

**STRUTTURA METALLICA PER VANO CORSA IMPIANTO  
ELEVATORE**

**OPERA FINALIZZATA ALL'ABBATTIMENTO DELLE BARRIERE  
ARCHITETTONICHE**

<b>DITTA COSTRUTTRICE:</b>	<b>DEMO</b>
<b>RIFERIMENTO:</b>	<b>DEMO</b>
<b>LUOGO DI INSTALLAZIONE:</b>	<b>Via - 00 - AA</b>
<b>PROGETTO N:</b>	<b>00000</b>

**IL PRESENTE DOCUMENTO CONTIENE I FASCICOLI SOTTO RIPORTATI:**

- **GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITA' DEI RISULTATI**

[www.feme.biz](http://www.feme.biz)

# Indice

<b>11 Giudizio motivato di accettabilità dei risultati e relazione specifica (D.M. 17.01.2018 §10.2)</b>	<b>1</b>
11.1 Giudizio motivato di accettabilità dei risultati ed assunzione di responsabilità . . .	1
11.2 Relazione sul software per il calcolo automatico delle strutture (art. 10.2 del D.M. 17/01/2018) . . . . .	2
11.3 Trave di Eulero-Bernoulli incatrata su un lato . . . . .	3
11.3.1 Analisi statica - soluzione esatta . . . . .	4
11.3.2 Analisi statica - soluzione FEME . . . . .	4
11.3.3 Analisi dinamica - soluzione esatta . . . . .	6
11.3.4 Analisi dinamica - soluzione FEME . . . . .	9
11.4 Carico critico per una trave incastrata su un lato . . . . .	9
11.5 Area efficace di una sezione . . . . .	10
11.5.1 Caratteristiche geometriche lorde . . . . .	11
11.5.2 Classificazione della sezione . . . . .	12
11.5.3 Calcolo dell'area efficace . . . . .	12

[www.feme.biz](http://www.feme.biz)

# 11. Giudizio motivato di accettabilità dei risultati e relazione specifica (D.M. 17.01.2018 §10.2)

## 11.1 Giudizio motivato di accettabilità dei risultati ed assunzione di responsabilità

CARENSTUDIO ha verificato l'affidabilità e la robustezza del codice di calcolo attraverso un numero significativo di casi prova in cui i risultati dell'analisi numerica sono stati confrontati con soluzioni teoriche.

Il sottoscritto, per la parte di propria competenza:

- ha eseguito le verifiche adottando un tipo di analisi dinamica modale, che rappresenta la modalità più accurata di calcolo;
- ha utilizzato come sw di calcolo il FEME (vers. 7.6) tenendo conto delle condizioni di calcolo più gravose. Il sw di calcolo è stato prodotto utilizzando un codice di programmazione eseguibile con MATLAB (vers. R2017a Lic. n. 40654185);
- ha provveduto ad esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico.
- ha dedicato particolare attenzione alle modalità di presentazione dei risultati, in modo che questi riassumano, in una sintesi completa ed efficace, il comportamento della struttura per ciascun tipo di analisi sviluppata.
- ha provveduto a verificare l'attendibilità dei dati sia con verifiche manuali sia confrontando i risultati ottenuti a quelli di varie altre casistiche similari, riscontrandone una adeguata corrispondenza;
- in relazione a quanto esposto, valutata sia la semplicità della struttura sia la grande quantità di strutture similari progettate, tutte con buon esito, e con sostanziale coincidenza di risultati ritiene senz'altro attendibili i risultati ottenuti.

Analisi sismica	dinamica lineare con spostamenti imposti
Progetto-verifica degli elementi	D.M. 17-01-2018
Norma applicata per l'azione sismica	D.M. 17-01-2018

### COMBINAZIONI CASI DI CARICO

APPROCCIO PROGETTUALE	APPROCCIO 2
SLU	SI'
SLU (SLV sisma)	SI'
SLE	SI'
COMB. caratteristica (rara)	SI'
COMB. frequenti	SI'
COMB. quasi permanenti	SI'
COMB. accidentale	SI'

Tab. 11.1: Tipo di analisi strutturale svolta (quadro normativo generale di riferimento).

## 11.2 Relazione sul software per il calcolo automatico delle strutture (art. 10.2 del D.M. 17/01/2018)

Titolo:	FEME (Finite Element Models for Elevators)
Versione:	7.6
Produttore:	CAREN STUDIO
Linguaggio di programmazione:	MATLAB R2017b
Licenza:	40654185
Utente finale:	ing. GILBERTO CAVANNA

Tab. 11.2: Origine e caratteristiche del codice di calcolo.

Titolo:	PROGECAD
Versione:	18.0.8
Produttore:	Progesoft
Licenza:	ord. 2448
Utente finale:	ing. GILBERTO CAVANNA

Tab. 11.3: Origine e caratteristiche software di disegno.

Le analisi effettuate per ottenere i risultati riportati in questa relazione sono state eseguite utilizzando un codice di calcolo proprietario le cui caratteristiche sono riportate nella Tab. 11.2. Tale codice è basato sul metodo degli elementi finiti: l'equazione dei lavori virtuali che caratterizza la struttura viene risolta in forma approssimata (soluzione debole) discretizzando la struttura con elementi il cui comportamento è governato dalle equazioni ricavate attraverso la Scienza delle Costruzioni. La soluzione del problema è data in termini di spostamenti nodali, ovvero gli spostamenti dei punti di collegamento tra gli elementi.

Gli elementi con cui la struttura è discretizzata sono caratterizzati da una matrice di rigidezza che mette in relazione gli spostamenti dei nodi del singolo elemento con le forze esterne. Le matrici di rigidezza di tutti gli elementi subiscono un'operazione di rotazione dovuta alla trasformazione dal sistema di riferimento locale dei singoli elementi al sistema di riferimento globale della struttura. Successivamente le matrici di rigidezza vengono opportunamente assemblate per comporre la matrice di rigidezza dell'intera struttura. In questo modo è possibile trasformare le equazioni integrali che caratterizzano il comportamento strutturale in un sistema di equazioni algebriche nella forma:

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (11.1)$$

dove:

- $[K]$  è la matrice di rigidezza globale della struttura;
- $\{u\}$  è il vettore degli spostamenti nodali;
- $\{f\}$  è il vettore delle forze esterne nodali.

La conoscenza degli spostamenti ai nodi della struttura permette di calcolare, di conseguenza, le deformazioni e le sollecitazioni interne dei singoli elementi e di verificare la resistenza e la stabilità della struttura stessa con i criteri dati dalle norme in vigore.

Il codice di calcolo FEME si differenzia da quelli che possono essere trovati in commercio per il fatto di essere dedicato alla modellizzazione di strutture in acciaio per gli impianti elevatori: inserendo il valore di un numero limitato di parametri (dimensioni, profili delle sezioni, ecc.) è

possibile assemblare automaticamente l'intera struttura alla quale devono essere imposti i vincoli cinematici ed applicate le forze esterne.

Per verificare la validità dei risultati ottenuti dal solutore del codice di calcolo sono stati risolti alcuni problemi strutturali di cui è conosciuta la soluzione esatta proveniente dalla Scienza delle Costruzioni. In particolare sono stati verificati i risultati dei seguenti problemi:

- Trave di Eulero-Bernoulli con un vincolo di incastro su un lato (analisi statica e di dinamica libera);
- Stabilità al carico di punta di una trave incatrata su un lato;
- Classificazione e calcolo delle caratteristiche efficaci per una sezione di classe 4.

### 11.3 Trave di Eulero-Bernoulli incatrata su un lato

Si vuole analizzare il comportamento statico e dinamico della trave a sbalzo mostrata nella Fig. 11.1 sottoposta ad un carico  $F=100$  N concentrato nell'estremo libero. Le caratteristiche della trave sono riportate nella Tab. 11.4

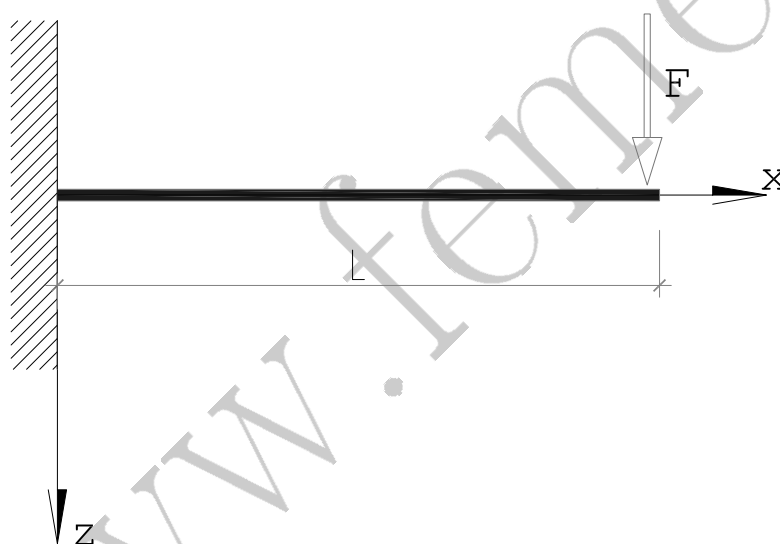


Fig. 11.1: Trave incastrata su un lato.

Lunghezza ( $L$ )	1.6 m
Sezione	UPN100
Momento di inerzia asse $y$ ( $J_y$ )	$2.05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$
Momento di inerzia asse $z$ ( $J_z$ )	$2.91 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$
Area sezione ( $A$ )	$1.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Modulo di Young ( $E$ )	210 GPa
Densità ( $\rho$ )	$7800 \text{ kg/m}^3$

Tab. 11.4: Caratteristiche della trave

### 11.3.1 Analisi statica - soluzione esatta

Equazione Statica Trave Inflessa

$$E J_y w'''' = 0$$

Condizioni al contorno :

$$w(0) = 0 \quad \text{spostamento nullo all'incastro}$$

$$w'(0) = 0 \quad \text{rotazione nulla all'incastro}$$

$$E J_y w''(L) = 0 \quad \text{momento nullo all'estremo libero}$$

$$E J_y w'''(L) = F \quad \text{taglio all'estremo libero}$$

Integrando l'equazione si ha:

$$E J_y w''' = c_1 \Rightarrow c_1 = F \Rightarrow w'''(x) = \frac{F}{E J_y}$$

$$w''(x) = \frac{F}{E J_y} x + c_2 \Rightarrow c_2 = -\frac{F}{E J_y} L \Rightarrow w''(x) = \frac{F}{E J_y} (x - L)$$

$$w'(x) = \frac{F}{E J_y} \left( \frac{x^2}{2} - Lx \right) + c_3 \Rightarrow c_3 = 0$$

$$w(x) = \frac{F}{E J_y} \left( \frac{x^3}{6} - L \frac{x^2}{2} \right) + c_4 \Rightarrow c_4 = 0$$

$$w(x) = \frac{F}{E J_y} \left( \frac{x^3}{6} - L \frac{x^2}{2} \right)$$

### 11.3.2 Analisi statica - soluzione FEME

La trave in esame è stata modellizzata con il metodo agli elementi finiti utilizzando il solutore del codice di calcolo FEME. Il modello scelto è composto da 8 elementi finiti a due nodi aventi il comportamento di trave di Eulero-Bernoulli. Nella Tab. 11.5 sono riportati i valori degli spostamenti della trave lungo la direzione z calcolati con la soluzione esatta ( $w_{ex}$ ) e con il solutore



agli elementi finiti ( $w_{FE}$ ).

x [m]	$w_{ex}$ [mm]	$w_{FE}$ [mm]	$\Delta$ %
0.0	0.000e+00	0.000e+00	0.0
0.2	7.123e-03	7.123e-03	0.0
0.4	2.726e-02	2.726e-02	0.0
0.6	5.854e-02	5.854e-02	0.0
0.8	9.911e-02	9.911e-02	0.0
1.0	1.471e-01	1.471e-01	0.0
1.2	2.007e-01	2.007e-01	0.0
1.4	2.580e-01	2.580e-01	0.0
1.6	3.172e-01	3.172e-01	0.0

Tab. 11.5: Analisi statica - Confronto spostamenti.

### 11.3.3 Analisi dinamica - soluzione esatta

#### Equazione Dinamica Libera

$$EI_Y \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Soluzione

$$\sum_{k=1}^{\infty} \psi_k(x) \sin(\omega_k t + \phi_k) d\pi$$

L'Equazione diventa:

$$EI \psi''''(x) - \omega^2 \rho A \psi(x) = 0$$

$$\psi''''(x) - \lambda^4 \psi(x) = 0 \quad \text{con } \lambda^4 = \frac{\omega^2 \rho A}{EI}$$

che ammette soluzione

$$\psi_k(x) = C_1 \cosh \lambda_k x + C_2 \sinh \lambda_k x + C_3 \cos \lambda_k x + C_4 \sin \lambda_k x$$

Condizioni al contorno:

$$\psi(0) = 0 \quad \text{spostamento nullo all'incastro}$$

$$\psi'(0) = 0 \quad \text{rotazione nulla all'incastro}$$

$$M(L) = 0 \Rightarrow \psi''(L) = 0 \quad \text{momento nullo all'estremo libero}$$

$$V(L) = 0 \Rightarrow \psi'''(L) = 0 \quad \text{taglio nullo all'estremo libero}$$

Calcolo Derivate

$$\psi'_\kappa(x) = \lambda_\kappa (C_1 \sinh \lambda_\kappa x + C_2 \cosh \lambda_\kappa x - C_3 \sin \lambda_\kappa x + C_4 \cos \lambda_\kappa x)$$

$$\psi''_\kappa(x) = \lambda_\kappa^2 (C_1 \cosh \lambda_\kappa x + C_2 \sinh \lambda_\kappa x - C_3 \cos \lambda_\kappa x - C_4 \sin \lambda_\kappa x)$$

$$\psi'''_\kappa(x) = \lambda_\kappa^3 (C_1 \sinh \lambda_\kappa x + C_2 \cosh \lambda_\kappa x + C_3 \sin \lambda_\kappa x - C_4 \cos \lambda_\kappa x)$$

Imponendo le condizioni al contorno si ha:

$$\psi(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_1 + C_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad C_3 = -C_1$$

$$\psi'(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_2 + C_4 = 0 \quad \Rightarrow \quad C_4 = -C_2$$

$$\psi''(L) = C_1 \cosh \lambda_\kappa L + C_2 \sinh \lambda_\kappa L - C_3 \cos \lambda_\kappa L - C_4 \sin \lambda_\kappa L = 0$$

$$\psi'''(L) = C_1 \sinh \lambda_\kappa L + C_2 \cosh \lambda_\kappa L + C_3 \sin \lambda_\kappa L - C_4 \cos \lambda_\kappa L = 0$$

Sostituendo le prime due espressioni nelle ultime due:

$$\begin{bmatrix} \cosh \lambda_\kappa L + \cos \lambda_\kappa L & \sinh \lambda_\kappa L + \sin \lambda_\kappa L \\ \sinh \lambda_\kappa L - \sin \lambda_\kappa L & \cosh \lambda_\kappa L + \cos \lambda_\kappa L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Il sistema ammette soluzioni se e solo se

$$\det \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \end{bmatrix} = 0 \quad \text{e quindi deve essere:}$$

$$(\cosh \lambda_\kappa L + \cos \lambda_\kappa L)^2 - (\sinh^2 \lambda_\kappa L - \sin^2 \lambda_\kappa L) = 0$$

da cui

$$\cosh \lambda_\kappa L \cos \lambda_\kappa L + 1 = 0$$

I primi tre valori di  $\lambda_k$  per cui l'equazione è soddisfatta sono:

$$\lambda_1 = 1.875104/L \Rightarrow \omega_1 = 3.516015 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho A L^4}}$$

$$\lambda_2 = 4.694091/L \Rightarrow \omega_2 = 22.034490 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho A L^4}}$$

$$\lambda_3 = 7.854757/L \Rightarrow \omega_3 = 61.697208 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho A L^4}}$$



### 11.3.4 Analisi dinamica - soluzione FEME

Nella Tab. 11.6 è riportato il confronto tra le prime tre pulsazioni proprie della trave ricavate dalla teoria e quelle calcolate con il solutore FEME.

modo	$\omega_{ex}$ [mm]	$\omega_{FE}$ [mm]	$\Delta$ %
1	277.70	274.14	-1.28
2	1740.35	1718.17	-1.27
3	4873.02	4813.46	-1.22

Tab. 11.6: Analisi dinamica - Confronto pulsazioni proprie.

## 11.4 Carico critico per una trave incastrata su un lato

Si vuole ora confrontare il valore del carico critico ricavato dal solutore agli elementi finiti con quello teorico euleriano per la trave analizzata negli esempi precedenti. In questo caso il carico concentrato all'estremo libero è diretto lungo l'asse x con verso tale da comprimere la trave. Nella Fig. 11.2 è mostrato il modello in esame.

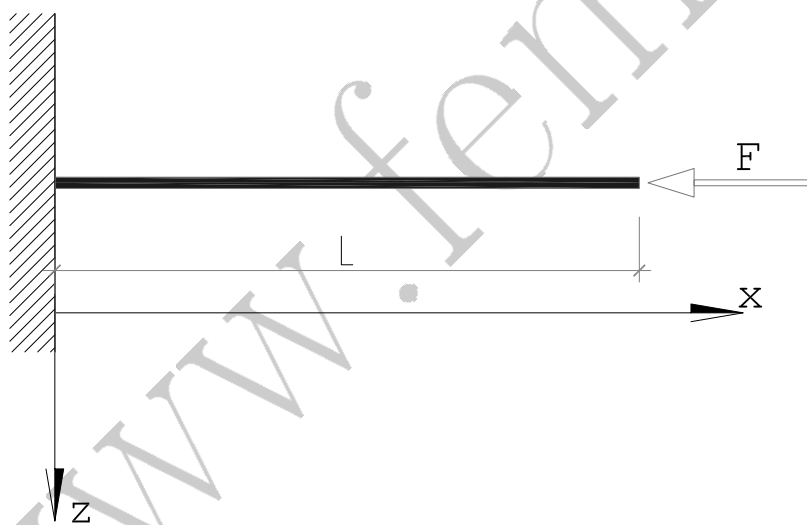


Fig. 11.2: Carico critico - modello di trave.

L'espressione del carico critico euleriano è la seguente:

$$F_{cr} = \pi^2 \frac{EI_{\min}}{L_0^2}$$

dove  $I_{\min}$  è il minore tra i momenti di inerzia flessionali della sezione e  $L_0^2$  è la lunghezza libera di inflessione, che, considerando le condizioni al contorno del problema, è pari a  $2L$ .

Nella Tab. 11.7 è riportato il confronto tra il valore del carico critico euleriano  $F_{cr}^e$  e quello calcolato con il solutore FEME,  $F_{cr}^{FE}$ .

$F_{cr}^e$ [N]	$F_{cr}^{FE}$ [N]	$\Delta$ %
5.8900e+04	5.8900e+04	0

Tab. 11.7: Carico critico - Confronto dei risultati

## 11.5 Area efficace di una sezione

In questo esempio verranno confrontati i valori dell'area efficace della sezione mostrata nella Fig. 11.3. Le caratteristiche geometriche della sezione sono riportate nella Tab. 11.8

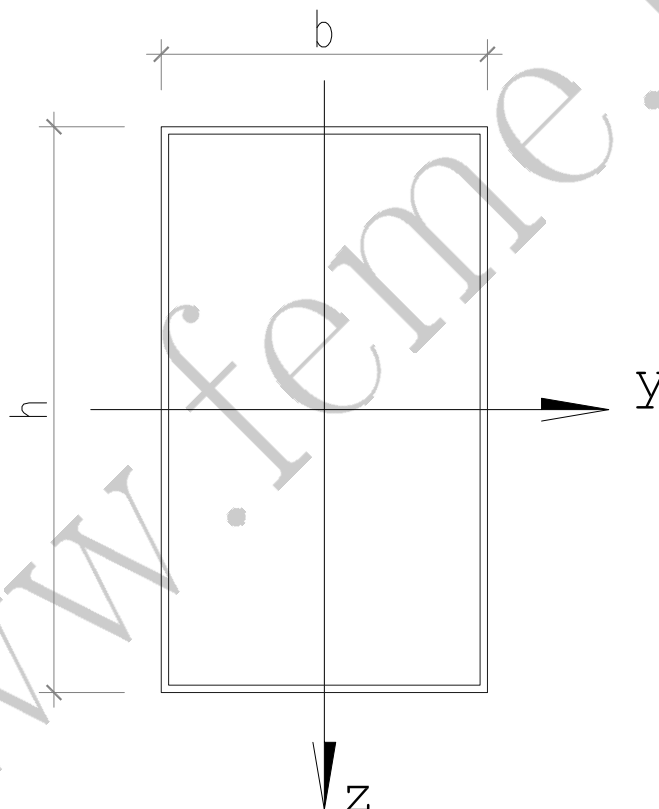


Fig. 11.3: Area efficace - Disegno della sezione.

La procedura di verifica adottata in questo esempio è la seguente:

- calcolo delle caratteristiche lorde della sezione;
- classificazione della sezione;
- calcolo dell'area efficace.

Altezza	h	152 mm
Larghezza	b	52 mm
Spessore	t	2 mm
Raggio di raccordo	r	2 mm

Tab. 11.8: Area efficace - Caratteristiche geometriche della sezione

Si assume che il materiale del profilato sia l'acciaio S235 e che la trave si uniformemente compressa sotto l'azione di un carico assale pari a 100 kN.

### 11.5.1 Caratteristiche geometriche lorde

Prima di procedere alla classificazione del profilo, la sezione viene approssimata a "spigoli vivi". Per fare questo bisogna calcolare il raggio medio  $r_m$  e la proiezione della distanza  $g_r$  tra la linea media e il centro del raccordo (vedi Fig 11.4).

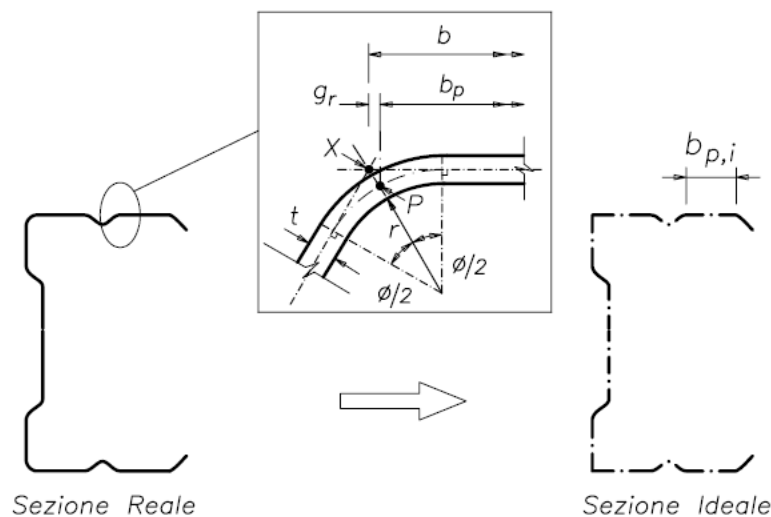


Fig. 11.4: Area efficace - approssimazione a spigoli vivi.

Considerando che l'angolo di raccordo  $\phi$  tra i lati della sezione è pari a  $90^\circ$ , si ha:

$$r_m = r + t/2 = 3 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\phi/2) - \sin(\phi/2)] = 0.879 \text{ mm}$$

Le caratteristiche geometriche dell'area così approssimata sono quindi:

$$h_p = h - t - 2g_r = 148.242 \text{ mm}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 48.242 \text{ mm}$$

$$A_g = 785.936 \text{ mm}^2$$

A questo punto bisogna tener presente che il solutore FEME procede alla classificazione della sezione e al calcolo delle caratteristiche di resistenza efficaci a partire dalle coordinate dei punti che definiscono la sezione già approssimata.

### 11.5.2 Classificazione della sezione

Seguendo le prescrizioni date dall'Eurocodice EC3 parte 1-1 si procede alla classificazione della sezione calcolando i rapporti tra le lunghezze  $c$  degli elementi della sezione stessa e lo spessore. Per gli elementi di lunghezza  $b_p$  si ha:

$$\frac{c}{t} = \frac{b_p}{t} = \frac{48.242}{2} = 24.121 < 33\varepsilon$$

dove  $\varepsilon = \sqrt{f_y/235} = 1$ .

Gli elementi sono quindi di classe 1. Per quelli di lunghezza  $h_p$  risulta:

$$\frac{c}{t} = \frac{h_p}{t} = \frac{148.242}{2} = 74.121 > 42\varepsilon$$

Tali elementi sono quindi di classe 4.

Dato che la classe dell'intera sezione è pari alla maggiore tra le classi dei singoli elementi, si ha che la sezione è di classe 4.

### 11.5.3 Calcolo dell'area efficace

Il calcolo dell'area efficace viene effettuato considerando l'effettiva tensione agente sul profilo che è pari a:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_g} = \frac{100000}{785.936} = 127.2368 \text{ N/mm}^2$$

Gli elementi della sezione interessati dalla riduzione della lunghezza sono quelli di classe 4, ovvero quelli di lunghezza  $h_p$ . Per tali elementi è possibile calcolare i parametri  $\bar{\lambda}_p$ ,  $\bar{\lambda}_{p,red}$  e il fattore di riduzione  $\rho$  con le espressioni che si trovano nell'EC3:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{h_p/t}{28.4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = 1.304$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}} = 0.9839$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,red} - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,red}^2} + 0.18 \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0.6} = 0.8711$$

dove  $k_\sigma=4$  e  $\psi=1$  in quanto il profilo è uniformemente compresso (vedi tabelle presenti nell'EC3).

Attraverso il fattore di riduzione è possibile calcolare la lunghezza efficace  $h_{eff}$  e, quindi, l'area della sezione efficace:

$$h_{eff} = \rho \cdot h_p = 0.8711 \cdot 148.242 = 129.1297 \text{ mm}$$

$$A_{eff} = 2 \cdot (h_{eff} + b_p) \cdot t = 2 \cdot (129.1297 + 48.242) \cdot 2 = 709.4868 \text{ mm}^2$$



Soluzione		FEME	
$h_{\text{eff}}[\text{mm}]$	$A_{\text{eff}}[\text{mm}^2]$	$h_{\text{eff}}[\text{mm}]$	$A_{\text{eff}}[\text{mm}^2]$
129.1297	709.4868	129.1282	709.4806

Tab. 11.9: Area efficace - Confronto tra i risultati

Il confronto tra il risultato appena ottenuto e quello ricavato tramite il solutore FEME è riportato nella Tab. 11.9.

www.feme.biz