esempio applicativo è presentare un nuovo metodo di progettazione tramite calcolo per gli impalcati metallici con nervature esterne, come sviluppato nel progetto Europeo GRISPE PLUS.

L'esempio applicativo si basa sui principi dell'Eurocodice in generale e, più specificatamente, sugli Eurocodici EN 1993-1-3 e EN 1993-1-5.

Questo nuovo metodo di progettazione mediante calcolo per impalcati metallici con nervature esterne, è basato su prove sperimentali condotte all'interno del progetto Europeo Grispe (2013 – 2016).

Il quadro generale di questo metodo è descritto nell'Allegato 1.

Il Capitolo 1 mostra i dati e le dimensioni della sezione traversale della lamiera.

Il Capitolo 2 spiega il calcolo della sezione lorda.

Il Capitolo 3 spiega il calcolo della sezione efficace.

Il Capitolo 4 spiega il calcolo del momento resistente.

Prefazione

Questo Esempio Applicativo è stato condotto con il supporto del finanziamento n°**754092** del fondo europeo RFCS.

Questo nuovo metodo di progettazione è stato presentato al gruppo di lavoro dell'EN 1993-1-3 nel 2016-2017 ed è preso in considerazione per inserirlo negli Eurocodici.

Il presente esempio applicativo è stato scritto da Anna PALISSON ed è stato discusso nel gruppo di lavoro GRISPE PLUS, composto dai seguenti membri:

Mickael BLANC	France
Silvia CAPRILI	Italy
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Germany
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italy
Dominik PYSCHNY	Germany
Thibaut RENAUX	France
Daniel SPAGNI	France

I soci corrispondenti hanno incluso:

SOKOL	Léopold	France

Figure

Le figure sono state fornite dalle seguenti fonti

Figura 1.1 - Sokol Palisson Consultants

Figura 1.1.1 - Sokol Palisson Consultants

Figura 2.1 – Riproduzione del EN 1993-1-3

Figura 3.1.1 - Riproduzione del EN 1993-1-3

Figura 3.1.2 - Riproduzione del EN 1993-1-3

Figura 3.1.3 - Sokol Palisson Consultants

INDICE

Scopo della pubblicazione

Notazioni

1. INTRODUZIONE

1.1. Sezione trasversale della lamiera

1.2. Dati della lamiera

2. CALCOLO DI A_g L'AREA DELLA SEZIONE LORDA

3. CALCOLO DELL'AREA EFFICACE A_{eff} DELLA SEZIONE

3.1. Step 1

3.2. Iterazione: Step 2

3.3. Iterazione: Step 3

4. CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE IN CAMPATA

ALLEGATO 1

SCOPO DELLA PUBBLICAZIONE

Lo scopo della presente pubblicazione è presentare un esempio di applicazione del nuovo metodo di progetto per impalcati in acciaio con nervature esterne, proposto per essere incluso nell'Eurocodice EN 1993-1-3.

Questo esempio applicativo tratta situazioni che si verificano attualmente.

Per questioni specifiche (ad es. aperture) o per situazioni eccezionali (sisma, incendio, ecc.) è necessario seguire le clausole pertinenti degli Eurocodici e/ o EN 1090-4.

NOTAZIONI

I simboli seguenti sono usati all'interno del manuale:

t	spessore di progettazione
t_{nom}	spessore nominale
t_{eff}	spessore efficace
h_w	altezza del profilo
f_{yb}	tensione di snervamento
E	modulo di Young
t_{red}	spessore ridotto
b_{pi}	larghezze delle parti di sezione trasversale piana
$b_{i,eff}$	larghezza efficace
A_g	area della sezione trasversale lorda
A_{eff}	area efficace
z_G	posizione dell'asse neutro
σ_{xx}	sforzo
χ_d	fattore di riduzione per la resistenza alla instabilità torsionale
$M_{c,Rd}$	momento resistente
M_{span}	momento resistente in campata
e_c	distanza tra la flangia compressa e la posizione dell'asse neutro
s_n	larghezza della parte di anima tra la flangia compressa e la posizione dell'asse neutro
s_{eff}	sezione efficace trasversale dell'anima
W_{eff}	modulo di sezione efficace

1. INTRODUZIONE

Questo esempio mostra come trattare le lamiere in acciaio con nervature esterne per determinare la capacità flessionale di una lamiera con una nervatura esterno sulla flangia superiore e due nervature su quella inferiore.

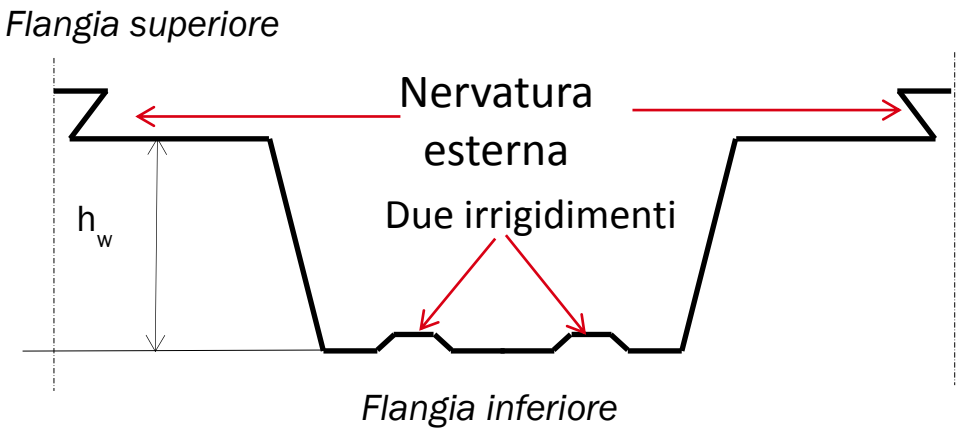


Figura 1.1 *– Lamiera in acciaio con nervatura nella flangia superiore e due nervature nella flangia inferiore*

1.1. Sezione trasversale della lamiera

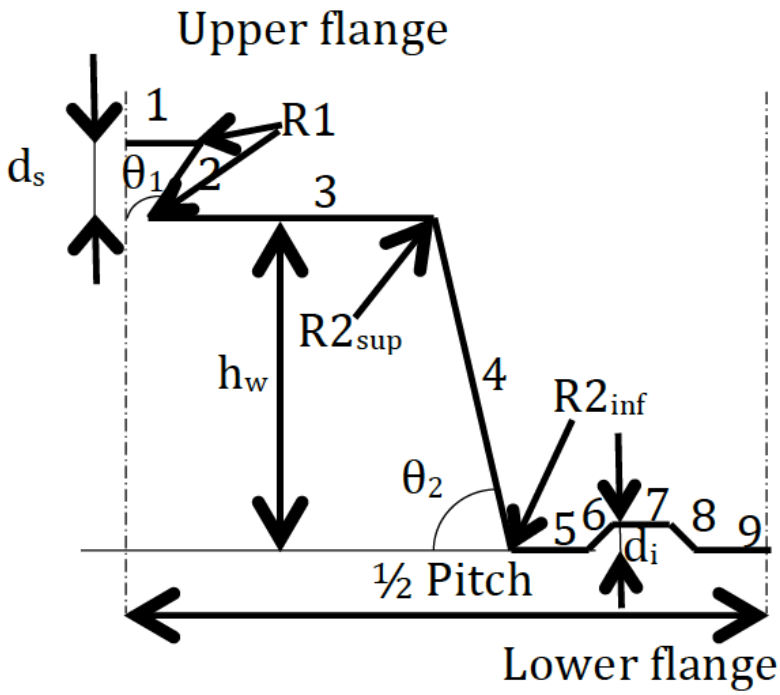


Figura 1.1.1 *– Numeri identificativi degli elementi*

1.2. Dati della lamiera

L'esempio è basato sul calcolo del valore del momento resistente in campata di un profilo con i seguenti dati:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	$R2_{sup}$ (mm)	$R2_{inf}$ (mm)	θ_2 (rad)	t_{nom} (mm)	t (mm)
0.00	1.89	15.00	5.00	1.39	0.90	0.86

Pitch (mm)	h_w (mm)	d_s (mm)	d_i (mm)	f_{yb} (N/mm²)	E (N/mm²)	γ_{M0}
300.00	80.00	15.00	6.00	450.00	210000.00	1.00

Tabella 1.2.1 *– Dati relativi alla lamiera*

Element	b_{pi} (mm)
1	12.00
2	15.81
3	68.00
4	77.57
5	15.00
6	8.49
7	8.00
8	8.49
9	25.00

Tabella 1.2.2 *– Dati dimensionali degli elementi*

Controllo delle proporzioni geometriche

b = 75; t = 0.86; h = 60; f_y = 450

	b=	75.00
	b/t=	87.21
	θ_2=	79.38
	h/t=	93.02
	500sin(θ2)=	491.44
r <	0,04 $t\,E\,/\,f_y$	16.05

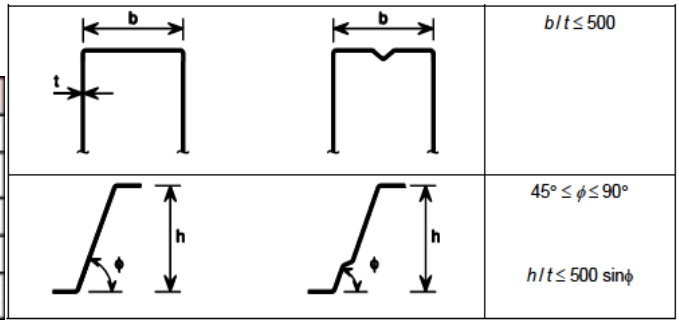
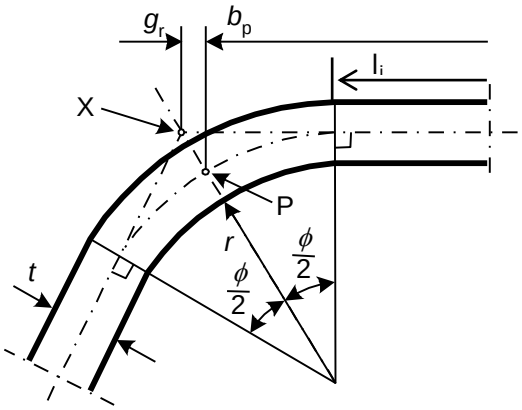


Tabella 1.2.3 *– Controllo delle proporzioni geometriche*

2. CALCOLO DELL'AREA DELLA SEZIONE LORDA A_g

A_g è la somma delle aree di tutti gli elementi (lunghezza x t)

Lunghezza = $l_i = b_p - r_m \times \sin\pi/4$



(a) punto medio dell'angolo o della curvatura

X è l'intersezione delle linee mediane

P è il punto medio dell'angolo

$r_m = r + t/2$

Figura 2.1 *– Larghezze teoriche delle parti b_p della sezione trasversale piana tenendo conto dei raggi degli angoli*

Element	l_i (mm)	A_i(mm²)	z(mm)	S_i(mm³)	z0(mm)
1	12.0	10.3	95.0	980.40	-48.41
Corner 1_{sup}	0.0	0.0	95.0	0.00	-48.41
2	15.8	13.6	87.5	1189.81	-40.91
Corner 1_{inf}	0.0	0.0	80.0	0.00	-33.41
3	58.4	50.2	80.0	4019.33	-33.41
Corner 2_{sup}	20.8	17.9	75.6	1351.88	-29.05
4	64.8	55.7	35.9	2001.69	10.67
Corner 2_{inf}	6.9	6.0	1.5	8.66	45.14
5	11.8	10.2	0.0	0.00	46.59
6	8.5	7.3	3.0	21.89	43.59
7	8.0	6.9	6.0	41.28	40.59
8	8.5	7.3	3.0	21.89	43.59
9	25.0	21.5	0.0	0.00	46.59
TOTAL		206.8		9636.8	46.6

Tabella 2.1 *– Dimensioni degli elementi*

A_g = 206.8 mm²

Posizione dell'asse neutro: $z_G = S / A_g$ = 46,6 mm

3. CALCOLO DELL'AREA EFFICACE DELLA SEZIONE A_{eff}

A_{eff} è la somma delle aree efficaci di ogni elemento.

3.1. Step 1

Area efficace della flangia superiore

La flangia superiore ha una nervatura esterna. La sezione trasversale efficace della flangia è calcolata in accordo a EN 1993-1-3 § "5.5.3.4.2 Flange con nervature intermedie", **ponendo lo sforzo nella nervatura esterna pari a quello nella flangia superiore.**

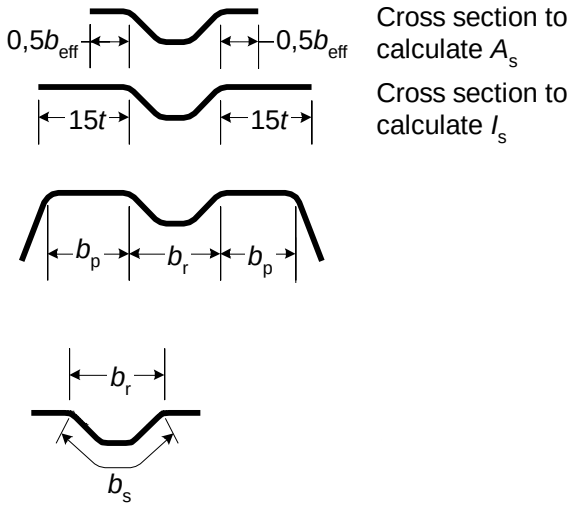


Figura 3.1.1 *– Flangia con una nervatura*

Lo sforzo nella flangia superiore è $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G)/ z_G = 323$ N / mm²

$b_p = 68$ mm

$\lambda_p = b_p/t/(28.4\ \varepsilon k_\sigma^{1/2})$ with $\varepsilon=(235/ f_{yb})^{1/2}$

$\psi=\sigma_2/ \sigma_1 = 1$ ➔ Coefficient $k_\sigma=4$

$\lambda_p=1.926$

$\lambda_{pred} = \lambda_p \times \sqrt{\frac{\sigma\ com}{fy/\gamma M0}}$ ➔ $\lambda_{pred1} = 1.631$

$\lambda_{pred} > 0.673$ ➔ $\rho = \frac{1 - 0{,}055(3+\psi)/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0{,}18\ \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0{,}6)}$ ➔ $\rho = 0.57$

$b_{eff} = \rho * b_p = 38.8$ ➔ $0{,}5\ b_{eff} = 19.4$ m

Nervatura nella flangia superiore:

La sezione trasversale della nervatura è calcolata in accordo a EN 1993-1-3 § "5.5.3.3 Elementi piani con nervature intermedie».

Calcolo dello sforzo critico di instabilità $\sigma_{cr,s}$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2\, k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s \; t^3}{4 \; b_p^{\,2} \; \left(2 \; b_p + 3 \; b_s \right)}}$$

b_s = 55.6 mm, b_p = 68 mm

Calcolo di A_s

Element	l_i (mm)	A_i(mm²)
plane part	19.39	16.68
Corner l_{inf}	0.00	0.00
2	15.81	13.60
Corner l_{sup}	0.00	0.00
1	24.00	20.64
Corner l_{sup}	0.00	0.00
2	15.81	13.60
Corner l_{inf}	0.00	0.00
plane part	19.39	16.68
TOTAL		81.2

Tabella 3.1.1 *– Lunghezza e area degli elementi*

A_s = 81.2 mm²

Calcolo di I_s

Element	l_i (mm)	A_i(mm²)	z(mm)	S_i(mm³)	z0(mm)	h	I_i(mm⁴)
plane part	12.90	11.09	0.00	0.00	7.33	0.86	597.44
Corner l_{inf}	0.00	0.00	0.00	0.00	7.33	0.00	0.00
2	15.81	13.60	7.50	101.98	-0.17	15.00	255.33
Corner l_{sup}	0.00	0.00	15.00	0.00	-7.67	0.00	0.00
1	24.00	20.64	15.00	309.60	-15.33	1.72	1214.17
Corner l_{sup}	0.00	0.00	15.00	0.00	-7.67	0.00	0.00
2	15.81	13.60	7.50	101.98	-0.17	15.00	255.33
Corner l_{inf}	0.00	0.00	0.00	0.00	7.33	0.00	0.00
plane part	12.90	11.09	0.00	0.00	7.33	0.86	597.44
TOTAL		70.0		513.6	7.33		2919.7

Tabella 3.1.2 *– Lunghezze e aree di momento degli elementi*

I_s = 2919.7 mm⁴

$$l_b = 3{,}07 \sqrt[4]{\frac{I_s \; b_p^{\,2} \; \left(2 \; b_p + 3 \; b_s \right)}{t^3}}$$

l_b = 869.3

s_w = 73.7

l_b / s_w = 11.8 ≥ 2 ➔ k_w = k_{wo}

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{s_w + 2\ b_d}{s_w + 0{,}5\ b_d}}$$

b_d = 2b_p + b_s= 191.6 mm

k_{wo} = 1.64

sforzo critico di instabilità $\sigma_{cr,s}$ = 324.7 N/mm²

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}}$$

λ_d = 1.177

$0{,}65 < \bar{\lambda}_d < 1{,}38$ ➔ $\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_d$

Fattore di riduzione per la resistenza ad instabilità torsionale χ_d = 0,619

Spessore ridotto $t_{red} = c_d t \frac{f_{yb}/g_{M0}}{s_{com,Ed}}$

Spessore ridotto t_{red} = 0.74 mm

Area efficace dell'anima

L'area efficace dell'anima è calcolata in accordo a "5.5.3.4.3 Anime con più di due nervature intermedie" dell'EN 1993-1-3.

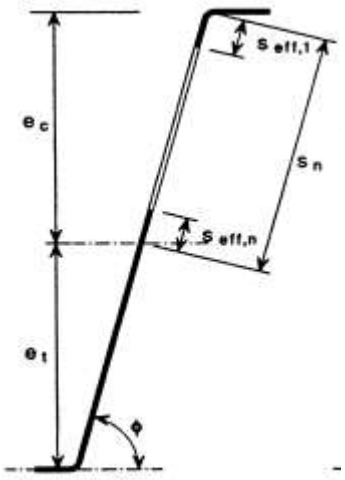


Figura 3.1.2 *– Area efficace dell'anima*

e_c = h_w – z_G=33.4 mm ➔ s_n = 31.1 mm

σ_{com} = f_{yb} X (h_w – z_G)/ z_G = 323 N / mm²

Proprietà della sezione efficace raffinate con processo iterativo ➔

$$s_{\text{eff},0} = 0{,}95t\sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0}\sigma_{\text{com,Ed}}}}$$

➔ $s_{eff,0}$ = 20,84 mm

$s_{eff,1} = s_{eff,0}$ ➔ $s_{eff,1}$ = 20,84 mm

$s_{eff,n} = 1.5\ s_{eff,0}$ ➔ $s_{eff,n}$ = 31.26 mm ➔ $s_{eff,1} + s_{eff,n} \geq s_n$ l'intera anima è efficace.

$s_{eff,1} = 0{,}4s_n$

$s_{eff,n} = 0{,}6s_n$

<u>Area efficace della flangia inferiore</u>

In questo caso la flangia inferiore è in tensione ➔ tutta la larghezza è efficace

<u>Area efficace totale</u>

Calcolo di A_{eff}

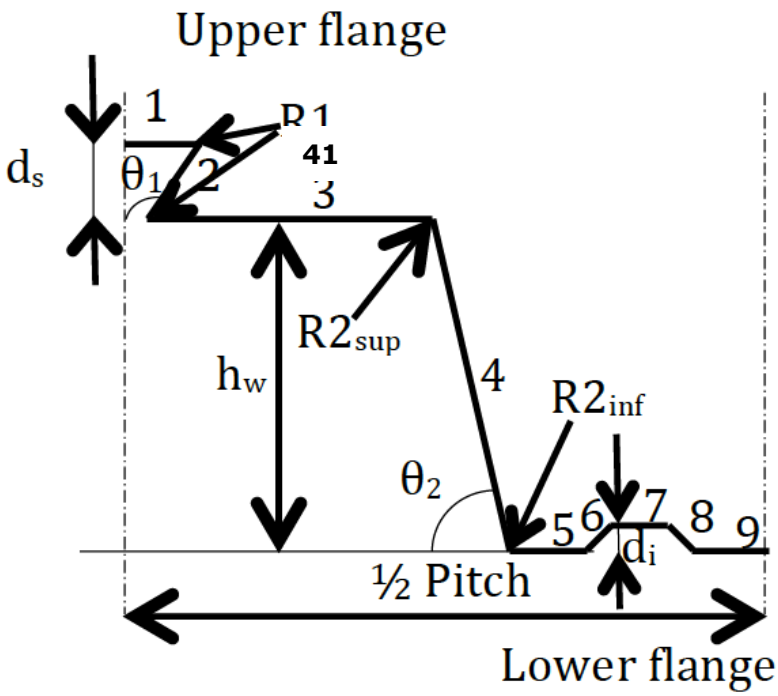


Figura 3.1.3 *– Numeri identificativi degli elementi*

Element	l_i (mm)	t_{eff} (mm)	A_i(mm²)	z(mm)	S_i(mm³)	z0(mm)
1	12.0	0.7	8.9	95.0	846.1	-54.4
Corner 1_{sup}	0.0	0.7	0.0	95.0	0.0	-54.4
2	15.8	0.7	11.7	87.5	1026.8	-46.9
Corner 1_{inf}	0.0	0.7	0.0	80.0	0.0	-39.4
31	19.4	0.7	14.4	80.0	1151.5	-39.4
32	9.8	0.9	8.4	80.0	675.2	-39.4
Corner 2_{sup}	20.8	0.9	17.9	75.6	1351.9	-35.1
4	64.8	0.9	55.7	35.9	2001.7	4.6
Corner 2_{inf}	6.9	0.9	6.0	1.5	8.7	39.1
5	11.8	0.9	10.2	0.0	0.0	40.6
6	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	37.6
7	8.0	0.9	6.9	6.0	41.3	34.6
8	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	37.6
9	25.0	0.9	21.5	0.0	0.0	40.6
TOTAL			176.2		7147.0	40.6

Tabella 3.1.3 *– Lunghezze e aree degli elementi*

A_{eff} = 176.2 mm²

Posizione dell'asse neutro della sezione efficace: z_G = 40,6 mm

3.2. Iterazione: Passi successivi

Nei passi successivi si considera la nuova posizione dell'asse neutro della sezione efficace per calcolare il nuovo valore di σ_{com} .

L'area della flangia superiore è calcolata come al passo 1 ma considerando la nuova σ_{com} calcolata con la nuova posizione dell'asse neutro z_c

L'area efficace dell'anima è calcolata come al passo 1 ma considerando la nuova σ_{com} calcolata con la nuova posizione dell'asse neutro z_c

Area efficace della flangia inferiore

La flangia inferiore, in questo caso, è in tensione ➔ tutta la larghezza è efficace.

Tutti i valori dei passi 2, 3 e 4 sono indicati nella seguente tabella. La convergenza è considerata soddisfacente al passo 4, l'interazione si ferma al passo 4.

		2nd step	3rd step	4th step
Upper flange	σ_{com}	437	450	450
	ρ	0.469	0.460	0.460
	0,5 b $_{1,eff}$	15.96	15.63	15.63
Upper flange	$\sigma_{cr,s}$	350.22	352.81	352.81
	χ_d	0.65	0.65	0.65
	t_{red}	0.58	0.56	0.56
Web	e_c	39.4	39.4	39.4
	s_n	37.2	37.2	37.2
	$s_{eff,0}$	17.9	17.9	17.9
	$s_{eff,1}$	17.9	17.9	17.9
	$s_{eff,n}$	26.9	26.9	26.9
	$s_{eff,1}$ + Seff,n	44.8	44.8	44.8
		entire web is effective	entire web is effective	entire web is effective
	$s_{eff,1}$	0,4sn	0,4sn	0,4sn
	$s_{eff,n}$	0,6sn	0,6sn	0,6sn
Total effective	A_{eff}	163.4	162.3	162.3
Position of ne	z_c	37.2	36.9	36.9

Tabella 3.2.1 *– Valori ottenuti ai passi 2, 3, 4*

4. CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE IN CAMPATA

Il momento resistente in campata è calcolato considerando i valori ottenuti al passo 4.

Element	l_i (mm)	t_{cor} (mm)	A_i(mm²)	z(mm)	S_i(mm³)	z0(mm)	h	I_i(mm⁴)
1	12.0	0.6	6.7	95.0	640.7	-58.1	0.9	22784.9
Corner 1_{sup}	0.0	0.6	0.0	95.0	0.0	-58.1	0.0	0.0
2	15.8	0.6	8.9	87.5	777.5	-50.6	15.0	22940.3
Corner 1_{inf}	0.0	0.6	0.0	80.0	0.0	-43.1	0.0	0.0
31	15.6	0.6	8.8	80.0	702.9	-43.1	0.9	16341.2
32	6.1	0.9	5.2	80.0	416.6	-43.1	0.9	9684.5
Corner 2_{sup}	20.8	0.9	17.9	75.6	1351.9	-38.8	0.0	27109.4
4	64.8	0.9	55.7	35.9	2001.7	1.0	63.7	18884.8
Corner 2_{inf}	6.9	0.9	6.0	1.5	8.7	35.4	0.0	7484.0
5	11.8	0.9	10.2	0.0	0.0	36.9	0.9	13807.1
6	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	33.9	8.5	8417.3
7	8.0	0.9	6.9	6.0	41.3	30.9	0.9	6558.7
8	8.5	0.9	7.3	3.0	21.9	33.9	8.5	8417.3
9	25.0	0.9	21.5	0.0	0.0	36.9	0.9	29235.5
TOTAL			162.3		5984.9	36.9		191664.9

Tabella 4.1 *– Valori ottenuti al passo 4*

$$M_{c,Rd} = W_{eff}\, f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Per ½ passo I_{eff} =191665 mm^4

Per il profilo I_{eff} = 1278 mm^3

v = max (36.9;43.1)=43.1 mm

W_{eff} = I_{eff} / v = 29.6 mm^3

$M_{campata}$ = 13.3 kNm/m

Allegato 1

Background del nuovo metodo di progettazione per impalcati in acciaio con rilievi

D1.1	GRISPE WP1 documento di base	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.2	GRISPE WP1 Definizione del programma di esperimenti	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.3	GRISPE Relazione sugli esperimenti su lamiere trapezoidali in acciaio con e senza con e senza rilievi e dentellature	Christian FAUTH (KIT)
D1.4	GRISPE WP1 Interpretazione ed analisi dei dati sperimentali	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.6	GRISPE Guida di base per la EN 1993-1-3 per il progetto di lamiere di forma speciale (con nervature esterne nella flangia)	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)