



ELEMENTI IN ACCIAIO MONO-SIMMETRICI CON ANIMA IRRIGIDITA

Domenico Leone



ELEMENTI IN ACCIAIO MONO-SIMMETRICI CON ANIMA IRRIGIDITA

Domenico Leone

Il prof. Domenico Leone vanta un'esperienza più che trentennale nel campo della progettazione e realizzazione di strutture metalliche sia in campo industriale che infrastrutturale e civile ed è titolare del laboratorio di "Costruzione dell'Architettura" presso la facoltà di Architettura di Genova in qualità di professore a contratto. E' consulente di azienda avendo occupato in precedenza il ruolo di Responsabile del settore di progettazione di opere in carpenteria metallica prima presso la Società Italimpianti S.p.A. e successivamente presso le Società SMSDemag e Paul-Wurth S.p.A.

Ha partecipato alla progettazione di grandi impianti industriali di produzione e trasformazione dell'acciaio e ne ha seguito la realizzazione con le imprese costruttrici e di montaggio acquisendo ampia esperienza in tutti i settori del ciclo di esecuzione delle opere metalliche.

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

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

È autore del libro "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali nonché di numerosi programmi di calcolo automatico dedicati sia alla progettazione di strutture in acciaio di impianti industriali che alla progettazione di componenti strutturali e di dettaglio proprie degli edifici civili e delle infrastrutture (pacchetto SAITU edito da STA DATA S.r.l.) in base agli Eurocodici ed alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

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

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

Indice

Parte I	ELEMENTI IN ACCIAIO	
	MONO-SIMMETRICI CON ANIMA	
	IRRIGIDITA	4
1	Generalità	4
2	Metodo di calcolo	5
3	Classificazione della sezione	6
4	Calcolo della sezione efficace per sezioni di classe 4	8
5	Verifica di resistenza a presso-flessione	13
6	Verifica di stabilità dell'anima al taglio	14
7	Verifica di stabilità	15
8	Conclusioni e alcuni accenni sul programma "PrefleEC3_irrig" e le sue peculiarità ...	18

1 ELEMENTI IN ACCIAIO MONO-SIMMETRICI CON ANIMA IRRIGIDITA

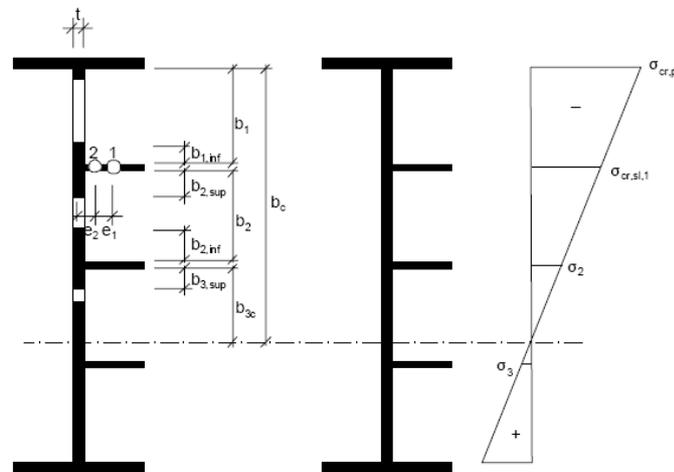
1.1 Generalità

Il tema qui presentato riguarda una tipologia strutturale tipica delle travi da ponte o di colonne di edifici industriali di grandi dimensioni che richiedono un irrigidimento dell'anima per ottenere la massima sezione efficace.

In generale si tratta di sezioni snelle fortemente parzializzate per gli effetti di instabilità locale dell'anima la cui sezione efficace può essere incrementata sensibilmente da piatti di irrigidimento opportunamente disposti lungo l'anima della sezione nelle zone soggette a compressione.

La norma di riferimento è la EN 1993-1-5 con richiami alla EN 1993-1-1.

La sezione tipica, per il caso di presso-flessione, è di seguito illustrata:



La sezione composta da anima e piattabande può essere mono o bi-simmetrica ; la mono-simmetria è tipica delle travi da ponte e gli effetti della instabilità flesso-torsionale possono essere valutati in base alla norma sperimentale ENV 1993-1-1 App. F che propone un'espressione del momento critico per questo tipo di sezioni.

Il calcolo qui presentato può essere esteso a travi da ponte collaboranti con soletta in C.A. solo per la fase di costruzione in cui la soletta non è ancora solidarizzata alla trave.

1.2 Metodo di calcolo

Facendo riferimento ad un caso reale ed eseguendo il progetto passo-passo con il programma automatico "PrefleEC3_irrig" da me realizzato e distribuito da Stadata s.r.l., illustrerò nel seguito i criteri fondamentali di calcolo così come esposti nella norma EN 1993-1-5.

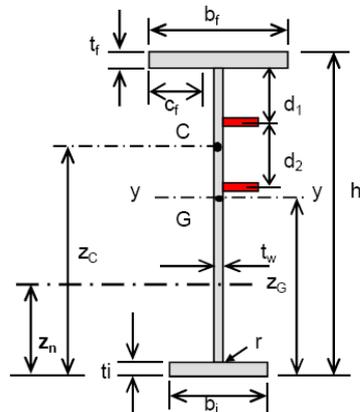
Oggetto dell'analisi è una trave di luce 21 m utilizzata per una passerella di banchina con solaio non collaborante.

Caratteristiche del materiale e geometria della sezione (mono-simmetrica "I" composta saldata "S") sono rappresentate nella seguente parte del foglio di calcolo automatico nel quale sono riportate anche le sollecitazioni per lo S.L.U. di resistenza e stabilità.

MATERIALE :	tipo (1,2,3,4)	3	S 355 EN 10025 - $f_y =$	35,50	kN/cm ²	$\epsilon =$	0,81
SEZIONE :	tipo (L / S)	S	<u>TIPO:</u> TRAVE	I	$\gamma_{M0} =$	1,05	

SOLLECITAZIONI DI PROGETTO :				resistenza	stabilità	
combinazione di carichi NON sismica		Momento flettente :	$M_{Ed} =$	kNcm	93000	93000
		Taglio congruente :	$V_{Ed} =$	kN	800	800
		Compress. assiale :	$N_{Ed} =$	kN	571,3	571,3

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE (I o T) :



SEZIONE MONO-SIMMETRICA

Moduli di resistenza elastici :

Modulo di resistenza plastico :

Anima irrigidita ? Y

N° irrigid. <= 4

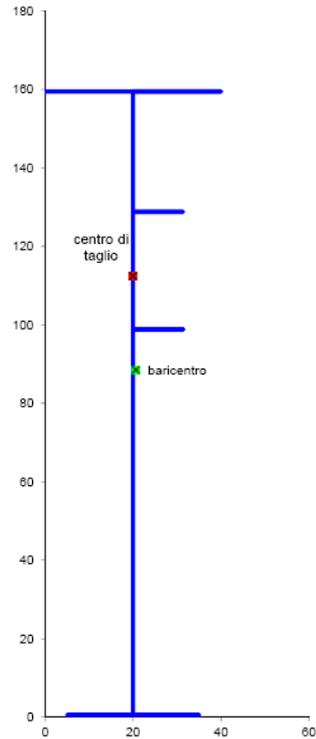
d1 = cm

d2 = cm

Altezza totale (h)	cm	160
Larghezza piattab. sup. (b _f)	cm	40
Larghezza piattab. inf. (b _i)	cm	30
Spessore anima (t _w)	cm	0,6
Spessore piattab. sup. (t _f)	cm	1,2
Spessore piattab. inf. (t _i)	cm	1,2
Raccordo anima-piattabanda (r)	cm	0,6
Altezza netta anima (d)	cm	157,6
Sporgenza ala superiore (c _f)	cm	19,10
Sporgenza ala inferiore (c _i)	cm	14,10
Area della sezione irrigidita (A)	cm ²	201,88
Posiz. asse baricentrico (z _G)	cm	88,50
Posiz. asse neutro plastico (z _n)	cm	75,09
Posiz. a.n.p. per fless. pura (d ₂)	cm	98,83
Posiz. centro di taglio (z _C)	cm	112,40
Momento di inerzia max. (J _y)	cm ⁴	746099
Momento di inerzia min. (J _z)	cm ⁴	9981
Momento di inerzia tors. (J _t)	cm ⁴	59
W _{ys} esterno piattab. sup.	cm ³	10435
W _{yi} esterno piattab. inf.	cm ³	8430
W _{yas} interno piattab. sup.	cm ³	10614
W _{yai} interno piattab. inf.	cm ³	8546
W _{el.min} = MIN (W _{ys} , W _{yi})	cm ³	8430
W _{pl.y}	cm ³	10778
d1 = cm		30,00
d2 = cm		30,00

Si può notare che l'anima è dotata di due piastre di irrigidimento posizionate come rappresentato nella figura. Il programma consente di disporre fino a 4 irrigidimenti da un solo lato dell'anima.

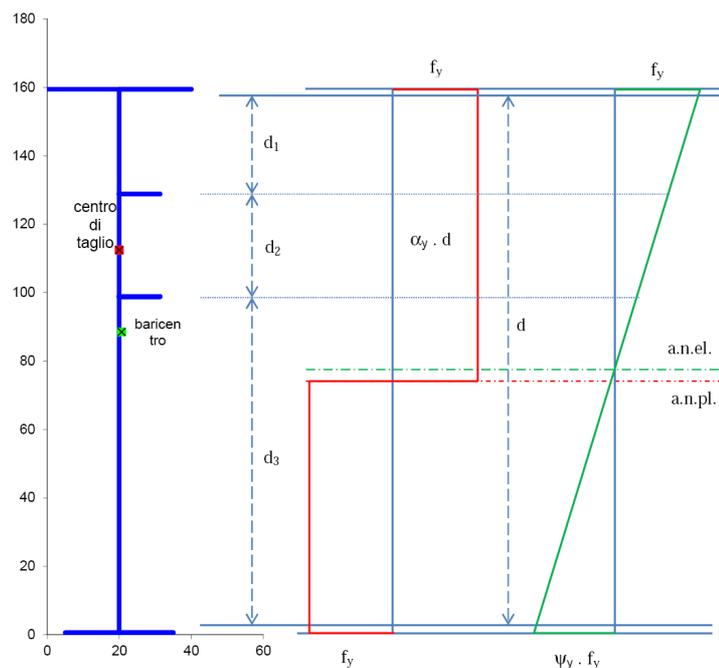
La sezione lorda (riferita agli assi degli elementi che la costituiscono) è automaticamente disegnata in scala ed i valori delle caratteristiche geometriche sono riportati nella pagina precedente.



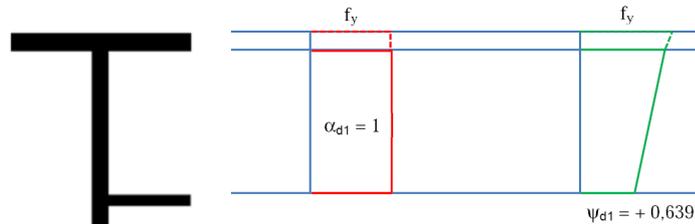
1.3 Classificazione della sezione

Si calcola innanzitutto il rapporto larghezza/spessore di ciascuna parte che costituisce la sezione (parte sporgente o parte interna).

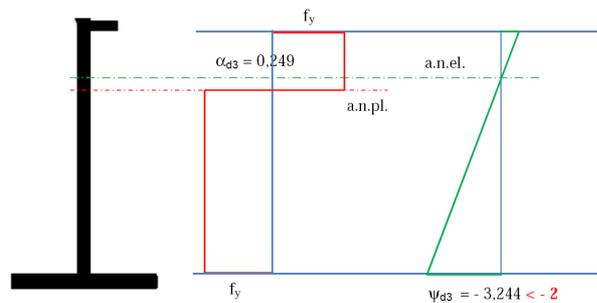
Si traccia quindi il diagramma plastico delle tensioni ed il diagramma elastico quest'ultimo a partire dalla tensione di snervamento del lembo compresso più esterno. Vengono così individuate le posizioni dell'asse neutro plastico (α_y) e dell'asse neutro elastico per lo S.L.U. (ψ_y).



Per ciascuna parte compressa (totalmente o parzialmente) di larghezza d_i viene calcolato sia il parametro α_{d_i} che il parametro ψ_{d_i} quest'ultimo attraverso una proporzione tra lunghezze e le tensioni di estremità. A titolo di esempio, la parte superiore dell'anima ha un comportamento plastico di uniforme compressione per cui $\alpha_d = 1$ mentre, la stessa parte di anima ha un comportamento elastico con andamento trapezoidale delle tensioni di compressione per cui $\psi_d = +0,639$



La parte inferiore dell'anima ha un comportamento plastico con una zona in uniforme compressione ed una in uniforme trazione mentre nel comportamento elastico il diagramma delle tensioni è linearmente variabile da una zona in compressione ad una in trazione passando per l'asse neutro elastico.



Conseguentemente agli stati tensionali di ciascuna parte della sezione vengono calcolati i rapporti larghezza/spessore **limite** per ciascuna classe definita dalla norma e confrontati con i rapporti larghezza/spessore effettivi.

Di seguito è riprodotta la parte del foglio di calcolo che, con i criteri sopra esposti, definisce la classe della sezione:

CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE

		$d ; d_1$	d_2	d_3	d_4		
Larghezza/spessore :	Anima	$d/t_w =$	50,00	50,00	162,67		$\alpha_y =$ 0,535
	Piattabande	$c/t =$	15,92				$\psi_y =$ -0,900
asse neutro el. = cm		$\alpha_d =$	1,000	1,000	0,249		
		$\psi_d =$	0,639	0,434	-3,244		
		$c_\psi =$	-0,709	-0,482	3,603		
Limite larghezza/spessore anima :	classe 1		26,85	26,85	117,61		
	classe 2		30,92	30,92	135,58		
	classe 3		38,80	42,02	135,58		
	$K_\sigma =$						
						classe dell'anima	4
Limite larghezza/spessore piattab.	classe 1		7,32				
	classe 2		8,14				
	classe 3		11,39				
						classe piattabanda	4
						CLASSE SEZIONE	4

Per ciascuna parte d_i dell'anima la classe risulta la seguente:

d : d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
4	4	3	-----
Classe dell'anima = 4			

Si noti che per la parte inferiore dell'anima (d₃) presso-flessa il valore limite del rapporto larghezza/spessore della classe 3 è stato assunto pari a quello della classe 2 (135,58) poiché, nella norma di riferimento, il valore di ψ è limitato a -2 contro un valore calcolato di $\psi = -3,244$. Tale valore induce a pensare ad una parte interna prevalentemente tesa senza problemi di instabilità locale nella zona debolmente compressa e quindi ad una classe ≤ 3 . Per ulteriori approfondimenti sul calcolo della sezione efficace può essere utile fare riferimento al numero 1 di "faresismica" pubblicato su questo stesso sito.

1.4 Calcolo della sezione efficace per sezioni di classe 4

Deve innanzitutto essere garantita una rigidità minima degli irrigidimenti disposti trasversalmente all'anima con passo regolare lungo l'elemento onde poter definire efficaci gli irrigidimenti longitudinali ai fini dell'instabilità locale dell'anima. La definizione di "irrigidimento trasversale rigido" richiede il rispetto delle regole riportate nell'item 9.3.3 (3) della EN 1993-1-5 e presentate nella seguente parte del programma di calcolo in cui si evidenzia che il momento di inerzia dell'irrigidimento ($I_{st} = 535 \text{ cm}^4$) è maggiore del valore minimo richiesto (26 cm^4) calcolato per $a/h_w = a/b = 1,586 > 2^{0,5}$.

AREA EFFICACE DELLE ZONE COMPRESSE - EN 1993-1-5 - NTC 2008

Lunghezza dell'asta tra gli appoggi	L =	2100	cm	$\alpha = a/b =$	1,5863
Distanza tra due punti di nullo del momento	L _e =	2100	cm	$k = b_0/L_e =$	0,0091
Altezza piatto di irrigidimento longitudinale	h _{s1} =	11	cm	$\beta =$	1,00
Spessore piatto di irrigidimento longitud.	t _{s1} =	1	cm		
Distanza tra irrigidimenti trasversali	a =	250	cm		
Altezza e spessore irrigidimenti trasversali	alt. h _{st} =	13	cm	sp. t _{st} =	1,2

condizione da soddisfare per irrigidimenti trasversali rigidi

$$\left. \begin{array}{l} \text{anima} \quad I_{st} = 535 > 26 \\ d_{\text{eff},1} = 2 \cdot 15 \cdot \varepsilon \cdot t_w + t_{s1} = 15,65 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a/h_w < \sqrt{2} : I_{st} \geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2 \\ a/h_w \geq \sqrt{2} : I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \end{array}$$

I dati richiesti in questa fase del calcolo sono utilizzati anche per definire alcuni parametri necessari al calcolo della sezione efficace come il fattore geometrico k che per valori inferiori a 0,02 non richiede il calcolo del fattore di riduzione β della piattabanda compressa dovuto all'effetto di trascinarsi del taglio (shear lag). Nel caso in esame $\beta = 1$

Il calcolo della sezione efficace dell'anima irrigidita compressa è eseguito tenendo conto sia del comportamento come "lastra" che del comportamento come "colonna". In base a questi due comportamenti vengono calcolati i fattori di riduzione ρ e ρ_c quest'ultimo calcolato sia per il caso di presso-flessione che per il caso di compressione uniforme.

L'espressione del fattore di riduzione ρ_c di seguito riportata (& 4.5.4) è complessa e contiene, oltre al fattore di riduzione ρ , altri due fattori di riduzione χ_c e ξ che devono essere calcolati col metodo iterativo in base alle tensioni critiche di stabilità sia per il comportamento come lastra che

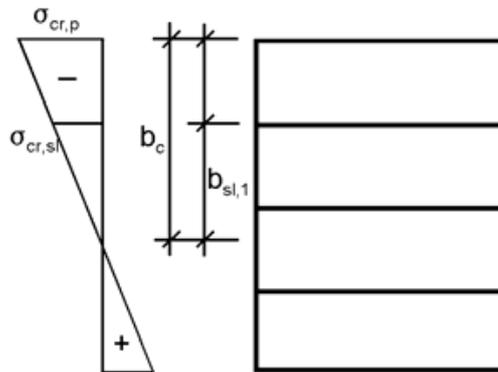
per il comportamento come colonna.

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$$

ρ è calcolato in base alla EN 1993-1-5 in funzione della snellezza adimensionale λ_p ovvero, per anima irrigidita, in base alla seguente espressione

$$\lambda_p = (\beta_{A,c} \cdot f_y / \sigma_{cr,p})^{0,5}$$

In cui $\sigma_{cr,p}$ è la tensione critica di stabilità dell'anima irrigidita riferita al lembo più compresso del pannello superiore calcolata in funzione del numero di irrigidimenti presenti nella zona compressa. Per il caso di anima irrigidita con uno o due irrigidimenti longitudinali, la norma fornisce il valore della tensione critica del singolo irrigidimento calcolata come per elemento compresso su "suolo elastico". Tale tensione consente di risalire alla tensione critica di stabilità dell'anima per semplice proporzione.

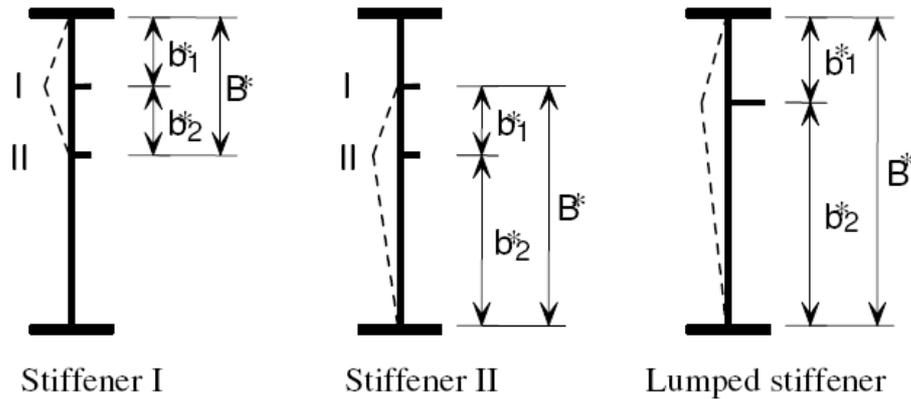


$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1,05 E}{A_{sl,1}} \frac{\sqrt{I_{sl,1} t^3 b}}{b_1 b_2} \quad \text{if } a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 (1 - \nu^2) A_{sl,1} b_1^2 b_2^2} \quad \text{if } a \leq a_c$$

$$\text{with } a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1} b_1^2 b_2^2}{t^3 b}}$$

Nel caso di **due irrigidimenti longitudinali** devono essere esaminati tre casi di instabilità e scelta la situazione che genera il minimo valore della tensione critica.



Il terzo caso prevede un irrigidimento fittizio che ha come area e inerzia rispettivamente la somma dei valori riferiti ai singoli irrigidimenti ed è posizionato nel baricentro delle forze agenti sui singoli irrigidimenti.

χ_c è calcolato per il comportamento come colonna con riferimento alla snellezza adimensionale l_c dipendente dalla tensione critica $\sigma_{cr,c}$

$$\sigma_{cr,c} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1} / [A_{sl,1} \cdot a^2] \cdot b_c / b_{sl,1}$$

ξ è il rapporto tra la tensione critica del comportamento a piastra e la tensione critica del comportamento come colonna riferito all'unità:

$$\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1$$

La seguente parte del foglio di calcolo definisce i valori dei coefficienti di riduzione per il calcolo dell'area efficace dell'anima irrigidita.

Nel riquadro della parte inferiore del foglio è riportato il calcolo della tensione critica di stabilità dell'anima irrigidita da due piatti longitudinali presenti nella zona compressa.

Sono stati esaminati i 3 possibili casi di instabilità precedentemente descritti con i seguenti risultati:

coeff. di riduzione area 1° irrigidim.		2 irrig. comp.	caso 1	caso 2	caso 3
I° pannello	II° pannello	$\sigma_{cr,p} =$	85,925	118,974	63,183
$\lambda_{pw} = 0,9931702$	0,9479832	$a_c =$	294,111	439,510	599,653
$k_\sigma = 4,7469693$	5,2102975	$b_c/b_{sl,1} =$	1,476	2,818	1,602
$\rho_w = 0,8018274$	0,8392091	irrigidim. equiv. anima		$b_{1,a} =$	34,94
		II° irrigidimento		$A_{sl,2} =$	29,03
				$I_{sl,2} =$	341,26

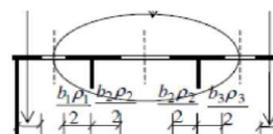
La tensione critica di stabilità minima dell'anima irrigidita è data dal caso 3 ovvero dal considerare i due irrigidimenti come un "unico irrigidimento fittizio che ha come area e inerzia rispettivamente la somma dei valori riferiti ai singoli irrigidimenti ed è posizionato nel baricentro delle forze agenti sui singoli irrigidimenti". Il valore della tensione critica minima dell'anima irrigidita è quindi $\sigma_{cr,p} = 63.183 \text{ N/mm}^2$.

Area efficace della zona compressa dell'anima irrigidita : $A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t$

$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum \rho_{loc} \cdot b_{c,loc} \cdot t = 57,91 \text{ cm}^2$

$A_{sl,eff} = \text{area efficace degli irrigid. longitud.} = 22,00 \text{ cm}^2$

$b_{c,loc} = \text{parte compressa dei sottopannelli}$



$\rho_c =$	fattore di riduzione del pannello irrigidito :	$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$
	presso-flessione : $\rho_c = 0,73662$	compressione uniforme : $\rho_c = 0,68390$

comportamento come lastra

parametri per instabilità locale	nel caso di appoggio di estremità rigido :	$\bar{\lambda}_w = 2,359$	$c = \text{cm}$	63,702
	coeff. per la verifica all'instabilità per taglio :	$\chi_w = 0,448$	$b_f = \text{cm}$	31,09
	coeff. di rid. per instabilità longit. del pannello :	$\chi_c = 0,663$	$\chi_f =$	0,799

$\bar{\lambda}_p = (f_y / \sigma_{cr})^{0,5}$	fattore di riduzione per anima non irrigidita	$\rho = 1,000$	$\phi = 0,87890$
$\bar{\lambda}_p = (\beta_{A,c} \cdot f_y / \sigma_{cr,p})^{0,5}$	per anima irrigidita (*)	$\bar{\lambda}_p = 0,00000$	$k_\sigma = 16,898198$
		$\bar{\lambda}_p = 0,68770$	$\beta_{Ac} = 0,84172321$

comportamento come colonna

$\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1$	presso-flessione : $\xi = 0,116$	compressione : $\xi = 0,031$
---	----------------------------------	------------------------------

$\sigma_{cr,c} = \pi^2 \cdot E \cdot t^2 / [12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2]$	per anima non irrigidita	$\sigma_{cr,c} = 0,000 \text{ kN/cm}^2$
$\sigma_{cr,c} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1} / [A_{sl,1} \cdot a^2] \cdot b_c / b_{sl,1}$	per anima irrigidita	$\sigma_{cr,c} = 56,620 \text{ kN/cm}^2$
parametri per calcolo χ_c	$\bar{\lambda}_c = 0,74762381$	$\phi = 0,93941172$
		$\beta_{Ac} = 0,89147368$

area e inerzia efficace dell'irrigidimento più compresso



$i_w = 3,43$	$A_{sl,1} = 28,9 \text{ cm}^2$	$\delta = \sum A_{sl} / (b \cdot t) = 0,233$
$y_G = 9,09$	$I_{sl,1} = 341 \text{ cm}^4$	
$y_{G,>3sl} = 10,21$	$I_{sl} = 825,1 \text{ cm}^4$	$\gamma = I_{sl} / (b \cdot t^3 / 10,92) = 264,667$
$e = \text{max. eccentricità baricentrica irrig.-anima}$		$e = 3,591 \text{ cm}$

(*) tensione critica di instabilità dell'anima irrigidita - (Allegato A)		$\sigma_{cr,p} = 63,183 \text{ kN/cm}^2$
$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot 19000 \cdot (t / b)^2$	$\sigma_{cr,p}$ per $n^\circ \geq 3$ irrigidimenti posti ad interesse costante	$\sigma_{cr,p} = 0,000 \text{ kN/cm}^2$
N° irrigid. in zona compressa : 2	nota 4 - item A.1 (2)	$k_{\sigma,p} = 0,000$
caratteristiche della sezione presso-flessa	$\psi = 0,000$	
$\psi_y = -0,695$	$\sigma_{cr,p}$ per n° 1 irrigidimento in zona compressa : item A.2.2 (1)	$\sigma_{cr,p} = 0,000 \text{ kN/cm}^2$
$Z_{N,a} = 65,8$	$b_1 = 0,00 \text{ cm}$	$a_c = 0,000 \text{ cm}$
$\psi_{y1} = 0,677$	$b_2 = 0,00 \text{ cm}$	$b_c / b_{sl,1} = 0,000$
$\psi_{y2} = 0,524$	$\sigma_{cr,p}$ per n° 2 irrigidimenti in zona compressa : item A.2.2 (2)	$\sigma_{cr,p} = 63,183 \text{ kN/cm}^2$
$\psi_{y3} = -1,958$	caso 1	$a_c = 599,653 \text{ cm}$
$b_{1,inf} = 15,85$	caso 2	$b_c / b_{sl,1} = 1,602$
$b_{2,sup} = 12,96$	caso 3	
$b_{2,inf} = 16,04$	$b_1 = 30,00$	$b_1 = 30,00$
$b_{3,sup} = 13,00$	$b_2 = 30,00$	$b_2 = 97,60$
		$b_3 = 122,66$

Le caratteristiche geometriche della sezione efficace sono calcolate col metodo semplificato (vedere "faresissima 1") sia per la sezione presso-flessa che per la sezione uniformemente compressa attraverso 5 passi sequenziali come di seguito riportato dal programma "PrefleEC3_irrig".

	Valori originari	Valori efficaci
Area della sezione irrigidita	201,88 cm ²	122,4 cm²
Modulo di resistenza esterno piattab. superiore	10435 cm ³	8317 cm³
Modulo di resistenza esterno piattab. inferiore	8430 cm ³	8109 cm³

1.5 Verifica di resistenza a presso-flessione

Per i criteri di verifica della sezione presso-flessa si rimanda al paragrafo 1.2.1 di faresismica 5 ; qui viene riprodotto il foglio di calcolo del programma "PrefleEC3_irrig" dal quale si evince che il calcolo è eseguito in assenza di taglio ($V_{Ed} < 50\% \cdot V_{pl,Rd}$) e senza riduzione del momento resistente di progetto per effetto dell'interazione con la forza assiale ($N_{Ed} < \min[N_{1,Rd} ; N_{2,Rd}]$). Il rapporto tensionale è calcolato con la seguente espressione

$$\left[\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{(M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N)}{W_y} \right] / f_d \quad \text{e vale : } 0,473 < 1$$

Nel caso in cui il taglio sia influente nella verifica deve essere eseguita l'interazione tra momento, forza assiale e taglio secondo le seguenti espressioni:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{for } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

$M_{f,Rd}$ è il momento plastico della sezione costituita dalle sole piattabande efficaci

VERIFICA DI RESISTENZA			
Area resistente a taglio :	$A_v = \eta \cdot h_w \cdot t_w$	$A_v =$	94,56 cm ²
Limite di resistenza plastica a taglio :	$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / 3^{1/2}) / \gamma_{M0}$	$V_{pl,Rd} =$	1846 kN
$V_{Ed,max} < 50\% V_{pl,Rd}$	$\rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$	$\rho =$	0,000
Verifica di resistenza per sezione di classe		4	
		$\gamma_{M0} =$	1,05
		$f_d = f_y / \gamma_{M0} =$	33,81 kN/cm ²
		$W_{pl,y,Rd} =$	5593 cm ³
$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} =$	0,084	$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A =$	0,500
$r = (1-n) / (1-0,5 \cdot a) =$	1,000	$r =$	fattore di riduzione
$N_{1,Rd} = 0,25 \cdot N_{pl,Rd} =$	1706	$N_{2,Rd} = h_w \cdot t_w \cdot f_y / 2 =$	1599
$N_{Ed} < \min(N_{1,Rd} ; N_{2,Rd})$		$N_{Ed} <= N_{y,Rd} (cl <= 2) =$	571
$N_{y,Rd} = A_v \cdot (1-p) \cdot f_y$		NO carico assiale	
in assenza di taglio :	$R_{M,N} = M_{Ed} / M_{N,Rd}$	$[N_{Ed} / A + (M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N) / W_y] / f_d =$	0,473 < 1
in presenza di taglio :	$k = 6$		
$M_{N,Rd} = [W_{pl,y,Rd} + v \cdot (1-p) \cdot A_w^2 / (k \cdot t_w) - v \cdot N_{Ed}^2 / ((1-p) \cdot f_y^2 \cdot 4 \cdot t_w)] \cdot f_d$		$M_{N,Rd} <= M_{N,Rd}$	$M_{N,Rd} =$
$v =$	fattore di simmetria	$= 2 \cdot [(1 - (z_{G-t}) / h_w)^2 + (z_{G-t}) / h_w]^2 =$	1,05711
se $V_{z,Ed} > 50\% V_{pl,Rd}$	resistenza dell'area di taglio ridotta del fattore (1-p)	$R_{M,N,V} =$	< 1
Area efficace ridotta :		caratteristiche sezione efficace ridotta per taglio	
flangia superiore :	$A_{fl,min} =$	35,22 cm ²	$A_v^n =$
flangia inferiore :	$A_{fl,inf} =$	35,22 cm ²	$z_{G^n} =$
anima :	$A_w \cdot (1-p) =$	51,91 cm ²	$J_{y^n} =$
	$A_{eff,V} =$	122,35 cm ²	$W_{eff,s} =$
	$W_{eff,y,pl} =$	10167 cm ³	$W_{eff,i} =$
			$W_{eff,min} =$
			8109 cm ³
			8109 cm ³

1.6 Verifica di stabilità dell'anima al taglio

Nel caso in cui il rapporto h_w / t sia maggiore di $31 \cdot \varepsilon \cdot (k_\tau)^{0,5} / \eta$ per anime irrigidite oppure maggiore di $72 \cdot \varepsilon / \eta$ per anime non irrigidite (η è un coefficiente di sicurezza normalmente assunto pari a 1,2) deve essere verificata la stabilità al taglio dell'anima in base alle seguenti espressioni:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

il coefficiente di instabilità dell'anima irrigidita può essere ricavato dalla seguente tabella (EN 1993-1-5) in funzione della rigidità dell'appoggio di testata secondo gli schemi definiti dalla norma:

Table 5.1: Contribution from the web χ_w to shear buckling resistance

	Rigid end post	Non-rigid end post
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

per trave con irrigidimenti trasversali solo sugli appoggi:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t \varepsilon}$$

Per trave con irrigidimenti trasversali sugli appoggi e irrigidimenti trasversali intermedi o irrigidimenti longitudinali o entrambi:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}}$$

k_τ è calcolato in base alla procedura dell'item A.3 della EN 1993-1-5

La verifica è riportata nella seguente parte del foglio di calcolo automatico

VERIFICA DI STABILITÀ A TAGLIO DELLE ANIME

Coefficiente di stabilità a taglio per piatti irrigiditi :

$$\gamma_{M1} = 1,05$$

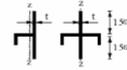
$$\left. \begin{aligned} k_{\tau} &= 5,34 + 4,00 (h_w / a)^2 + k_{tst} & a / h_w &\geq 1 \\ k_{\tau} &= 4,00 + 5,34 (h_w / a)^2 + k_{tst} & a / h_w &< 1 \end{aligned} \right\} \alpha = a / h_w = 1,586294$$

$$k_{tst} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{st}}{t^3 h_w} \right)^3} \geq \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{st}}{h_w}}$$

$$\begin{aligned} I_{st1} &= 282 \text{ cm}^4 \\ I_{st} &= 563 \text{ cm}^4 \\ k_{tst} &= 29,34 \\ d_{eff,1} &= 15,65 \text{ cm} \end{aligned}$$

per uno o due irrigidimenti longitudinali e con $\alpha > 3$

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{I_{st}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{I_{st}}{t^3 h_w}}$$



$$\begin{aligned} k_{\tau} &= 13,39 \\ k_{\tau i} &= 7,38 \end{aligned}$$

$$h_w / t = 262,67 > 76,92 \text{ necessaria verifica all'instabilità per taglio}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 2214,97 \quad V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yt}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) = 14,75 \text{ kN}$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 826,73 \text{ kN} \quad \eta_3 = 0,951 < 1 \quad \bar{\eta}_3 = 0,484 < 0,5$$

$$\text{per } \bar{\eta}_3 > 0,5 \quad \eta_4 = \bar{\eta}_1 + (1 - M_{f,Rd} / M_{pl,Rd}) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 <= 1$$

$$M_{f,Rd} = 151050 \text{ kNm} \quad \eta_4 = 0,440 < 1$$

$$\bar{\eta}_1 >= M_{f,Rd} / M_{pl,Rd} \quad \bar{\eta}_1 = 0,439411$$

1.7 Verifica di stabilità

Per i criteri di verifica di stabilità della sezione presso-flessa si rimanda al paragrafo 1.2.2 di faresismica 5; di seguito viene riprodotto il foglio di calcolo del programma "PrefleEC3_irrig" che contiene, oltre ai necessari dati di input della geometria e delle sollecitazioni, i parametri principali della verifica.

L'espressione del momento critico di stabilità è generalmente quella a suo tempo indicata dalla norma sperimentale ENV 1993-1-1 – Appendice F e non più riportata nelle recenti edizioni della norma definitiva EN 1993-1-1. Tale espressione è valida per sezioni mono e bi-simmetriche a differenza di quella fornita dalle norme NTC 2008 che è valida solo per sezioni bi-simmetriche caricate nel baricentro e con rotazione e distorsione delle estremità non vincolate.

Secondo ENV 1993-1-1:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\}$$

Secondo NTC 2008:

$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{E J_y \cdot G J_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}} \right)^2 \cdot \frac{E J_{\omega}}{G J_T}}$$

I coefficienti di forma C_i sono definiti in funzione del diagramma del momento lungo l'elemento con i valori congruenti con l'espressione riportata dalla norma sperimentale ENV.

Le espressioni di verifica della stabilità per presso-flessione e flesso-torsione sono le seguenti:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

RESISTENZA ALL'INSTABILITA'

Distanza effettiva tra i vincoli torsionali :	L =	700	cm	vincolo parziale
Lunghezza libera nel piano principale :	L _y =	2100	cm	
Momenti principali di estremità (+;-)	M _{Sy} =	0	M _{dy} =	0 kNcm
(1) Momento dovuto ai carichi trasver. nel piano	M ₀ =	93000	ΔM =	93000 kNcm
Diagramma del momento flettente (*) :	(l,p,t,q) =	p		parabolico
Fattore di lunghezza effettiva k (0,5-0,7-1)	k =	1		rotazione z-z libera delle estremità
Fattore di lunghezza effettiva k _w (0,5-0,7-1)	k _w =	1		distorsione libera delle estremità
Fattore di distribuzione momenti estremi :	ψ =	0,00		-1 < ψ < 1
Max. spostamento dell'elemento :	δx =	0		cm (da calcolo E.F. della struttura)

nota (1) : momento calcolato per trave semplicemente appoggiata

Coeff. di forma (*) :	C1 =	1,132	C2 =	0,46	C3 =	0,525
-----------------------	------	-------	------	------	------	-------

Fattore di momento uniforme equivalente (*) :	β _{My} =	1,300	diagr. parabolico	
β _w = W _{calc} /W _{ply}	β _w =	0,75	per sez. di classe 4	
β _f = J _{tf} / (J _{tf} +J _{ti})	β _f =	0,70	k _k =	0,8
z _j = k _k .(2 β _f -1) . h _s /2	z _j =	25,83	cm	
I _w = β _f .(1-β _f) . J _y . Hs2 warping const.	I _w =	47885425	cm ⁶	per sezione a I
z _g = punto di applicazione del carico			estradosso	

Momento critico elastico : M_{cr} = 297641 kNcm EN 1993-1-1

Lunghezza libera nel piano laterale :	L _z =	700	cm	EC3
Snellezze effettive per presso-flessione :	λ _y =	35	λ _z =	100
Snellezze adimensionali corrispondenti :	λ̄ _y =	0,352	λ̄ _z =	1,014 < 1,771
Snellezza per l'instabilità flessio-torsionale :	λ _{LT} =	87	λ ₀ =	72,55352
Snellezza adimensionale corrispondente :	λ̄ _{LT} =	0,984	λ̄ _{LT,0} =	0,2
			λ̄ ₀ =	0,823756

Coeff. di imperfezione per presso-flessione :	α _y =	0,34	α _z =	0,49
	φ _y =	0,588	φ _z =	1,214
Coeff. di imperfezione per flessio-torsione :	α _{LT} =	0,76	per sezione saldata	0,76
φ _{LT} = 0,5 . [1 + α _{LT} . (λ̄ _{LT} - λ̄ _{LT,0})] + β . λ̄ _{LT} ²	φ _{LT} =	1,281	β =	1

Coeff. di riduzione per presso-flessione :	χ _y =	0,945	χ _z =	0,532
Coeff. di riduzione per flessio-torsione :	χ _{LT} =	0,476	χ _{min} =	0,532

per qualunque sezione :	χ _{LT} =	0,476	φ _{LT} =	1,085	item 6.3.2.3	
VERIFICA COL METODO 2 EN 1993-1-1	μ _y =	-0,493	k _y =	1,042	k _{yy} =	0,979
	μ _{LT} =	0,048	k _{LT} =	0,993	k _{zy} =	0,963

fattore di correzione per distribuzione del momento tra i vincoli :	profilo a I dissimmetrico			
f = 1 - 0,5 . (1-k _c) . [1-2,0 . (λ̄ _{LT} - 0,8) ²]	f =	1,000	γ _{M1} =	1,05
k _c = 0,940	χ _{LT,mod} = χ _{LT} / f =	0,476	f _d = f _y / γ _{M1} =	33,81 kN/cm ²

VERIFICA DI STABILITA' PER PRESSO-FLESSIONE

ENV 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _{min} . A _{calc}) + k _y . (M _{Ed} + N _{Ed} . e _N) / W _{calc}] / f _d =			
EN 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _y . A) + k _{yy} . (M _{y,Ed} + N _{Ed} . e _{Ny}) / (χ _{LT} . W _y)] / f _d =	0,836	< 1	OK !

VERIFICA DI STABILITA' PER FLESSO-TORSIONE

ENV 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _z . A _{calc}) + k _{LT} . (M _{Ed} + N _{Ed} . e _N) / (χ _{LT} . W _{calc})] / f _d =			
EN 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _z . A) + k _{zy} . (M _{y,Ed} + N _{Ed} . e _{Ny}) / (χ _{LT} . W _y)] / f _d =	0,938	< 1	OK !

I coefficienti di riduzione k_{ij} sono calcolati in base alle espressioni riportate nell'allegato A della EN 1993-1-1 per il metodo 1 e nell'allegato B della stessa norma per il metodo 2. Si riporta di seguito il calcolo dei coefficienti k_{ij} eseguito col metodo 2:

FATTORI DI INTERAZIONE k_{ij} - METODO 2

FATTORE DI INTERAZ.	DI Classe 3 e 4	SEZ. DI Classe 1 e 2	
k_{yy} $C_{my}=0,9$	$C_{my} \left(1 + 0,6\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,979332$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,033329$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,97111$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,061105$	$k_{yy1} = 0,97933$ $k_{yy2} = 0,97933$
k_{yz}	k_{zz} k_{zz} con $C_{mz} = 0,9$	$0,6 \cdot k_{zz}$ $0,6 \cdot k_{zz}$ con $C_{mz} = 0,9$	0 0
k_{zy}	$0,8 \cdot k_{yy}$	$0,6 \cdot k_{yy}$	$k_{LT1} = 0,58267$ $k_{LT2} = 0,552$
$k_{zy}=k_{LT}$ $C_{mLT}=0,9$	$\left[1 - \frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = 0,981443$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = 0,981443$	$\left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = 0,962887$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = 0,962887$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} = 0,962351$	$k_{LT1} = 0,96289$ $k_{LT2} = 0,96289$
k_{zz}	$C_{mz} \left(1 + 0,6\bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0$	0 0

Moment diagram	range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}	
		uniform loading	concentrated load
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,90 - 0,10\alpha_h(1+2\psi)$

For members with sway buckling mode the equivalent uniform moment factor should be taken $C_{my} = 0,9$ or $C_{Mz} = 0,9$ respectively.

C_{my} , C_{mz} and C_{mLT} should be obtained according to the bending moment diagram between the relevant braced points as follows:

moment factor	bending axis	points braced in direction
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

	U.L.	C.L.
$M_s =$		93000
$M_h =$		0
$C_{my} =$		0,6
$C_{mz} =$		0,6
α_s		
	0,4	0,4
	0	0
	0,4	0,4
	0	0
	0,4	0,4
	0	0
	0,95	0,9
	0,95	0
	0,95	0,9
	0	0
	0,95	0,9
	0	0

$C_{my} =$	0,95
$C_{mz} =$	0,6
$C_{mLT} =$	0,95

per verifica a svergolamento :

$C_{my} =$	0,95
$C_{mz} =$	0,9
$C_{mLT} =$	0,95

1.8 Conclusioni e alcuni accenni sul programma "PrefleEC3_irrig" e le sue peculiarità

Il programma "PrefleEC3_irrig" esegue la verifica di resistenza e stabilità a pressoflessione e flessio-torsione di elementi a sezione aperta mono-simmetrica, con anima irrigidita, inflessa nel piano principale, in base alla EN 1993-1-5. Per la verifica di

stabilità sono tenuti in conto i valori del momento flettente principale applicati alle estremità insieme agli effetti flessionali aggiuntivi dovuti all'applicazione di carichi intermedi. Nel caso di travi semplicemente appoggiate i momenti di estremità sono nulli e l'instabilità è generata solo dal momento flettente massimo in campata.

Nel caso di sollecitazioni dovute a combinazione sismica per strutture ad alta (media) duttilità e per elementi (trave o colonna) appartenenti a telai resistenti a momento o con controventi concentrici od eccentrici nei quali sono previste zone dissipative (formazione di cerniere plastiche), è prevista la verifica dell'asta in base alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) oppure alla EN 1998-1. Solo a titolo di paragone è possibile eseguire il calcolo in base alla O.P.C.M. 3274.

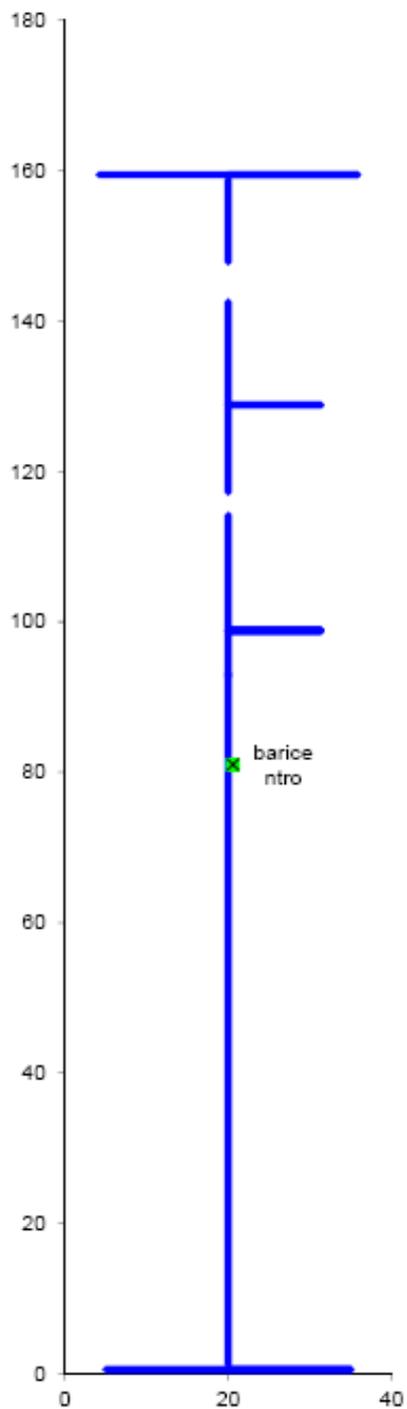
I dati di input sono: il tipo (trave o colonna) e le dimensioni dell'elemento, il materiale costituente, la presenza o meno di irrigidimenti e le sollecitazioni di progetto che, per combinazioni sismiche, sono distinte in effetti delle azioni non sismiche (carichi verticali) appartenenti alla combinazione in esame ed effetti dell'azione sismica. Sempre per verifica in condizioni sismiche deve essere definita la tipologia strutturale di appartenenza dell'elemento (telaio resistente a momento, telaio con controventi concentrici, telaio con controventi eccentrici) nonché il fattore w (a per O.P.C.M. 3274) di duttilità degli elementi dissipativi del telaio.

Il post-processore definisce la classe della sezione con riferimento a tutte le parti compresse delimitate dagli irrigidimenti e ne calcola i moduli di resistenza con particolare attenzione alle sezioni di classe 4 la cui parte efficace è calcolata sviluppando i criteri informativi dell'EC3 (parte 1-5) tenendo conto dell'instabilità laterale dell'anima irrigidita e seguendo il metodo approssimato.

Le verifiche di resistenza e stabilità sono eseguite in conformità alle indicazioni dell'EC3 e dell'EC8 o dell'O.P.C.M. n° 3274 ed in accordo con il DM 14/01/2008 (NTC) e relative Istruzioni (DM 02/02/2009)

Il programma esegue la visualizzazione grafica della sezione lorda e parzializzata come negli esempi di seguito riportati relativi al caso in esame:

FLESSIONE PURA



COMPRESSIONE UNIFORME

